

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

3D laserový profilometr jako senzor dat pro digitální dvojčata

Michal Gabriel

Vedoucí: doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
Obor: Internet Věcí
Studijní program: Otevřená informatika
Srpen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gabriel** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **466291**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Otevřená informatika**
Studijní obor: **Internet věcí**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

3D laserový profilometr jako senzor dat pro digitální dvojčata

Název bakalářské práce anglicky:

3D Laser Profilometer as a Digital-twins Sensor

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte základy problematiky digitálních dvojčat v koncepci Průmysl 4.0. Navrhněte, sestavte a realizujte DEMO laserového 3D profilometru s rotujícím modelem, včetně SW vybavení. Řešení navrhněte s cílem umožnit jeho využití jako senzoru pro sběr dat digitálních dvojčat během procesu aditivní výroby. Využijte laserový profilometr MicroEpsilon SCANCONTROL LLT2800-25 s doplněným krokovým motorem (využijte mikrokrokování) a související HW v laboratoři. Speciální důraz věnujte problematice kalibrace a přepočtu souřadnic profilu na 3D objekt.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Vladimír Mařík a kol.: Iniciativa Průmysl 4.0, MPO-ČR, <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [2] MicroEpsilon, scan CONTROL 2800/2810, Instruction Manual, <https://www.lagerwerk.com/media/pdf/f0/33/51/scanCONTROL-28x0-en.pdf>
- [3] CNCshop, ES-M Series datasheet, <http://www.cncshop.cz/es-m32309-easy-servo-motor-09nm>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:
do konce letního semestru 2019/2020

Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použité zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 14.8.2020

.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Lukáši Vojtěchovi, Ph.D. za jeho velkou trpělivost, jeho rady při psaní práce, a za zapůjčení zařízení potřebného k práci . Také bych rád poděkoval kamarádu Vládovi za vytisknutí vzorků na skenování. A v neposlední řadě bych poděkoval své rodině a obzvláště své babičce, u níž jsem měl možnost po dobu studia bydlet.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá realizací demo 3D skeneru, za použití profilometru LLT 2800-25. Součástí je kalibrace a ověření přesnosti skeneru. Ovládání skeneru je implementováno v jazyce Python. Dále se teoreticky zabývá problematikou využití 3D skeneru v rámci digitálního dvojčete.

Klíčová slova: 3D skener, laserový profilometr, průmysl 4.0, triangulační skener, digitální dvojče

Abstract

This bachelor thesis focuses on creation of 3D scanner demo with the use of profile sensor LLT 2880-25. Included is the calibration and evaluation of the scanner accuracy. The control application is programmed in Python language. Additionally thesis theoretically explores the use of 3D scanners in the context of digital twins.

Keywords: 3D scanner, laser scanner, industry 4.0, triangulation scanner, digital twin

Obsah

1 - Úvod	8
2 - Teoretická část	8
2.1 - Průmysl 4.0	8
2.1.1 - Industrie 4.0	8
2.1.2 - Iniciativa Průmysl 4.0	9
2.1.3 - Průmysl 4.0 obecně	10
2.2 - Aditivní výroba	12
2.3 - Digitální dvojče	13
2.3.1 - Historie	14
2.4 - 3D Skenery	15
2.4.1 - Kontaktní skenery	15
2.4.3 - Bezkontaktní aktivní skenery	17
2.5 - Reprezentace dat získaných 3D skenem	20
3 - Praktická část	22
3.1 - Návrh experimentu	22
3.2 - Popis a zapojení hardwaru, komunikace s řadičem motoru a jednotkou skeneru	24
3.3 - Nastavení parametrů skenu přes knihovnu a filtrování	26
3.4 - Kalibrace	29
3.5 - Nejistoty měření	31
3.6 - Naměřené a vypočtené hodnoty	32
3.6.1 - Ukázky výstupu skenu	37
3.7 - Zhodnocení výsledků	38
4 - Závěr	39
Seznam použitých zdrojů	40

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky:

1. Přehled technologií aditivní výroby	- 12
2. Princip technologie FDM	- 13
3. Schéma digitálního dvojčete pro predikci poškození	- 14
4. Stolní CMM	- 15
5. Přenosný CMM	- 15
6. Nástin funkce sledovače	- 16
7. Princip fotogrammetrie	- 16
8. Princip tvorby 3D modely ze siluety	- 17
9. Znázornění funkce ToF a měření fázového posunu	- 18
10. Nákres triangulačního snímače	- 18
11. Porovnání triangulace a konoskopické holografie	- 19
12. Znázornění funkce snímače strukturovaného světla	- 19
13. Porovnání způsobů reprezentace dat	- 21
14. Umístění snímače a motoru během skenu	- 22
15. Kostka s vyznačenými body měření	- 23
16. Kulička s vyznačenými body měření	- 23
17. Možné pozice laseru vůči motoru	- 23
18. Schéma zapojení	- 25
19. Vývojový diagram řídicího programu	- 26
20. Ukázka nefiltrovaného profilu	- 28
21. Ukázka filtrovaného profilu	- 28
22. Vybrání bodů profilu	- 29
23. Úhel mezi protějšními profily	- 30
24. Znázornění počítané vzdálenosti	- 30
25. Výřezy mračna bodů kostky ve vybraných bodech	- 33
26. Hodnoty nejistoty v závislosti na pozici bodů, v případě kostky	- 33
27. Rozdílné polohy dvou mračen bodů po registraci	- 35
28. Hodnoty nejistoty v závislosti na pozici bodů, v případě kuličky	- 35
29. Hodnoty nejistoty v závislosti na pozici bodů, v případě mince	- 36
30. Naskenované objekty	- 37
31. Porovnání hustoty mračen bodů při různých úrovních mikrokrokování	- 38

Tabulky:

1. Vzory business modelů pro Průmysl 4.0	- 11
2. Parametry z dokumentace profilometru	- 24
3. Tloušťky kostky měřeny ve vyznačených bodech	- 32
4. Vypočtené nejistoty měření kostky a porovnání s rozdílem rozměrů	- 34
5. Průměry kuličky měřeny ve vyznačených bodech	- 34
6. Vypočtené nejistoty měření kuličky a porovnání s rozdílem rozměrů	- 35
7. Vypočtené průměry mince, nejistoty a porovnání s rozdílem rozměrů	- 36

1 - Úvod

V posledních letech vzrostla obliba aditivní výroby, častěji nazývané 3D tiskem. Během stejné doby se také rozšířila snaha o sbírání a zpracovávání větších množství dat, přičemž jedním z nástrojů na agregaci a analýzu dat je tzv. digitální dvojče. O aktivitě vývoje této oblasti svědčí vývoj velikosti souvisejícího trhu z přibližně 3 na 5.1 miliard amerických dolarů v letech 2018-2020[1, 2]. Využitím sběru dat o aditivní výrobě lze zvýšit spolehlivost a opakovatelnost výroby. To může být zajímavé i pro běžné uživatele 3D tiskáren, kteří chtějí dosáhnout vyšší kvality. Jedno z možných řešení je přizpůsobování výrobního procesu podle parametrů konkrétního zpracovávaného kusu. Tomu se věnoval například projekt 3D&FPP[3], kde byl obráběcí proces uzpůsoben podle 3D skenu kusu. Všechny ze zmíněných technologií souvisí s konceptem Průmysl 4.0, proto se mu věnuje část textu.

Tato práce se zabývá realizací dema 3D skeneru a jeho možností jeho využitím pro sběr dat při aditivní výrobě. Tato práce navazuje na samostatný projekt, jehož původním cílem bylo zprovoznění a využití laserového profilometru pro skenování zubů. Během řešení projektu také vznikl požadavek, aby skript pro řízení skeneru byl v jazyce Python.

2 - Teoretická část

2.1 - Průmysl 4.0

Když se mluví o Průmyslu 4.0 někdy není zřejmé, zda je řeč přímo o české iniciativě Průmysl 4.0 nebo se jen překládá zahraniční Industrie 4.0, či Industry 4.0. Tyto různé fráze sice sdílí myšlenku a jméno s německou iniciativou z roku 2011, ale jsou mezi nimi určité rozdíly. Další zmatení může působit to, že jak nové technologie vznikají a vyvíjejí se, tak se mění a rozšiřuje rámeček průmyslu 4.0. Proto zde bude krátký přehled jednotlivých termínů.

2.1.1 - Industrie 4.0

Industrie 4.0 je německá „strategická iniciativa“, která byla představena v roce 2011[4] a byla přijata v rámci akčního plánu High-tech Strategie 2020. Stěžejním dokumentem je pak „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ z roku 2013, ve kterém jsou popsány cíle, požadavky a přínosy[5]. Hlavním cílem iniciativy je udržení přední pozice Německa na trhu, především v oblasti výrobního průmyslu, a celkové zvýšení konkurenceschopnosti německých podniků. Mezi vedlejší cíle patří jednak dosažení vyšší efektivity využívání surovin a energií, a to jak z ekonomického tak ekologického důvodu, jednak lepší zvládnutí demografických změn, a nakonec tvorba příležitostí pro nové typy služeb a nové business modely. Ke splnění těchto cílů mají pomoci:

- Duální strategie skládající se jednak z využívání kyberneticko-fyzikálních systémů (CPS) ve výrobě a logistice, a jednak exportu CPS technologií, hotových produktů a souvisejících

služeb, například konzultačních.

- Využívání internetu věcí (IoT) a internetu služeb (IoS) v průmyslu
- Horizontální integrace neboli „integrace IT systémů využívaných v odlišných fázích procesů, jež se zabývají výměnou materiálů, energií a informací jak uvnitř firmy tak i mezi různými firmami“
- Vertikální integrace neboli „integrace IT systémů využívaných na odlišných hierarchických vrstvách (senzor, aktuátor, řídicí systém, řízení výroby, podnikové plánování, atd.)“
- “Komplexní inženýring napříč celým hodnotovým řetězcem” [6]

Součástí doporučení od pracovní skupiny Industrie 4.0 je také vytvoření nových pracovních skupin, z nichž každá se bude zabývat jednou z následujících prioritních oblastí [5].

- Standardizace, tvorba referenční architektury a začlenění existujících standardů do referenční architektury
- Vylepšení komunikační architektury
- Správa komplexních systémů s využitím modelování
- Bezpečnost
- Profesní vzdělávání
- Organizace práce
- Právní regulace
- Účinné využívání zdrojů a energií

2.1.2 - Iniciativa Průmysl 4.0

Iniciativa Průmysl 4.0 zpracovaná Ministerstvem průmyslu a obchodu byla schválena 24. srpna 2016 vládou ČR a stejnojmenný dokument byl publikován 2. září [7]. Navazuje na Národní iniciativu Průmysl 4.0 [8], stručný dokument vydaný v září 2015. Celkový cíl iniciativy je podobný jako u německého protějšku, tedy udržení konkurenceschopnosti místního průmyslu. Cílem dokumentu je pak přimět průmysl a odpovídají resorty k vypracování akčních plánů. K naplnění cílů by pak mělo pomoci:

- Zvýšení profesní mobility
- Přejít od relativně levné práce k dražší, modernější a více kvalifikované práci s vyšší přidanou hodnotou
- Rozvoj digitální ekonomiky a digitalizace
- Vytvoření sítě Národních center zaměřených na vybrané oblasti aplikovaného výzkumu

Kapitoly dokumentu se zabývají:

- Situací průmyslu v ČR
- Technologickými předpoklady
- Požadavky na aplikovaný výzkum
- Bezpečností systémů
- Standardizací
- Právní regulací
- Zaměstnaností a pracovní kvalifikací
- Vzděláváním
- Efektivitou využívání zdrojů
- Investicemi na podporu Průmyslu 4.0

V nich je analyzován současný stav a možnosti dalšího vývoje.

Celý dokument je inspirován německým Industrie 4.0, což je vidět také na podobnosti kapitol s prioritními oblastmi Industrie 4.0. Avšak místo na hypotetické scénáře s přínosy je zde důraz kladen spíše na celkovou připravenost na změny, a to nejen v průmyslu. Tomu napovídá zmiňování vícera ukazatelů připravenosti, např. “Roland Berger Industry 4.0 Readiness Index”, “Networked readiness index” či definice pěti úrovní digitální zralosti firmy. Průmysl 4.0 je zde ztotožňován se čtvrtou průmyslovou revolucí. Možná proto je zde vnímán v širším kontextu a je spojován i s technologiemi, se kterými dříve Industrie 4.0 spojováno nebylo.

2.1.3 - Průmysl 4.0 obecně

Pomineme-li názvy konkrétních iniciativ, pak jsou termíny Průmysl 4.0, Industrie 4.0, Industry 4.0 a možná další místní varianty synonyma. Dále v textu už bude používán pouze termín Průmysl 4.0. Samotná jeho definice není vůbec jednoznačná, o čemž svědčí to, že existuje téměř 100 různých definic, mezi nimiž jsou určité rozdíly[9]. To přispívá k jistému zmatení.

McKinsey definuje Průmysl 4.0 následovně: “Další fáze digitalizace výrobního sektoru poháněná čtyřmi disruptivními technologiemi, kterými jsou: velký nárůst objemů dat, výpočetních výkonů a konektivity, obzvláště nové low power WAN; vznik nových možností analytiky a business intelligence; nové druhy rozhraní člověk-stroj (HMI), jako například dotyková rozhraní a systémy rozšířené reality; zlepšení přenosu digitálních instrukcí do fyzického světa například díky pokročilé robotice či 3D tisku.”[10](překlad vlastní)

Jako jinou definici lze uvést například: “Termín Průmysl 4.0, poprvé použit Německou vládou, popisuje a zahrnuje sadu technologických změn ve výrobě, a vytyčuje priority koherentního politického rámce s cílem udržení globální konkurenceschopnosti Obecně Průmysl 4.0 označuje prostředky automatizace a výměny dat ve výrobních technologiích včetně CPS, IoT, velkých dat a analytiky, rozšířené reality, aditivní výroby, simulací, horizontální a vertikální systémové integrace, autonomních robotů a cloud computing.”[11](překlad vlastní)

Podle Siemens je Průmysl 4.0 “koncept pocházející z Německa, který daty řízené a umělou inteligencí poháněné, síťově propojené chytré továrny často popisuje jako předzvěst čtvrté průmyslové revoluce. Tato předvídaná změna ve výrobních procesech a technologiích vychází z těchto klíčových principů: Všudypřítomné síťové propojení lidí, strojů a věcí ve fyzickém a virtuálním světě; Využívání dat ke zlepšování výrobní efektivity a flexibility za pomoci nástrojů na odkrývání hodnoty dat; Zvyšování kvality produktů a rychlosti uvádění na trh díky předvýrobnímu virtuálnímu testování;

Plánování, produkce, výroba a údržby je řízena na základě dat a za využití umělé inteligence.”[12] (překlad vlastní)

Obecně se dá říci, že Průmysl 4.0, někdy také nazýván průmyslovým internetem věcí (IIoT)[13] či čtvrtá průmyslová revoluce[4,7,9,13] , označuje neurčitý koncept v jehož jádru je zavádění nových technologií do průmyslu. Jedná se především o ty technologie, které byly zmíněny v druhé definici.

Ztělesněním konceptu se dá nazvat “chytrá továrna”, která místo centrálního řízení využívá decentralizovanou síť vzájemně komunikujících téměř samostatných strojů. Přičemž instrukce pro výrobu si s sebou nese samotný výrobek a jeho části. Její další rysy jsou: optimalizované výrobní procesy díky horizontální a vertikální integraci, využívání virtuálních návrhů místo fyzických prototypů, umožnění individualizované výroby, samooptimalizace a konfigurace podle zpracovávaného výrobku, a automaticky přizpůsobovaná logistika na základě potřeb výroby [7].

Některé prvky Průmyslu 4.0 pronikly za hranice průmyslu do konceptů jako jsou chytré město, inteligentní síť, chytrá domácnost, chytrá mobilita a podobně. Kromě nových technologií jsou s Průmyslem 4.0 spojovány také nové business modely, které je možné charakterizovat pomocí vzorů viz tabulka 1 . Takovým business modelem je například využívání IoT k poskytování služby vzdáleného monitorování a prediktivní údržby, poskytování poradenských služeb na základě znalostí získaných analýzou nasbíraných provozních dat nebo e-shop přímo napojený na chytrou továrnu umožňující rychlou zakázkovou výrobu.

Tabulka 1 - Vzory business modelů pro Průmysl 4.0, převzato z [14](překlad vlastní)

Nadvzory	Podvzory			
Integrace	Crowdsourcované inovace	Výroba jako služba	Masová Kustomizace	
Servitizace	Doživotní partnerství		Produkt jako služba	Výsledek jako služba
Expertizace	Poradenství související s produktem	Poradenství související s procesem	Platformizace související s produktem	Platformizace související s procesem

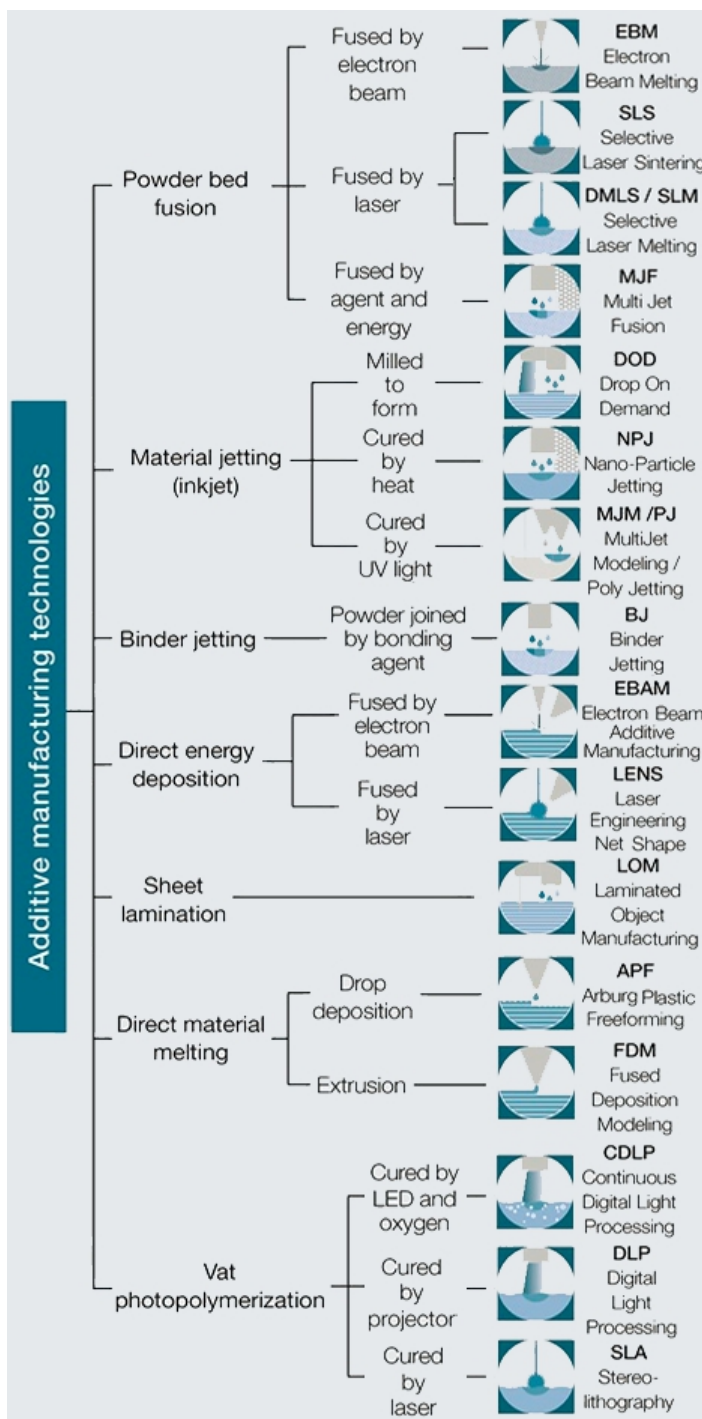
2.2 - Aditivní výroba

Podle zadání má být demo navrženo pro využití při aditivní výrobě. Pro doplnění je zde uvedeno pár informací o principu a metodách aditivní výroby, a způsobech kontroly či monitoringu jejího průběhu a výsledků.

Aditivní výroba je řada různých výrobních metod a technologií specifických tím, že jsou při nich trojrozměrné předměty tvořeny z vrstev spojeného materiálu. Často je tento termín zaměnitelný s 3D tiskem, ale někteří nesouhlasí. Například podle Zelinského[15] 3D tisk označuje pouze samotný proces výroby, zatímco aditivní výroba zahrnuje i návrh podpůrných struktur, postprocessing a procesní kontrola pro zajištění opakovatelnosti. Další rozdíl je, že termín aditivní výroba se častěji používá v případě výroby z kovů a v průmyslové sféře, zatímco 3D tisk spíše u polymerů a mezi spotřebiteli.

Mezi hlavní výhody aditivní výroby patří možnost výroby objektů s téměř libovolně složitou geometrií, včetně vnitřní struktury, bez potřeby speciálního obrábění; úspora materiálu; rychlost tvorby prototypu, a nízká cena výroby jednotlivých kusů nebo malých dávek.

Nejrozšířenější technologií aditivní výroby je stále Fused Deposition Modeling (FDM), která je rozšířená hlavně mezi stolními tiskárnami pro hobby uživatele. Obliba a dostupnost tohoto typu tiskáren se rozrostla po vzniku open-source tiskárny RepRap. Dalšími často používanými technologiemi jsou Stereolitografie (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (DMLS/SLM) a PolyJet. FDM je založeno na postupném vytlačování roztaveného materiálu, obvykle termoplastu, tryskou, která se pohybuje po třech osách viz obrázek 2. U tohoto typu výroby často dochází ke smršťování roztaveného materiálu vlivem chladnutí. Pokud není smršťování rovnoměrné, dochází pak k deformacím a k praskání materiálu vlivem působení vnitřního pnutí. Tomu se obvykle předchází zajištěním stálé okolní teploty

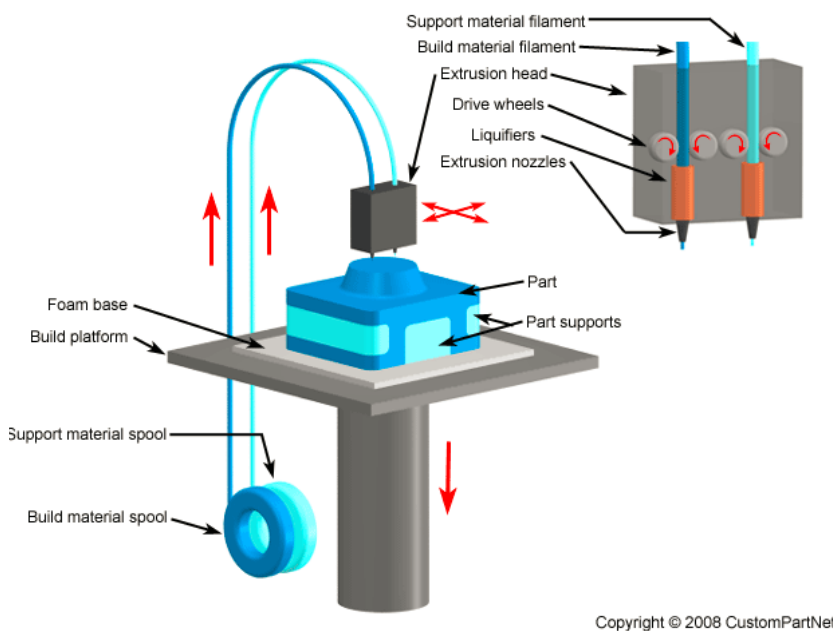


Obrázek 1 - Přehled technologií aditivní výroby, převzato z [16](upraveno)

vyhřívánou podložkou nebo komorou. V případě rovnoměrného smršťování jeho míra závisí použitým materiálu a lze ji kompenzovat patřičným zvětšením rozměrů.

Někdy jsou kladeny požadavky na kvalitu povrchu či vnitřku materiálu. V zájmu zlepšení mechanických vlastností vzniká potřeba omezit pórovitost při výrobě z kovového prášku. Jindy mohou být stanoveny požadavky na dodržení geometrických tolerancí, například u výroby protézy uzpůsobené pro konkrétního pacienta, nebo je při výrobě větší množství kusů potřeba zajistit konzistenci jejich rozměrů. V takových případech má smysl použít systém pro kontrolu a řízení procesu výroby. Dalším důvodem pro jeho využití může být snížení potřeby či rozsahu následného opracování výrobku a s tím spojených nákladů.

U technologií výroby z kovů (PBF a DED) se pro kontrolu využívají jednak bezkontaktní snímače teploty, protože rovnoměrné rozložení tepla v tavné lázni vede k lepší kvalitě výroby, jednak ToF čidla pro měření výšky vrstvy, a jednak klasické kamery, jejichž obraz je zpracováván a vyhodnocován[17].



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obrázek 2 - Princip technologie FDM, převzato z [18]

Výzkumem v této oblasti se zabývá například Additive Manufacturing Metrology Testbed spadající pod Ministerstvo obchodu Spojených států amerických[19]. Jako příklad komerčních tiskáren s kontrolou procesu výroby lze uvést [20].

Systémy pro kontrolu a řízení procesu výroby se ovšem používají i při aditivní výrobě z nekovových materiálů, u technologií založených na fotopolymerizaci je celá řada metod (snímání teploty, interferometrie, ultrazvukové ToF, atd.) kontroly procesu[21]. U FDM se kontroluje jednak teplota pomocí termokamer, a jednak detekcí tvaru jednotlivých vrstev pomocí strojového vidění a jejich statistické zpracování[22]. Někdy se kontrola využívá i u méně obvyklých materiálů, například [23] se zabývá detekcí chyb a poskytováním zpětnou vazbou při tisku z betonu pomocí 1D ToF čidla.

2.3 - Digitální dvojče

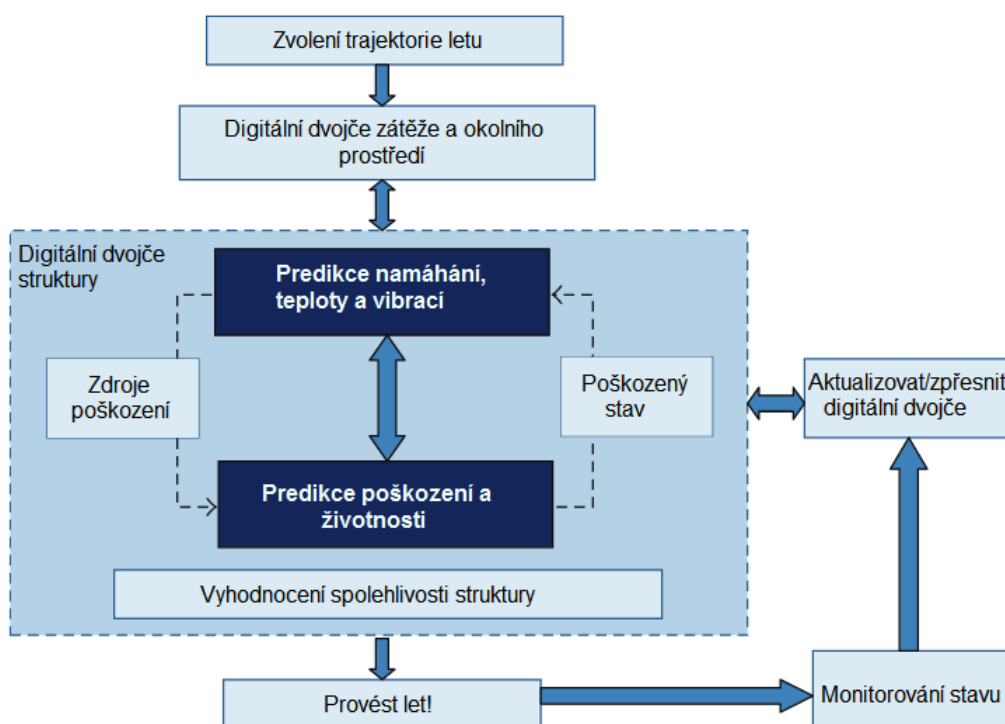
Existuje více různých definic termínu „digitální dvojče“, například definice podle Siemens zní: „Digitální dvojče je virtuální reprezentace fyzického produktu nebo procesu využívaná k pochopení a predikci výkonových charakteristik fyzického protějšku.“[24](překlad vlastní) Tato definice byla

vybrána, protože Siemens je jedním z propagátorů Průmyslu 4.0[25,26,27] a jejich Siemens Digital Industries Software poskytuje uživatelům nástroje, s pomocí kterých lze tvořit digitální dvojčata. [28,29] Jako další definici lze uvést: „Digitální dvojčata jsou virtuální repliky fyzických zařízení, které datoví vědci a IT profesionálové mohou použít k testování a simulacím ještě předtím, než je reálné zařízení skutečně postaveno a nasazeno do oběhu.“ [30]

2.3.1 - Historie

Samotný termín „digitální dvojče“ byl poprvé použit v roce 1998 v populárně vědeckém časopisu *Scientific American*, ale tehdy se jednalo o „dvojče“ herce Alana Aldy. [31] V dnešním slova smyslu se termín objevil až v roce 2011 v článku časopisu *International Journal of Aerospace Engineering*. [32]

Ve výše zmíněném článku je popsán hypotetický scénář, ve kterém Americké letectvo nakoupilo nové letadlo spolu s jeho digitálním dvojčetem. To je představeno jako hierarchický model s realistickými geometrickými a materiálovými detaily. Do modelu vstupují data o vnějším prostředí, zátěži atd. Model umožňuje simulovat provoz letadla a na základě výsledků odhalit pravděpodobné poruchy. Během skutečného provozu jsou sbírána data ze senzorů, a na základě jejich statistického vyhodnocení je aktualizován model. Výstupem modelu je predikované opotřebení jednotlivých částí a zbývající životnost. Jednou ze zmíněných motivací pro využití digitálního dvojčete bylo sjednocení více různých modelů do jedné struktury. V článku byla činnost digitálního dvojčete znázorněna následujícím schématem.



Obrázek 3-Schéma digitálního dvojčete pro predikci poškození.[32](překlad vlastní)

Avšak myšlenka, podobná digitálnímu dvojčeti, vznikla již dříve. Toho využila už NASA, během záchrany posádky Apollo 13. Nejednalo se sice o digitální model, nýbrž o fyzickou repliku celého stroje v životní velikosti. Přesto však obsahovala veškeré systémy a vybavení jako její předloha, a umožnila týmu vědců a inženýrů provést „simulace“, které pak pomohly vyřešit problém s rostoucí hladinou CO₂ v lunárním modulu.[33]

Model bližší současné představě o digitálním dvojčeti, kde fyzickému systému odpovídá virtuální systém a mezi nimi dochází k výměně informací, představil Grieves v roce 2002. Bylo to na Michiganské univerzitě během prezentace týkající se plánovaného založení vývojového konsorcia pro PLM (product lifecycle management, česky: řízení životního cyklu výrobku). Původně byl model označován pouze jako „Conceptual Ideal for PLM“, pak jako „Mirrored Spaces Model“ a nakonec jako „Information Mirroring Model“.[34]

2.4 - 3D Skenery

3D skener je zařízení ke snímání informací o rozměrech, tvaru, případně i barvě předmětu či prostředí, a jejich ukládání v digitální podobě. Skenery nachází uplatnění například v metrologii, při kontrole kvality, v reverzním inženýrství k vytváření CAD modelů nebo u simulací, ve kterých záleží na přesném tvaru objektu. V souvislosti s digitálními dvojčaty bývá 3D skenování využíváno při počítačové tvorbě modelu budov, strojů či jiných objektů, před tím než jsou do modelu zapojena data z jiných senzorů. Takový model nachází uplatnění také při plánování demolice[35].

Skenery se obvykle dělí do kategorií kontaktní a bezkontaktní, přičemž bezkontaktní se dále dělí na aktivní a pasivní.

2.4.1 - Kontaktní skenery

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) snímají rozměry pomocí sondy, která se pohybuje po třech navzájem kolmých osách. Při aktivaci sondy, v případě mechanické sondy při doteku, snímač přečte výchylku v dané ose vůči referenčnímu bodu. Typ sondy mnohdy souvisí se způsobem ovládní, při ručním ovládní se používá obvykle mechanická, zatímco při CNC/DNC se používá spíše optická[36]. Tento typ skenerů je nejčastěji využíván ve strojírenství, přesnost bývá typicky v řádu mikrometrů[37], ve srovnání s ostatními typy je pomalejší a při doteku může dojít k deformaci měřeného objektu. Kvůli obecně nižší rychlosti skenu, se jako zdroj dat pro digitální dvojčata spíše nehodí. Strojů existují dva hlavní typy: stolní a přenosné.

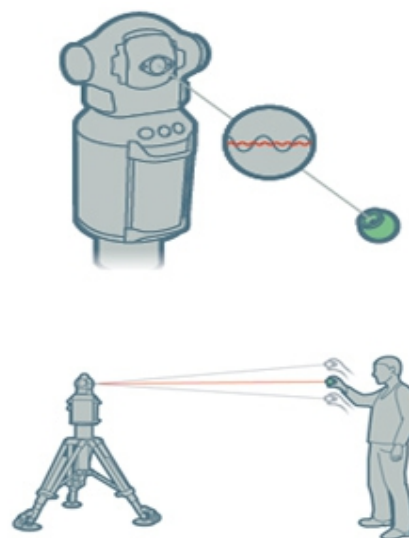


Obrázek 4 - Stolní CMM, převzato z [38]



Obrázek 5 - Přenosný CMM, převzato z [39]

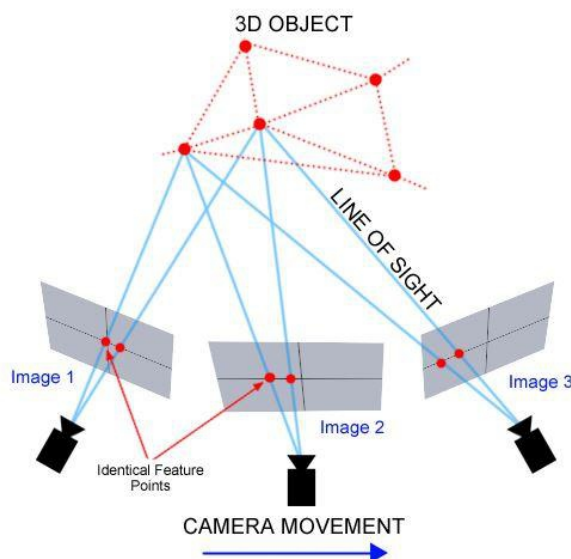
Laserový sledovač (tracker) snímá polohu jednotlivých bodů tak, že průběžně sleduje “sféricky montovaný koutový odražeč”(SMR)[40], který zde slouží jako ruční kontaktní sonda. Používají se i jiné typy odražečů, které umožňují například lepší měření hran. Změření současné pozice sondy obsluha aktivuje vzdáleně. V průběhu snímání musí být odražeč nasměrován na hlavici sledovače. Hlavice se otáčí ve dvou osách a měří se vzdálenost odražeče, a to buď inkrementálně pomocí interferometru, nebo absolutně pomocí time-of-flight metody. Maximální měřicí rozsah se pohybuje mezi 60 až 120 metry, a při vzdálenosti v řádu desítek metrů je přesnost mezi 5 až 25 mikrometry [40,41]. Tento skener se může hodit při vytváření digitálního dvojčete rozměrnějších předmětů, u kterých je však potřeba zachovat dostatečnou úroveň detailů.



Obrázek6 - Nástin funkce sledovače, převzato z [41]

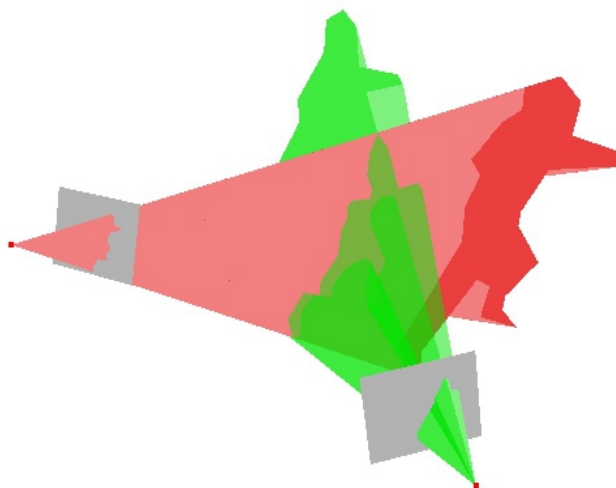
2.4.2 - Bezkontaktní pasivní skenery

Možná nejpoužívanější metodou pasivního skenu je **fotogrammetrie**, také nazývaná “structure from motion”. Po nasnímání velkého množství fotografií skenovaného objektu z různých úhlů se na základě hledání společných bodů mezi více fotografiemi určí pozice a úhly ze kterých byly fotografie pořízeny. Se znalostí o pozicích a úhlech lze pak vypočítat 3D souřadnice bodů. Přesnost závisí na kvalitě a rozlišení použitého fotoaparátu.



Obrázek 7- Princip fotogrammetrie, převzato z [42]

Další metodou je snímání tvaru **podle siluety** (anglicky shape from silhouette). U této metody je snímán obraz objektu obvykle proti kontrastnímu pozadí. Pomocí prahování je obraz segmentován, a je následně vypočítána kontura objektu. Na základě parametrů kamery se z kontury vytvoří zobecněný kužel. Toto se opakuje pro různá otočení objektu. Výsledný 3D objekt se pak získá průnikem dílčích kuželů. Tato metoda nedokáže snímat konkávní části objektů. Kvůli tomuto nedostatku se pro skenování při aditivní výrobě nehodí. Obecně se jedná o méně přesnou metodu.



Obrázek 8 - Princip tvorby 3D modelu ze siluety, převzato z [43]

2.4.3 - Bezkontaktní aktivní skenery

Tyto skenery získávají informace o tvaru objektů tak, že vysílají signál, ať už optický, akustický, magnetický či jiný, a snímají odrazy nebo absorpci.

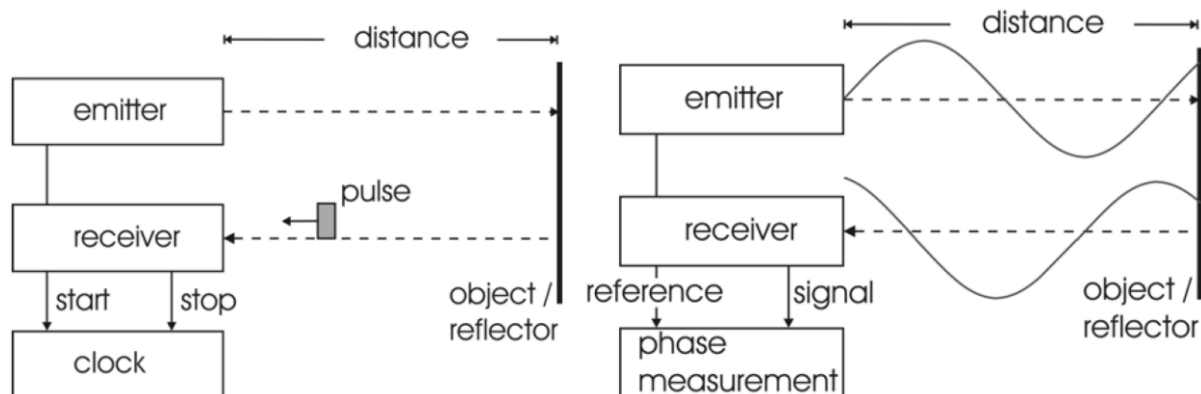
Time-of-Flight (ToF) skenery pracuje na principu měření doby mezi vysláním a přijetím odraženého signálu, přičemž vzdálenost měřeného objektu d se vypočítá podle vzorce

$$d = \frac{c * (t_2 - t_1)}{2},$$

kde t_1 je čas vyslání a t_2 je čas přijetí signálu. Přesnost měření vzdálenosti tak přímo závisí na přesnosti a rozlišení měření času. Jako zdroj signálu se často využívá světlo či laser, ale mikrovlny[44] a ultrazvuk[45] se také používají. U běžně dostupných laserových dálkoměrů se dosah pohybuje od stovek metrů, u speciálních až po +100 km [46]. U 3D skenerů jsou dosahy kolem desítek či pár set metrů, a některé mají dosah více než 1 km. Rozlišení obvykle bývá 5-10 mm. Kromě ToF skenerů se používají také ToF kamery, které místo postupného měření jednotlivých bodů snímají celou scénu podobně jako běžná kamera. Rozlišení bývá okolo 1cm, ale existují i kamery se sub-milimetrovým rozlišením[47,48]. Protože je nasvíceno a snímáno více bodů současně, je zde riziko vícenásobných odrazů, což pak vede ke změření větší než skutečné vzdálenosti[49]. Díky většímu dosahu a přijatelné přesnosti jsou tyto skenery vhodné pro 3D skeny budov ať už při tvorbě BIM, nebo jako základ digitálního dvojčete budovy.

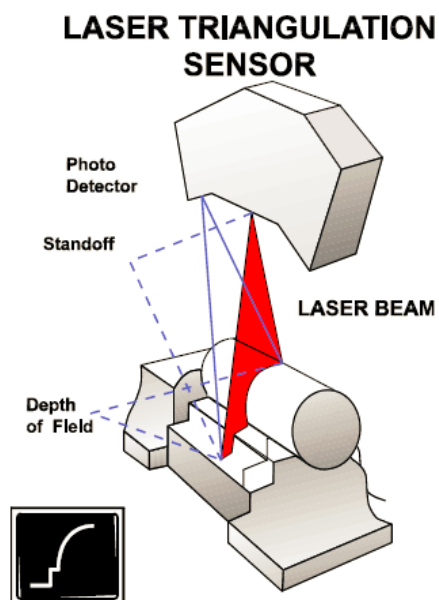
Další typ skenerů měří **fázový posun** mezi přijatým odraženým signálem a referenčním signálem. Někdy je tento typ označován jako CW (continuous wave) ToF. Z fázového posunu následně vypočítá vzdálenost. Maximální jednoznačně měřitelná vzdálenost závisí na vlnové délce použitého měřicího signálu. Po jejím překročení se budou fázové posuny periodicky opakovat. Této se předchází použitím několika různých modulačních frekvencí, přičemž rozlišení závisí na té nejvyšší použité

frekvenci a dosah na té nejnižší. Ve srovnání s ToF metodou je tato rychlejší, má menší dosah, mezi 80 až 120 metry[50], má rozlišení zhruba 1mm[51], a výsledné mračno bodů je zatížené větším šumem[52]. Jejich využití je podobné jako u ToF s tím, že budou spíše využity v interiéru, kde velikost místností je menší než dosah.



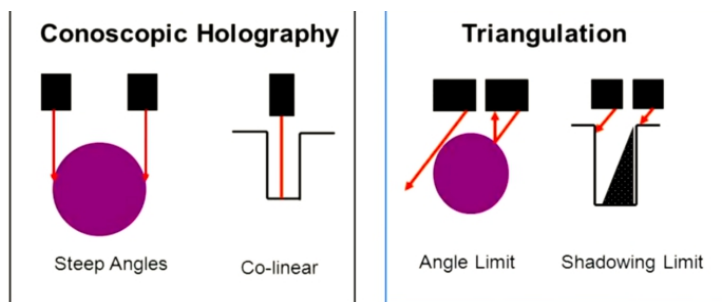
Obrázek 9 - Znázornění funkce ToF a měření fázového posunu, převzato z [53]

Triangulační skenery svítí laserovým bodem nebo pruhem na objekt a sleduje, na kterou část kamery dopadne odraz. Jak už název napovídá, vzdálenost objektu se vypočítá pomocí trojúhelníka, v němž je známá jedna strana (vzdálenost mezi zdrojem laseru a kamerou) a úhel mezi zdrojem laseru a kamerou. Oproti dvěma předchozím metodám obecně mají triangulační skenery menší dosah a měřící rozsah, ale obvykle mají větší přesnost v řádu desítek mikrometrů[54]. Díky tomu nejsou zcela vhodné na sken větších objektů, ale spíše na přesnější sken malých objektů jako jsou například jednotlivé díly stroje. Využívá se například při výstupní kontrole kvality, kde měří celkový tvar výrobku. Nehodí se však na měření hlubokých otvorů kvůli stínům viz obrázek 8.



Obrázek 10 - Nákres triangulačního snímače, převzato z [55]

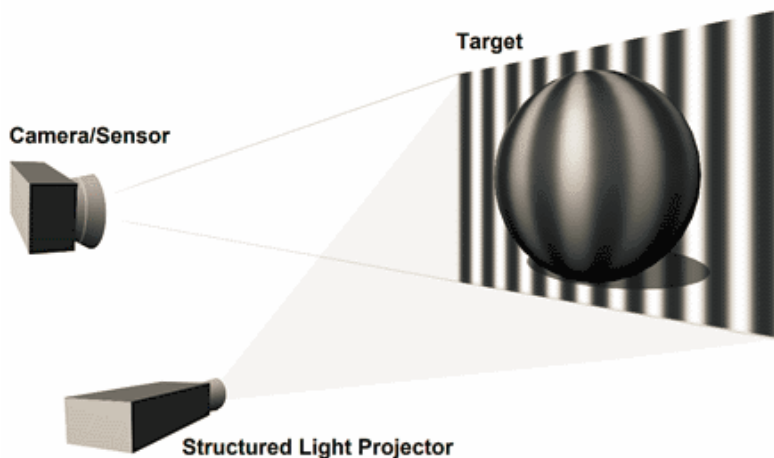
U **konoskopické holografie** se laserový paprsek odráží po stejné trase odkud byl vyslán a prochází skrze konoskopický krystal. Na CCD tak vzniká difrakční obrazec, který je poté analyzován[54]. Umožňuje měřit otvory, které by při měření pomocí triangulace byly zastíněné. Rozdíl je znázorněn na následujícím obrázku:



Obrázek 11 - Porovnání triangulace a konoskopické holografie, převzato z [56]

Ve srovnání s triangulací je tato metoda pomalejší v případě, že je potřeba skenovat celý objekt. To proto, že zde se využívá bodové světlo. Kvůli této vlastnosti bývá skener používán u CMM namísto mechanické sondy. Přesnost závisí na použité čočce, například senzor Optimet ConoPoint 10 HD s 50mm čočkou má přesnost 2,5 μm na měřicím rozsahu 2mm [56]. Z hlediska využití pro digitální dvojče spadá do stejné kategorie jako CMM.

Skenery využívající **strukturované světlo** projektorem promítají na objekt určitým obrazec a sledují deformaci obrazce. Obrazec může být jednorozměrný, například úsečka, nebo dvourozměrný, například řada pruhů. V jednorozměrném případě jde o techniku podobnou triangulaci. Při použití dvourozměrného obrazce je skenování rychlejší, ale je složitější zpracování. Rychlost skenování umožňuje snímání pohybujících se předmětů v reálném čase. Jelikož se využívá bílé světlo, je tato metoda bezpečnější ty, které používají laser. Tyto skenery mohou nasnímat až 16 milionů bodů v jednom skenu a mívají rozlišení okolo 10 μm [57], a v určitých případech i méně než 1 μm [58]. Vzhledem k tomu, že jsou rychlejší, přesnější a bezpečnější než laserová triangulace, často půjde o preferovaný systém. Nevýhodou může být citlivost na okolní osvětlení a problémy při měření pohybujících se objektů. I když existují metody kompenzace vlivu pohybu [59].



Obrázek 12 - Znáznornění funkce snímače strukturovaného světla, převzato z [60]

2.5 - Reprezentace dat získaných 3D skenem

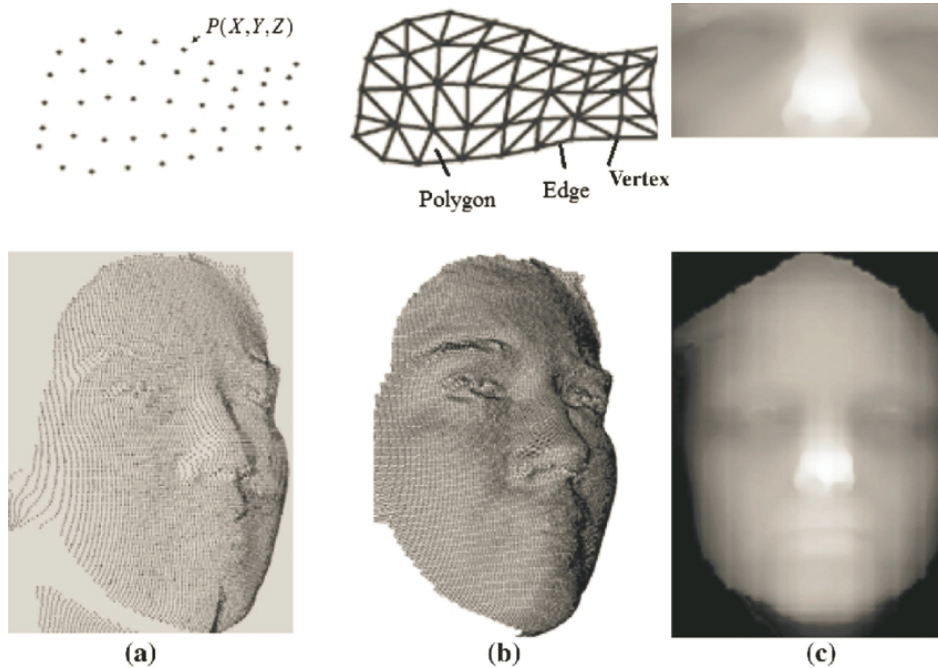
Nejčastějším výstupem z 3D skeneru je mračno bodů (anglicky point cloud). Jde v podstatě o množinu bodů, přičemž každý bod nese informaci o poloze na osách x, y a z kartézské soustavy souřadnic. Kromě toho může obsahovat další informace, kterými často bývá barva nebo normálový vektor. Obarvení bodů se obvykle může lišit podle zamýšleného použití dat. Jednak může barva odpovídat výšce bodu, což využívá se například při zobrazování dat z LIDAR skenu terénu. Dále může barva bodů odpovídat skutečné barvě objektu, kterou některé skenery umožňují snímat. V téměř všech případech použití jsou výstupní mračna bodů dále zpracovávána.

Jedním z hlavních typů operací s mračny bodů jsou filtrace. Jejich účelem je obvykle odstranění šumu a odlehlých hodnot. V programu CloudCompare, který byl při práci použit, jsou dvě filtrační funkce. První je "SOR (statistical outlier removal) filter", který pro každý bod vypočítá průměrnou vzdálenost od nastaveného počtu sousedních bodů, vypočítá směrodatnou odchylku a odstraní body vzdálenější než průměr + nastavený násobek odchylky[61]. Tou druhou je "Noise filter", který lokálně prokládá body rovinou a odstraňuje body, které jsou od ní příliš vzdálené. Rovina se může vypočítávat buď z nastaveného počtu sousedních bodů, nebo ze všech bodů ležících uvnitř sféry nastavené velikosti kolem daného bodu[62].

Během skenu se obvykle nasbírá velké množství dat, a někdy může mračno obsahovat i miliardy bodů. Proto je užitečnou operací decimace, tedy odstranění některých bodů. Konkrétních metod je opět více, u jednoho typu se odstraňují náhodně navzorkované body, u jiného se body uvnitř krychle dané velikosti nahrazují průměrem. Další důležitou operací je registrace, tedy zarovnání dvou mračen tak, že se korespondující body pokud možno překrývají. Hojně používaný je algoritmus iterativní nejbližší body (ICP), u kterého je jedno mračno bodů označeno jako cílové a druhé jako zdrojové. Zdrojové mračno je iterativně transformováno tak, aby se minimalizovala vzdálenost od zdrojového mračna k cílovému[63]. Existují i varianty algoritmu, které kromě pouze souřadnic bodů hledají odpovídající body také podle barvy bodu.

Pro některá použití, například v CAD systémech je výhodné reprezentovat 3D objekt jako polygonovou síť (mesh), která se kromě bodů skládá také z ploch a hran. Povrchy jsou často složeny z trojúhelníků, ale někdy i čtyřúhelníků či jiných polygonů. Síť lze z mračna bodů vytvořit některou z metod rekonstrukce povrchu, kterými jsou například Ball-Pivoting algoritmus, nebo Poissonova rekonstrukce. Pokud je cílem 3D tisk na základě naskenovaných dat, síť lze exportovat ve formátu, který slicer dokáže zpracovat.

Posledním typem reprezentace, který zde bude zmíněn, je hloubkový obrázek, nebo také hloubková mapa. U tohoto typu obrázku jde o to, že barva každého pixelu přímo závisí na vzdálenosti odpovídajícího bodu od snímače. Obrázek může být buď barevný nebo ve stupních šedi. Zdrojem těchto obrázků je často ToF kamera.



Obrázek 13 - Porovnání některých způsobů reprezentace dat, převzato z [64]

Aby bylo možné data ze skenu importovat do CAD nástroje, data musí být uložena u určitém formátu. Například ReCap od firmy Autodesk podporuje formáty LAS, XYB, FLS, FWS, XYZ, TXT, ASC, PTG, PTS, PTX, CLR, and CL3. Formáty lze rozdělit na binární a ASCII, přičemž řada z nich podporuje obě možnosti. Binární formáty, jako jsou FLS nebo LAS, jsou kompaktnější a jejich zpracování je rychlejší. Nevýhodou může být nečitelnost bez speciálního nástroje. ASCII formáty jsou naopak lidsky čitelné, ale jsou větší a jejich zpracování je pomalejší vlivem nutnosti sekvenčního čtení. V práci jsou výstupní mračna bodů ukádána ve formátu PCD. Tento formát byl vytvořen pro použití s knihovnou PCL (Point Cloud Library), a podporuje jak binární ukládání tak ASCII. V tomto formátu může být uloženo jak neorganizované mračno bodů, kde všechny body jsou uloženy v jednorozměrném poli, při čemž na jejich pořadí nezáleží, tak i organizované, kdy body jsou uloženy v matici tak, že body mezi jejichž souřadnicemi je malá vzdálenost jsou si v matici blízko. To umožňuje vyšší efektivitu operací, které využívají sousedních bodů. Obsah souboru PCD může vypadat následovně:

```

VERSION .7
FIELDS x y z normal_x normal_y normal_z
SIZE 4 4 4 4 4 4
TYPE F F F F F F
COUNT 1 1 1 1 1 1
WIDTH 72765
HEIGHT 1
VIEWPOINT 0 0 0 1 0 0 0
POINTS 72765
DATA ascii
1.39161568e+03 8.75530374e+01 1.39917163e+04 0.99802673 0.06279052 0.00000000
1.31034353e+03 8.24398273e+01 1.39898369e+04 0.19192033 0.01207460 0.98133623
1.28108090e+03 8.05987785e+01 1.40134192e+04 0.91723703 0.05770766 -0.39413963
1.35137130e+03 8.50210756e+01 1.40856941e+04 0.85980107 0.05409410 -0.50775579
1.34364519e+03 8.45349898e+01 1.41197809e+04 0.91523975 0.05758200 0.39877376
1.32426057e+03 8.33154130e+01 1.41481632e+04 0.96666973 0.06081770 0.24869828
1.32640071e+03 8.34500595e+01 1.41870741e+04 0.44706702 0.02812707 -0.89405814

```

, kde size je velikost v bytech, type je datový typ (v tomto případě float), a width a height jsou rozměry matice, v případě organizovaného mračna. Jiné formáty uchovávají ještě další informace, jako například informace z GPS, čas, klasifikaci bodů, parametry konkrétního skeneru atd. Tyto informace jsou často vázány na typ a výrobce skeneru.

3 - Praktická část

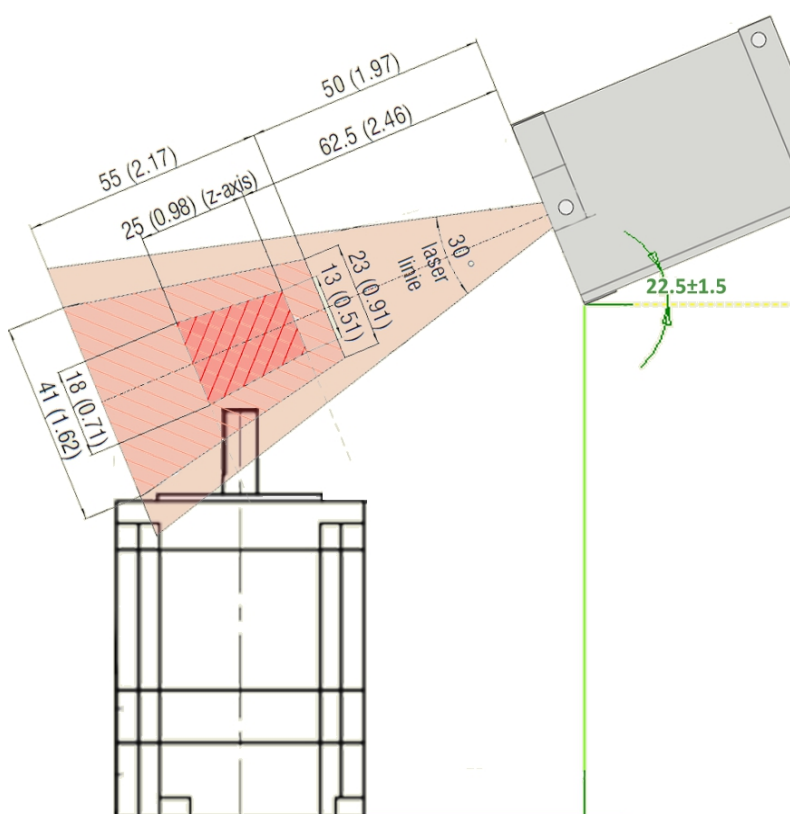
3.1 - Návrh experimentu

Pro ověření celkové funkce a použitelnosti profilometru jako zdroje dat digitálního dvojčete je zapotřebí provést několik skenů různých objektů, včetně pár vzorků vyrobených pomocí aditivní výroby. Přesnost skeneru se pak ověří jednak porovnáním skenerem naměřených rozměrů vůči referenčním, v případě přesně vyrobeného vzorku, a jednak porovnáním skenerem naměřených rozměrů s mikrometrem změřenými, v případě 3D vytisknutých vzorků. V případě přesně vyrobených vzorků bude skener považován za přesný, pokud se bude maximální rozdíl mezi naměřeným a referenčním rozměrem menší než nejistota měření skenerem. V druhém případě bude považován za přesný, pokud bude rozdíl mezi rozměrem změřeným mikrometrem a změřeným skenerem menší než součet nejistot mikrometru a skeneru.

Během skenu objektem otáčí krokový motor. Rozmístění snímače a motoru, na obrázku 14, je podobné jako bývá u běžně dostupných stolních 3d skenerů.

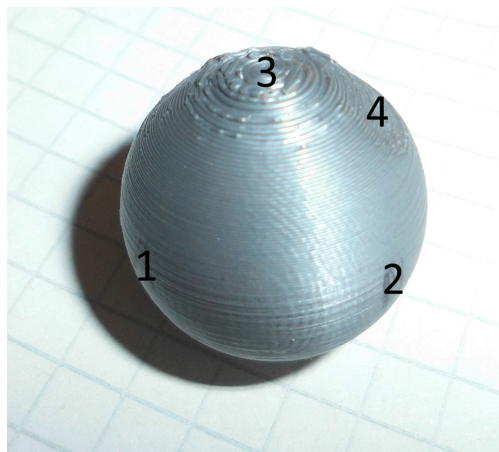
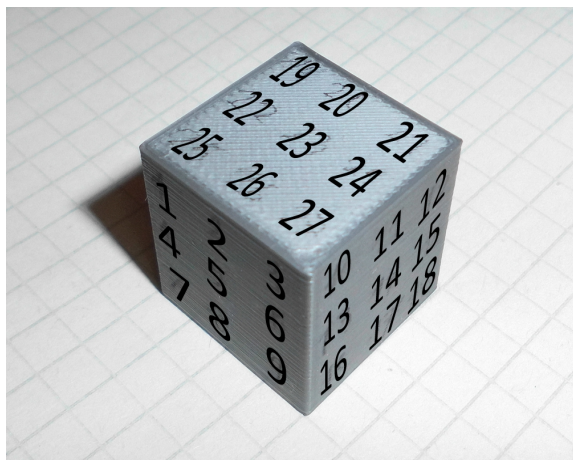
Při jednom měření byla u 3D vytisknuté kostky s délkou strany 2 cm, na označených místech mikrometrem změřena tloušťka, a poté se mračno bodů získané skenem rozdělilo na výřezy odpovídající označeným místům. Pak byla v CloudCompare pomocí funkce na výpočet vzdálenosti dvou mračen bodů zjištěna vzdálenost jedné poloviny výřezu od druhé a obráceně, protože tyto vzdálenosti se liší dle toho, které mračno bodů je referenční.

Podobným způsobem byla měřena 3D vytisknutá kulička s průměrem 2 cm, avšak s tím rozdílem, že byla ve srovnání s kostkou měřena v méně různých bodech.



Obrázek 14 - Umístění snímače a motoru během skenu, část obrázku je z [65] a část z [66]

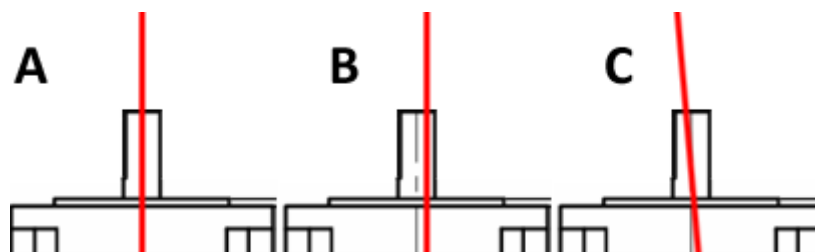
Dále byla naskenována mince 10 Kč, aby se ověřilo, zda mikrokrokování motoru zajistí vysoký detail skenu. A nakonec byla naskenována napodobeninu zubu, protože při dřívějších skenech skutečného zubu obsahovalo výsledné mračno bodů chyby vlivem odlesků a protože v současnosti nebyl k dispozici skutečný zub na naskenování.



Obrázek 15- Kostka s vyznačenými body měření

Obrázek 16- Kulička s vyznačenými body měření

Pozice snímače musí být taková, že rovina laseru prochází osou otáčení motoru, v opačném případě by vznikaly další chyby, jejichž kompenzace není součástí řídicího programu.



Obrázek 17 - Možné pozice laseru vůči motoru, A je správná pozice, B a C jsou špatné, využita část [66]

3.2 - Popis a zapojení hardwaru, komunikace s řadičem motoru a jednotkou skeneru

Během práce byl použit laserový profilový snímač scanControl LLT 2800-25. Tento typ byl prodáván německou firmou Micro-Epsilon v letech 2003-2015 [67]. Jeho hlavní parametry jsou zde v tabulce 2.

Tabulka 2 - Parametry z dokumentace profilometru[65]

Model		LLT28x0-25	
Standard measurement ranges, typical values ($\pm 5\%$) for extended measurement range in brackets			
Measurement range, z axis	Reference distance, midrange	25 (55) mm	75 (82.5) mm (MR)
Start of measurement range	End of measurement range	62.5 (50) mm (SMR)	87.5 (105) mm (EMR)
Resolution z axis ¹	Linearity z axis (3σ) ¹	0.04 % 10 μm	0.2 % 50 μm
Measurement range x axis		13 (23) mm at SMR	18 (41) mm at EMR
Aperture angle of the laser line		30 °	
Resolution x axis		256 / 512 / 1024 ² , optional 64 / 128 points/profile	
Linearity x axis (3σ) ¹ 0.4 %		60 μm at SMR	80 μm at EMR
Profile frequency (profiles/second)		up to 1000 profiles/s (optional up to 4000 profiles/s)	
Measurement rate (measuring points / s)		up to 256.000 measuring points / s	
Light source		Laser diode 655 nm, 15 mW (optional 50 mW)	
Laser class (EN 60825-1)		Class 2M (optional: 3B)	
Sensor dimension (without cable)	LxWxH, mm	109 x 64 x 44	
Sensor weight (without cable)		350 g	
Sensor connecting cable, standard lenght		2 m	
Controller dimensions (without connectors)	LxWxH, mm	278 x 187 x 107	
Controller weight (without cable)		3.5 kg	
Interfaces			
Serial (measurements and control commands)		3x IEEE 1394 („FireWire“), 400 MBit/s, DCAM 1.30 Standard RS232 / RS422; 115.200 Baud	
Switching signals			
Digital inputs ⁴		Sync-In, Remote Laser ON/OFF, User mode, Encoder	
Digital outputs ⁴		Sync-Out, error, user mode (2x)	
Power supply		24 VDC $\pm 15\%$; 0.5 A	

1) For standard measurement range, slight displacement of the measuring field possible (depends on sensor)

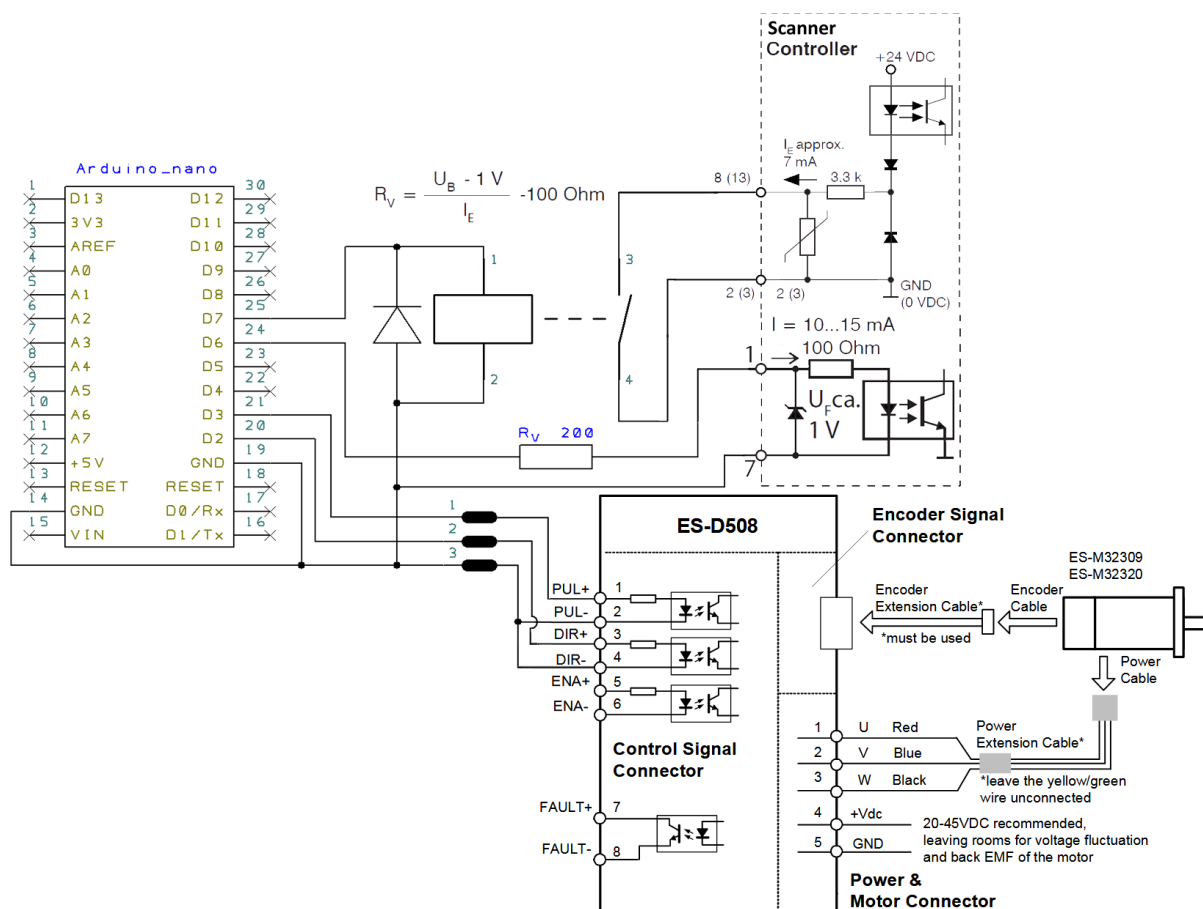
2) 1024 points per profile with extended measurement range and 128,000 points/s (optional 256,000 points/s) only.

4) Preassigned, other functions possible, for example encoder.

Snímač pracuje na principu triangulace, a podle dokumentace má rozlišení měřené vzdálenosti 10 μm . Toto rozlišení však platí při standardním měřicím rozsahu, zatímco při snímání používám plný rozsah u kterého je možné použít velikost profilu 1024 bodů. Podle dokumentace pro plný rozsah platí, že na jeho okrajích roste nepřesnost měření.

Při skenování byl použit krokový motor “ES-M32309 Easy Servo Motor“, který je ovládán řadičem “ES-D508 - easy servo driver“. Motor má základní úhel kroku 1.2°, ale je současně vybaven enkodérem s rozlišením 1000, takže umožňuje i menší krok. Řadič lze připojit k počítači a v softwaru ProTuner je možné nastavit počet kroků v jedné otáčce až na 51200.

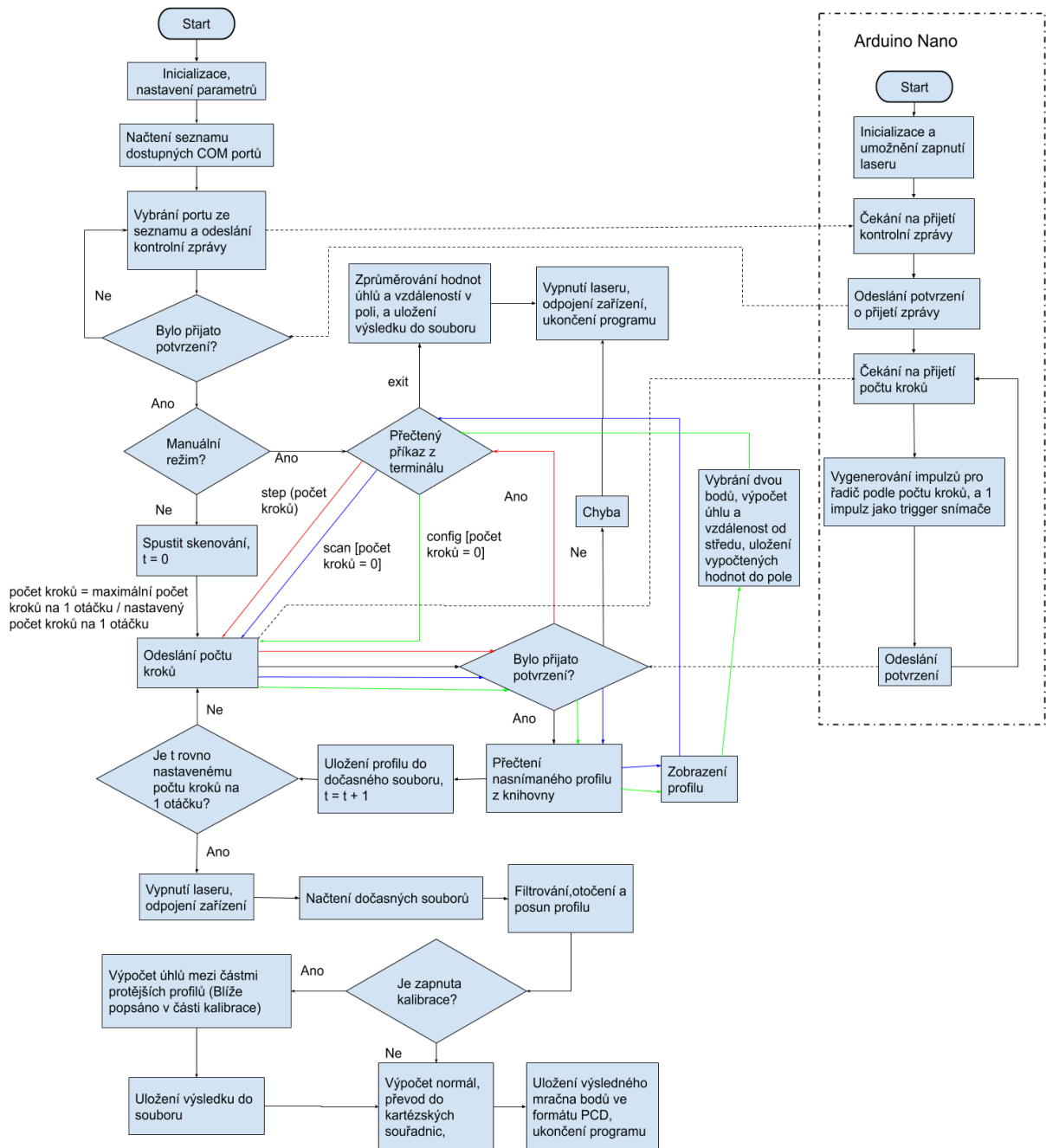
Jako zdroj impulzů pro řadič krokového motoru a trigger snímače byla použita deska Arduino Nano, kterému byly z programu v Pythonu zasílány příkazy s využitím knihovny pySerial. Nastavení sériového portu bylo ponecháno výchozí, tedy rychlost 9600 Baudů, 8 datových bitů, 1 stop bit a žádná parita. Zapojení Arduino k řadiči motoru a ke kontroleru profilometru je následující:



Obrázek 18 - Schéma zapojení, části převzaty z [65] a [68]

Pro komunikaci s jednotkou skeneru byla využita knihovna lltdevice.dll, i když z ní byl použit pouze .NET wrapper pro knihovnu llt.dll. Původně z této knihovny byly používány ještě funkce sort a filter, avšak po určité době bylo zjištěno, že to byla chyba. Funkce sort totiž zahazovala informace o x-ové pozici jednotlivých bodů, které pak bylo nutno dopočítávat, a funkce filter nepřiliš dobře intepolovala chybné body označené nulovou z-ovou hodnotou. Místo Python.Net tak bylo možno použít knihovnu ctypes a pracovat rovnou s llt.dll.

Průběh programu včetně komunikace zachycuje následující diagram.



Obrázek 19 - Vývojový diagram řídicího programu

Frekvence pulzů, které generuje Arduino pro řadič motoru je přibližně 494Hz. Podle dokumentace řadiče by tato frekvence mohla být zvýšena až na 200kHz. Program probíhající na Arduino není třeba ukončovat. Při opětovném spuštění programu v Pythonu se otevřením COM portu se vygeneruje DTR (data terminal ready) signál, v reakci na což se provede restart Arduino.

3.3 - Nastavení parametrů skenu přes knihovnu a filtrování

Většinu parametrů skenu bylo možné nastavit přes knihovnu Iltdevice.dll, ale ne všechny symboly exportované knihovnou Ilt.dll byly dostupné.

Nastavení důležitých parametrů umožňují následující funkce:

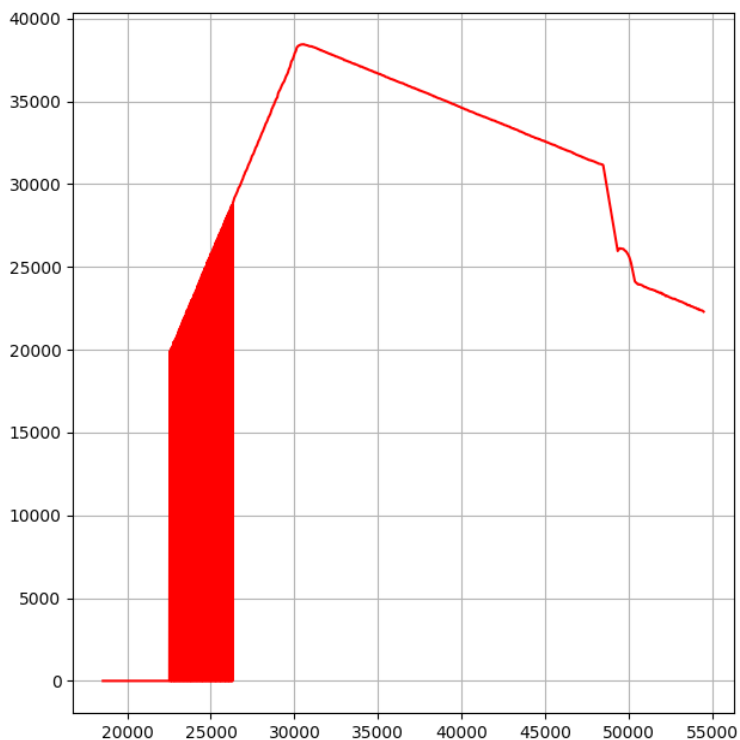
- SetLaserPower - Nastavení intenzity laseru. Možno přepínat mezi vypnuto, nižší intenzita a plná intenzita.
- SetResolution - Nastavení počtu bodů v profilu. Možné hodnoty jsou 64, 128, 256, 512 a 1024.
- SetDeadTime - Nastavení délky prodlevy v mikrosekundách.
- SetExposure - Nastavení dalších parametrů skenu, konkrétně rozlišení snímání vzdálenosti, převod měřených hodnot do milimetrů, výpočty vícenásobných odrazů, post processing, převrácení souřadnic a parametry automatické expozice.
- SetThreshold - Nastavení prahu pro výběr odrazů. Také umožňuje aktivaci funkce kontroleru pro potlačení okolního osvětlení a funkce video filtru, který má zlepšovat kvalitu obrazu.
- SetShutter - Nastavení doby expozice v desítkách mikrosekundách. Možnost automatického nastavení.
- SetMeasuringField - Nastavení oblasti měření. Možné hodnoty znázorněny v [65] na straně 39.
- SetAnalogFrequency - Nastavení frekvence analogového výstupu. Hodnota 0 znamená vypnutý výstup.
- SetPacketSize - Nastavení velikosti paketu. Musí být násobkem velikosti profilu.
- SetBufferCount - Nastavení počtu profilů, které kontroler dočasně ukládá před tím, než jsou přečteny knihovnou.
- SetProfileConfig - Nastavení formátu výstupního profilu.
- SetTrigger - Nastavení zdroje signálu pro ovládání závěrky. Jednou možností je pulzní ovládání, kdy je závěrka otevřená po dobu trvání pulzu. Další možnost po detekci hrany otevře závěrku na nastavenou dobu expozice. Také lze nastavit zda detekovat vzestupnou či sestupnou hranu.

Pomocí těchto funkcí byla při skenu nastavena: nižší intenzita laseru, rozlišení 1024, vyšší rozlišení vzdálenosti, výstupní data v milimetrech, post-processing, převrácená osa z, zpoždění automatické expozice, video filtr, potlačení okolního osvětlení, největší oblast měření, vypnutý analogový výstup, velikost paketu 4096, velikost bufferu 2 (to je v dokumentaci doporučeno při použití externího triggeru), a trigger z externího zdroje při náběžné hraně.

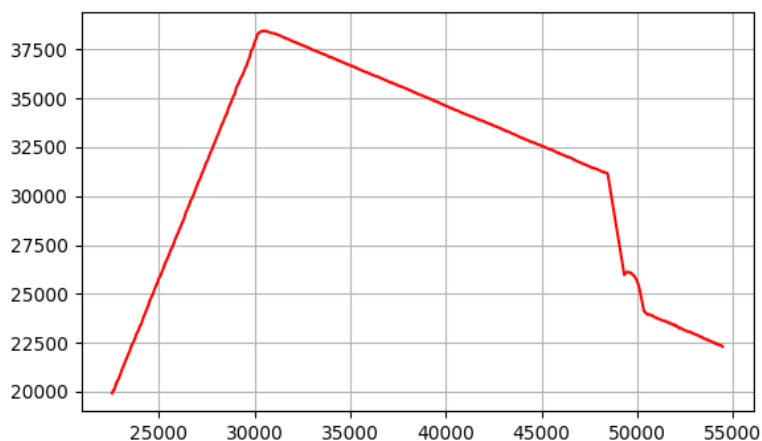
Hodnoty expozice, prahu a typu vypočteného odrazu lze nastavit vložení argumentu při spuštění řídicího programu. Stejným způsobem se nastaví počet kroků na 1 otáčku. Hodnota deadtime se odhadne podle nastavené expozice a počtu kroků.

Při nastavení ukládání dat z profilometru v podobě “čistého” profilu se ukládá 1024 bodů s x-ovou a z-ovou souřadnicí reprezentovanou 16-bitovým celým číslem, které představuje vzdálenost od okraje měřicího rozsahu v mikrometrech, a to i v případě, že se výše zmíněnou funkcí nastaví převod hodnot do milimetrů. Z-ová hodnota bodu záleží na nastavení snímání odrazů. Oproti tomu u plného profilu má každý bod čtyři z-ové hodnoty, což odpovídá čtyřem různým nastavením snímání odrazů.

Některé body mají nulovou z-ovou hodnotu, což značí chybné body. Pokud se ve snímané oblasti nenachází nic uvnitř měřicího rozsahu, budou body na intervalu odpovídajícímu oblasti mít hodnoty z nulové. Okraje profilu nabývající nulové hodnoty z se mohou odstranit, protože nenesou žádnou užitečnou informaci. U profilu také nastává situace, že existuje více bodů se stejnou x-ovou hodnotou. Nebylo zjištěno zda to má nějaký význam, proto je s těmito body zacházeno následovně. Má-li jeden z bodů nulovou z-ovou hodnotu a druhý ne, ten chybný je smazán. Jsou-li oba chybné, je smazán první z nich. V případě, že ani jeden není chybný, je z-ová hodnota jednoho z nich nahrazena kombinací jejich průměrné hodnoty s průměrnou hodnotou levého a pravého sousedního bodu, ten druhý je pak smazán. Chybné body v profilu tak postupně nahrazeny průměrem okolních bodů.



Obrázek 20 - Ukázka nefiltrovaného profilu



Obrázek 21 - Ukázka filtrovaného profilu

3.4 - Kalibrace

Pro zjištění polohy a orientace skeneru se obvykle využívají různé kalibrační metody, například [69], z nichž některé jsou implementované mimo jiné v knihovně openCV. Tyto metody jsou založené na zpracování obrazu, ale to zde použít nelze. Buď profilometr nebo použitá knihovna neumožňuje obrazový výstup. Ve výrobcově vlastním programu scanCONTROL Configuration Tools něco podobného video výstupu je, ale v lltdevice.dll není žádná podobná funkce dostupná. V llt.dll se zdá být funkce, která by to mohla umožňovat, ale v dokumentaci nebyl nalezen popis této funkce a není jasné jaké jsou její argumenty a výstup. Bude tedy třeba použít jiný postup.

Po definování středu hřídele jako středu válcového souřadného systému je rotací a posunem možno převést body profilu na válcové souřadnice následovně:

$$(Z, R) = (x, z) \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} - (0, d)$$

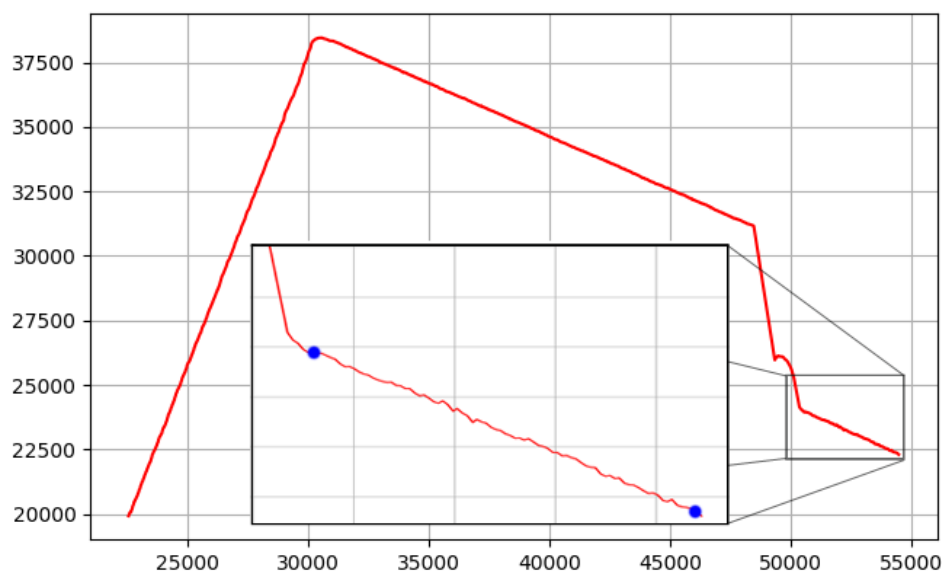
kde x a z jsou souřadnice bodu profilu, ψ je úhel mezi rovinou laseru a osou otáčení hřídele, d je vzdálenost středu hřídele od okraje měřicího rozsahu

Do kartézských souřadnic se body přesunou podle vztahu:

$$X = R \cdot \cos(\varphi); Y = R \cdot \sin(\varphi); Z = Z$$

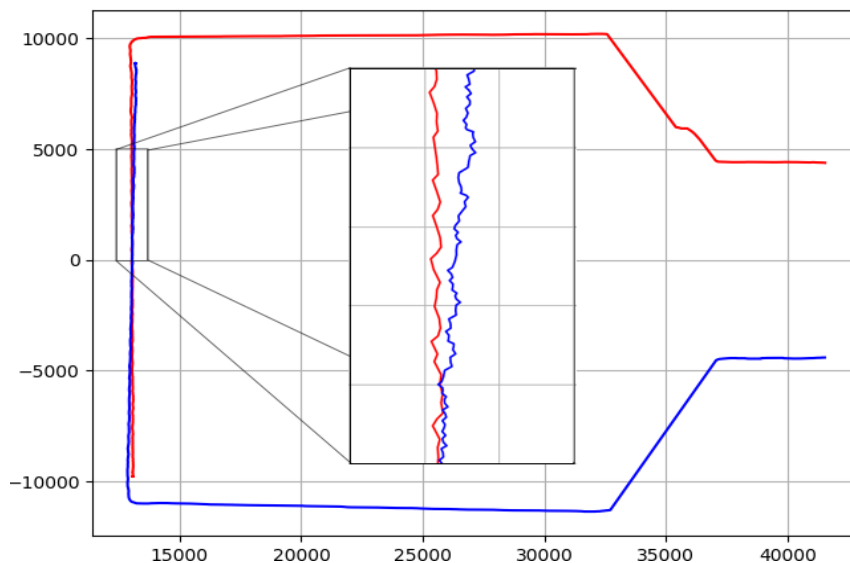
Hodnota φ se pak jednoduše určí podle aktuálního kroku motoru jako $\varphi = \frac{2\pi}{n} \cdot t$, kde n je celkový počet kroků na jednu otáčku a t je aktuálního kroku, který nabývá hodnot od 1 do n .

Hodnoty ψ a d lze odhadnout pomocí kalibrace. V první fázi kalibrace uživatel v manuálním módu vybírá 2 body profilu, které leží v rovné části hřídele motoru. Úsek mezi vybranými body se pak proloží přímkou pomocí metody nejmenších čtverců, a z její směrnice se určí úhel, o který se profil bude otáčet. Po otočení profilu se vzdálenost od středu hřídele určí jako rozdíl průměrné výšky vybraného úseku a poloměru hřídele. Podle dokumentace motoru a podle vlastního měření vím, že hřídel má poloměr přibližně 3,995 mm. Tento proces může uživatel opakovat, a výsledné hodnoty z první fáze jsou průměry vypočtených hodnot.



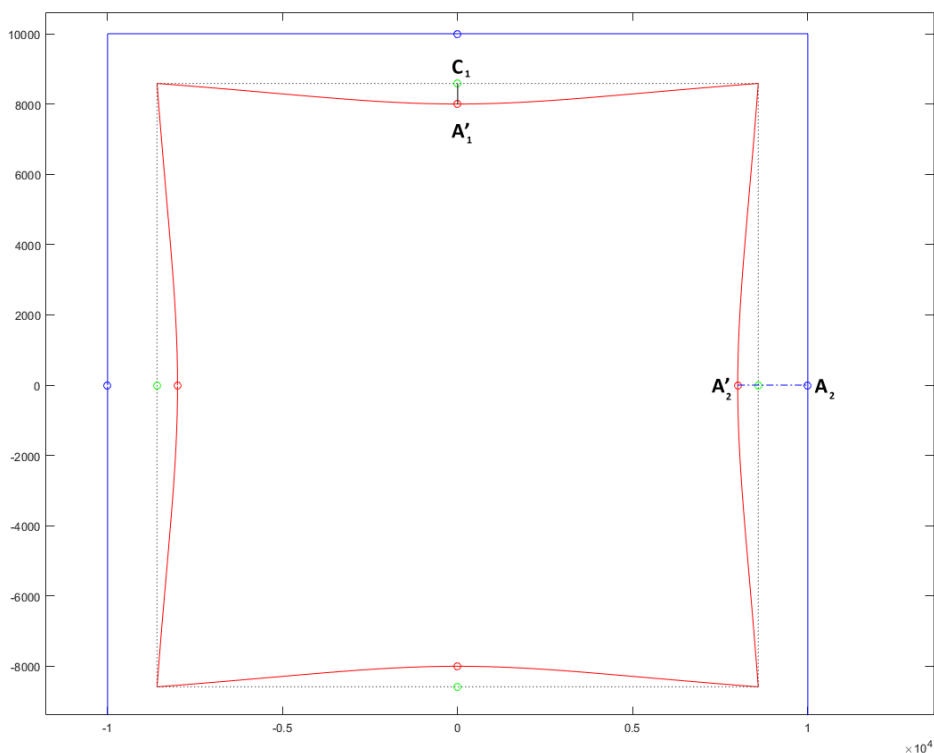
Obrázek 22 - Vybrání bodů profilu

V další fázi se předpokládá, že skenovaný objekt je kostka. Na obrázku 23 je ukázáno, jak profily z protějších stran objektu ne vždy na sebe správně navazují. Během této fáze se počítají tyto drobné úhly mezi protějšími profily a nakonec se pomocí jejich průměrné hodnoty koriguje úhel z předchozí fáze.



Obrázek 23 - Úhel mezi protějšími profily

V poslední fázi se ještě vypočítají vzdálenosti středů stěn (A') od sponic mezi rohovými body (C). Posun $A-A'$, který přiblíží profil dané vrstvy čtvercovému profilu se určí jako $(C-A') \cdot 3.4142136$. Za výslednou hodnotu se pak považuje průměr vypočtených vzdáleností z více vrstev. Oproti přechodným fázím je tato funkce implementována zatím jen v prostředí Matlab, a do programu v Pythonu ještě nebyla nepřidána.



Obrázek 24 - Znázornění počítané vzdálenosti

3.5 - Nejistoty měření

Jako odhad nejistoty rozměru změřeného skenerem se použije nejistota vzdálenosti dvou bodů.

Pokud je vzdálenost dvou bodů $D = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$, pak je nejistota

$$u_D = \sqrt{\left(\frac{X_1 - X_2}{D} \cdot u_{X_1}\right)^2 + \left(\frac{-X_1 + X_2}{D} \cdot u_{X_2}\right)^2 + \left(\frac{Y_1 - Y_2}{D} \cdot u_{Y_1}\right)^2 + \left(\frac{-Y_1 + Y_2}{D} \cdot u_{Y_2}\right)^2 + \dots}$$

,přičemž dílčí nejistoty jsou

$$u_x = \sqrt{(\cos(\varphi) \cdot u_R)^2 + (-\sin(\varphi) R \cdot u_\varphi)^2}, \quad u_y = \sqrt{(\sin(\varphi) \cdot u_R)^2 + (\cos(\varphi) R \cdot u_\varphi)^2}$$

$$u_z = \sqrt{(\cos(\psi) \cdot u_x)^2 + (\sin(\psi) \cdot u_z)^2 + ((-\sin(\psi) \cdot x + \cos(\psi) \cdot z) \cdot u_\psi)^2}, \quad a$$

$$u_R = \sqrt{(-\sin(\psi) \cdot u_x)^2 + (\cos(\psi) \cdot u_z)^2 + ((-\cos(\psi) \cdot x - \sin(\psi) \cdot z) \cdot u_\psi)^2 + u_d^2}$$

$$\text{Nejistota měření mikrometrem: } u_m = \frac{10}{\sqrt{2}} \approx 7,1 \mu\text{m}$$

U průměru mince 10 Kč je na stránkách ČNB definována tolerance průměru $\pm 0,1$ mm.

Nejistota úhlu natočení krokového motoru vychází z rozlišení enkodéru. To je u použitého motoru 1000, což v případě kvadraturního enkodéru znamená 4000 pulzů na jednu otáčku. Jako nejistota se

$$\text{uvádí } \pm 1 \text{ pulz, tomu odpovídá úhel } u_\varphi = \frac{2\pi}{4000} \approx 0,001571$$

Vzdálenost na ose x mezi sousedními body závisí na hodnotě z-ových souřadnic daných bodů. Při skenu kostičky se její maximální hodnota v jednom profilu pohybovala nejčastěji mezi 50 až 60 μm , ale někdy sahala k 90-100 μm . Vyšší hodnoty se vyskytovaly jen zřídka. Jako odhad nejistoty u_x lze použít hodnotu 80 μm , což je podle dokumentace hodnota linearity osy x na konci měřicího rozsahu.

Podle dokumentace je profilometr kalibrován tak, že ve standardním měřicím rozsahu je chyba měřené vzdálenosti menší než linearita osy z, tedy 50 μm , zatímco v rozšířeném rozsahu je chyba menší u 98,93 % bodů. Tuto hodnotu budu považovat za nejistotu u_z .

Nejistoty u_ψ a u_d se zatím nepodařilo určit, ale jelikož se jedná o nejistoty spojené s parametry vypočtenými během kalibrace, předpokládá se že je jejich velikost zanedbatelná.

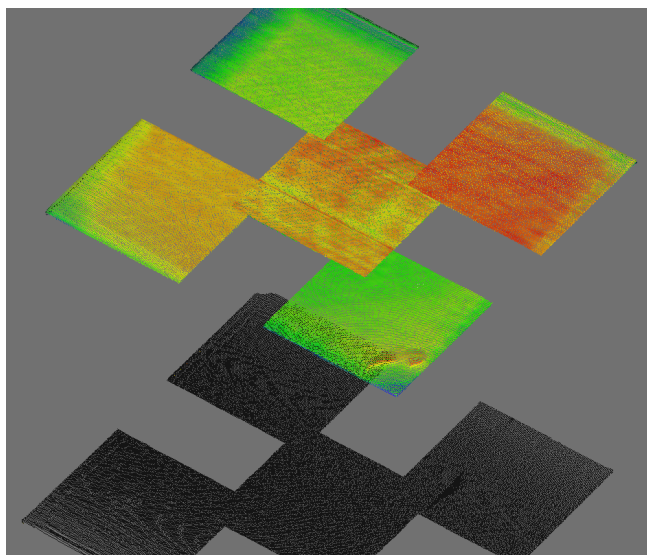
Zatím zmíněné nejistoty jsou nejistoty typu B, přičemž nejistota typu A, která také tvoří část celkové nejistoty, se určí ze směrodatné odchylky vzdálenosti vypočítané pomocí CloudCompare.

3.6 - Naměřené a vypočtené hodnoty

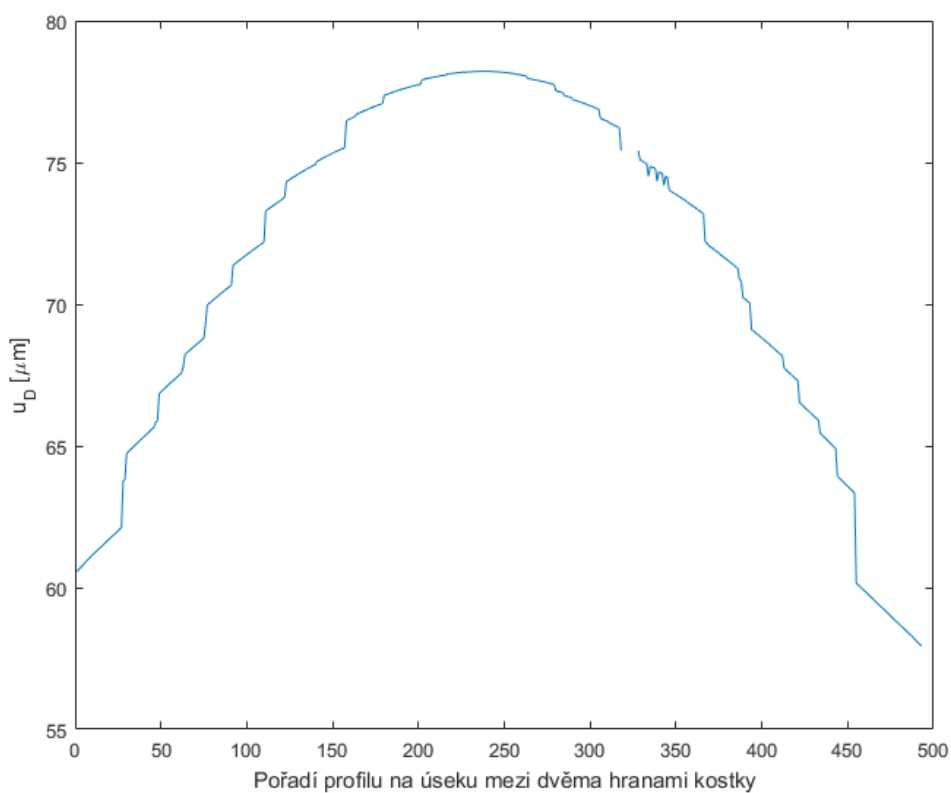
Vypočtená vzdálenost dvou mračen bodů se liší podle toho, které z nich je referenční. Jelikož u kostky šířka strany odpovídá té nejmenší vzdálenosti mezi body z protějších stran, za výsledek se považuje ta menší ze dvou vzdáleností. U kuličky se naopak za výsledek považuje ta větší, protože průměr kuličky je největší možná vzdálenost mezi dvěma body kuličky.

Tabulka 3- Tloušťky kostky [mm] měřeny ve vyznačených bodech

číslo bodu	měřeno mikrometrem (M)	průměr v CloudCompare (D)	směrodatná odchylka v CloudCompare (u_A)
1	20,05	19,94	0,03
2	19,95	19,92	0,05
3	19,95	19,88	0,10
4	20,00	19,94	0,04
5	19,92	19,97	0,02
6	19,93	19,96	0,03
7	20,00	19,95	0,06
8	19,97	19,99	0,02
9	19,97	19,95	0,09
10	20,06	19,80	0,11
11	20,00	19,97	0,04
12	20,03	19,97	0,06
13	19,97	20,00	0,02
14	19,97	20,03	0,01
15	19,99	19,99	0,04
16	20,01	20,05	0,02
17	20,01	20,06	0,03
18	20,02	20,02	0,05
19	20,10	20,15	0,02
20	20,10	20,16	0,02
21	20,10	20,17	0,02
22	20,12	20,13	0,02
23	20,10	20,16	0,02
24	20,14	20,20	0,03
25	20,13	20,10	0,05
26	20,14	20,18	0,03
27	20,21	20,22	0,03



Obrázek 25- Výřezy naskenované kostky v bodech 19,21,23,25,27



Obrázek 26 - Hodnoty nejistoty u_D v závislosti na pozici bodů, v případě kostky

Podle tohoto lze nejistotu v měřených bodech odhadnout tak, že v bodech 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 25, 26 a 27 je $u_D \approx 70 \mu\text{m}$, a v bodech 2, 5, 8, 11, 14, 17, 22, 23, 24 přibližně $80 \mu\text{m}$.

Tabulka 4 - Vypočtené nejistoty měření kostky a porovnání s rozdílem rozměrů

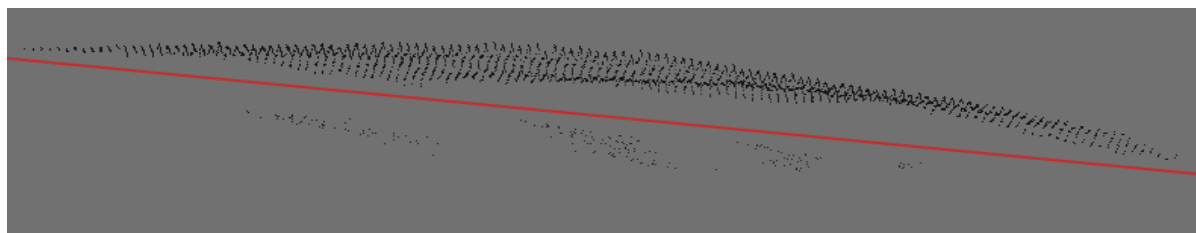
číslo bodu	vypočtená nejistota (u_D)	celková nejistota ($u_C = \sqrt{u_A^2 + u_D^2}$)	$u_C + u_m$	$ M - D $	$ M - D < u_C + u_m$
1	0,07	0,08	0,08	0,11	Ne
2	0,08	0,09	0,10	0,03	Ano
3	0,07	0,12	0,13	0,07	Ano
4	0,07	0,08	0,09	0,06	Ano
5	0,08	0,08	0,09	0,05	Ano
6	0,07	0,08	0,09	0,03	Ano
7	0,07	0,09	0,10	0,05	Ano
8	0,08	0,08	0,09	0,02	Ano
9	0,07	0,11	0,12	0,02	Ano
10	0,07	0,13	0,14	0,26	Ne
11	0,08	0,09	0,10	0,03	Ano
12	0,07	0,09	0,10	0,06	Ano
13	0,07	0,07	0,08	0,03	Ano
14	0,08	0,08	0,09	0,06	Ano
15	0,07	0,08	0,09	0,00	Ano
16	0,07	0,07	0,08	0,04	Ano
17	0,08	0,08	0,09	0,05	Ano
18	0,07	0,09	0,10	0,01	Ano
19	0,07	0,07	0,08	0,05	Ano
20	0,07	0,07	0,08	0,06	Ano
21	0,07	0,07	0,08	0,07	Ano
22	0,08	0,08	0,09	0,01	Ano
23	0,08	0,08	0,09	0,06	Ano
24	0,08	0,08	0,09	0,06	Ano
25	0,07	0,08	0,09	0,03	Ano
26	0,07	0,08	0,08	0,04	Ano
27	0,07	0,08	0,08	0,01	Ano

Tabulka 5- Průměry kuličky [mm] měřeny ve vyznačených bodech

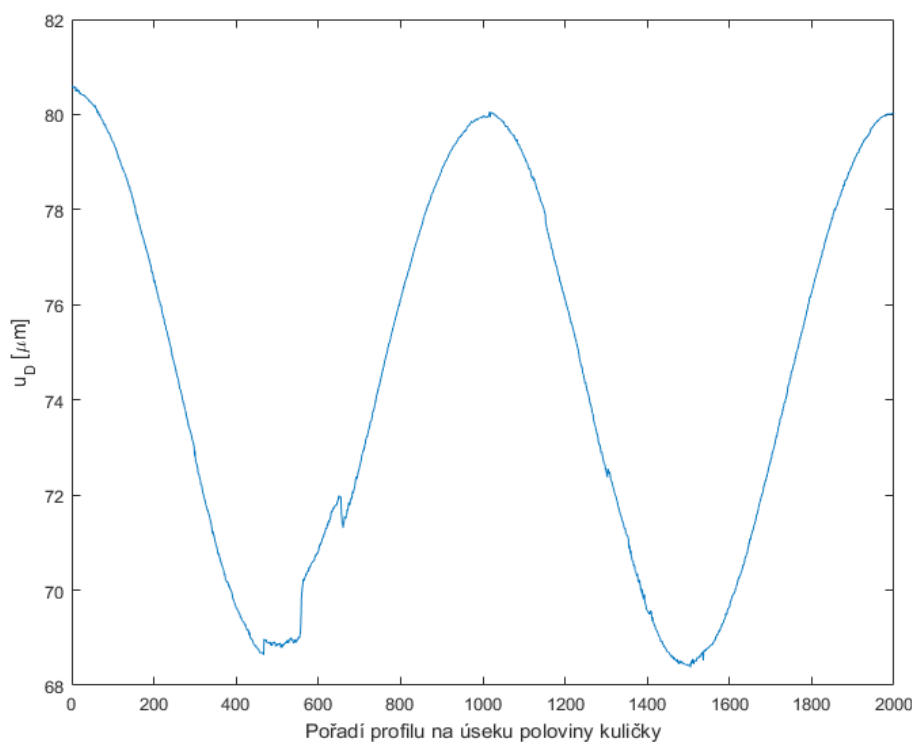
číslo měřeného bodu	1	2	3	4
měřeno mikrometrem (M)	19,88	19,89	20,23	19,55
průměr v CloudCompare (D)	19,88	19,99	20,23	19,28
směrodatná odchylka v CloudCompare (u_A)	0,04	0,05	0,09	0,20

V případě bodu 2 se ukázalo jaký vliv na výsledek může mít chyba při registraci, na obrázku 27 je vidět jak se body jednoho a druhého mračna bodů nepřekrývají. Pokud by se počítala vzdálenost pouze pro mračno bodů pod červenou čárou, byla by v bodu 2 průměrná hodnota 19,905 mm a odchylka 0,02358 mm.

Obrázek 27 - Rozdílné polohy dvou mračen bodů po registraci



V tomto případě je obtížnější určení, do které části průběhu nejistoty měřené body spadají. Proto byla při výpočtu použita odhadnutá hodnota 74,5 μm .



Obrázek 28 - Hodnoty nejistoty u_D v závislosti na pozici bodů, v případě kuličky

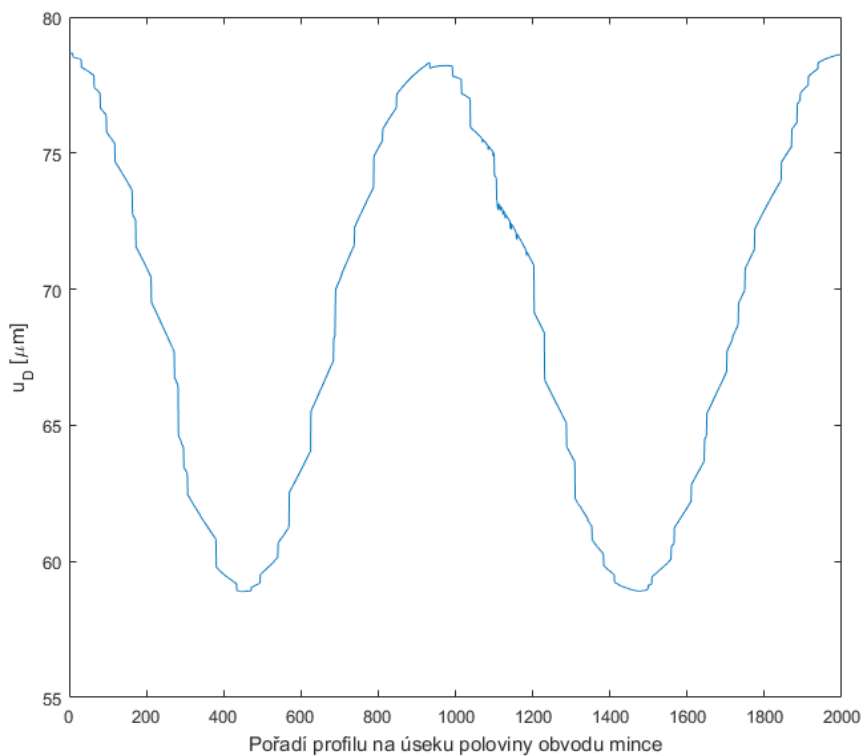
Tabulka 6 - Vypočtené nejistoty měření kuličky a porovnání s rozdílem rozměrů

číslo měřeného bodu	1	2	3	4
odhadnutá nejistota (u_D)	0,07	0,07	0,07	0,07
celková nejistota ($u_C = \sqrt{u_A^2 + u_D^2}$)	0,08	0,09	0,12	0,22
$u_C + u_m$	0,09	0,10	0,13	0,22
$ M - D $	0,00	0,10	0,00	0,28
$ M - D < u_C + u_m$	Ano	Ne	Ano	Ne

Tabulka 7 - Vypočtené průměry[mm] mince, nejistoty a porovnání s rozdílem rozměrů

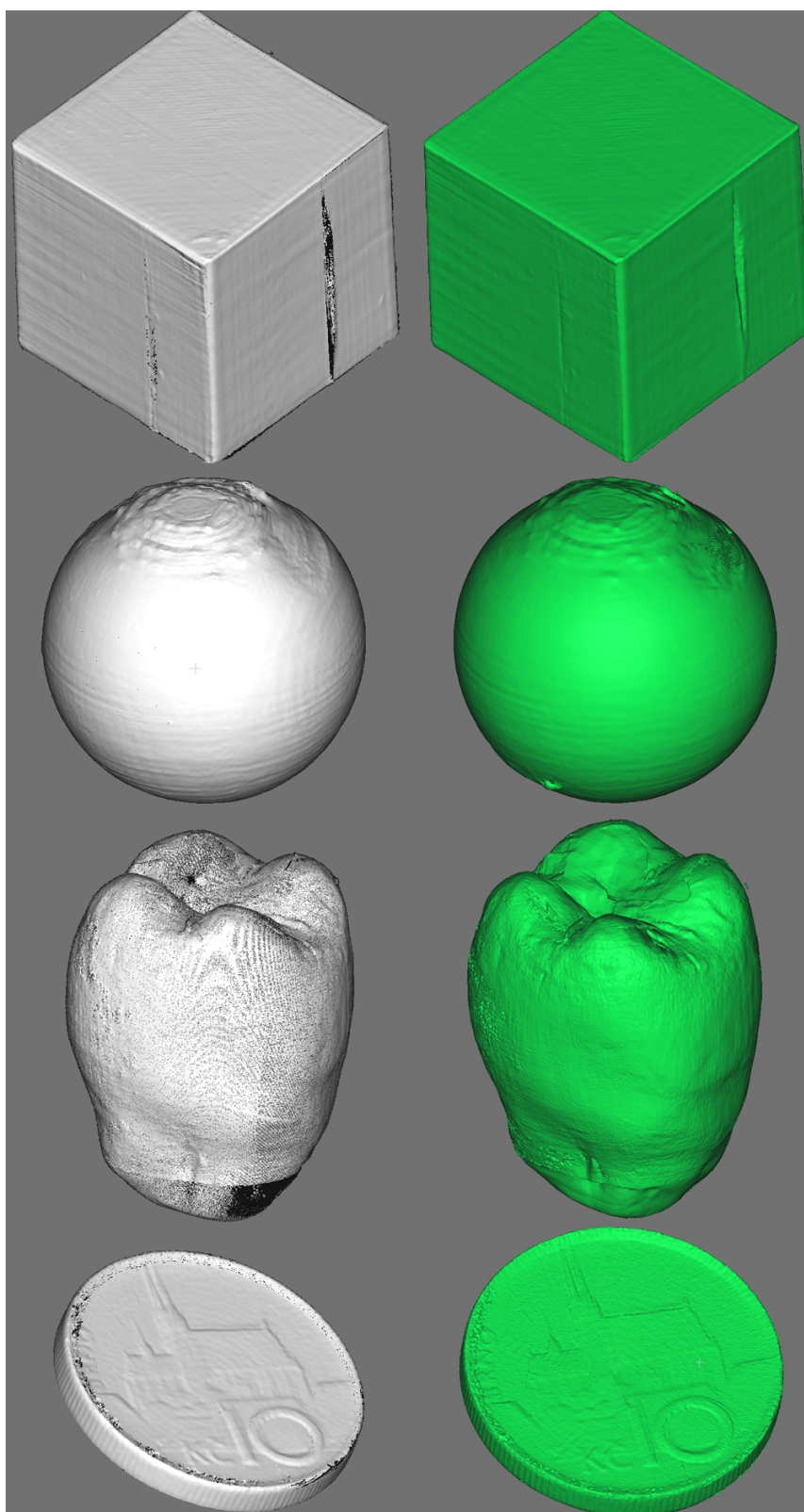
průměr v CloudCompare	odchylka průměru	odhadnutá nejistota	celková nejistota	referenční průměr	referenční nejistota	součet nejistot	rozíl hodnot	rozíl menší než součet nejistot?
24,50	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,54	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,51	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,51	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,49	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,49	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,50	0,00	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano
24,50	0,02	0,07	0,07	24,5	0,1	0,2	0,0	Ano

U mince byla nejistota podobného tvaru jako u kuličky. I v tomto případě byla použita odhadnutá střední hodnotu, protože všechny hodnoty nejistoty byly větší než rozdíl mezi vypočteným a referenčním průměrem.

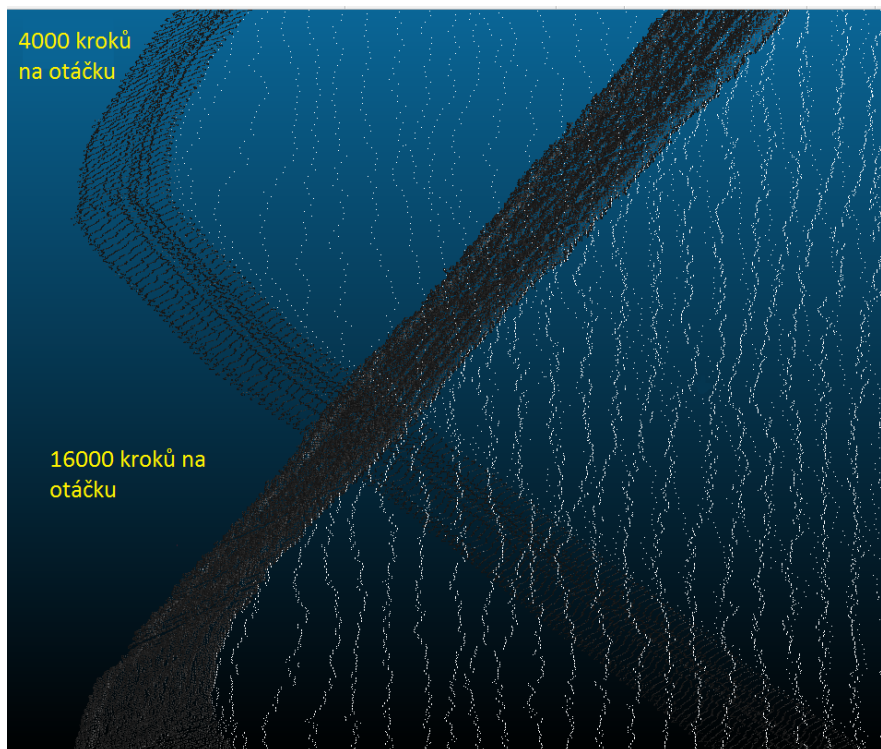


Obrázek 29 - Hodnoty nejistoty u_D v závislosti na pozici bodů, v případě mince

3.6.1 - Ukázky výstupu skenu



Obrázek 30 - Naskenované objekty - vlevo mračno bodů, vpravo mesh vytvořený v CloudCompare pomocí funkce Poissonovy rekonstrukce povrchu



Obrázek 31 - Porovnání hustoty mračen bodů při různých úrovních mikrozkoumání

3.7 - Zhodnocení výsledků

Ve výsledcích měření kostky je vidět, že ve většině případů byl rozdíl mezi hodnotami naměřenými mikrometrem a skenerem výrazně menší než součet nejistot. Předpokládá se, že v těch případech, kdy tomu tak nebylo, došlo k chybě při měření mikrometrem v daném bodě.

Při měření kuličky se v bodech 1 a 3 byl rozdíl naměřených hodnot poměrně malý. V bodě 2 byl velký rozdíl způsoben chybou při registraci. U bodu 4 byl měřen průměr v oblasti zdeformované během výroby, a zřejmě čelist mikrometru nedosáhla do nejhlubšího místa deformace.

U mince nebyla měřena tloušťka, protože se ve spodní části skenu vyskytlo množství chybných bodů, které se nepodařilo dobře odfiltrovat.

Je také možné, že zanedbání nejistot u_ψ a u_d byla chyba.

Celkově se dá říci, že chyby pocházely ze dvou zdrojů. Prvním jsou chyby při samotném snímání, které mohou být způsobeny například lesklým povrchem skenovaného předmětu, pohybem skenovaného předmětu v průběhu skenu v důsledku špatného upevnění či vibrací, poruchou při přenosu dat, špatným osvětlením nebo i vlivem teploty. Dále pak mohou být chyby způsobeny zpracováním dat, při registraci mračen bodů, a v případě této práce také možná špatně zvolenou metodou kalibrace.

Jako příklad je vidět "díra" ve stěně kostky, body v této oblasti byly nejspíše vlivem špatného odrazu vzdáleny zhruba 5 mm od stěny a musely být smazány. Tato chyba by nebyla vidět, pokud by se pomocí registrace spojilo více skenů kostky pod různými úhly. Naopak u kuličky, a do určité míry i u napodobeniny zubu je vidět, že pokud se spojená mračna bodů dostatečně nepřekrývají, vede to k deformaci celkových rozměrů a u částí, které nejsou zarovnané pak mohou být vidět zlomy či rýhy na povrchu.

4 - Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat demo laserového 3D skeneru, přičemž má být umožněno využití pro sběr dat během aditivní výroby. Zároveň mělo být využito mikrokrokování motoru. Avšak stávající rozmístění skeneru a motoru v demu příliš neodpovídá zamýšlenému využití. Při snímání procesu aditivní výroby by bylo lepší, kdyby rovina obrazu byla rovnoběžná s rovinou XY. To by skeneru umožnilo zachytit celou vrstvu pod stejným úhlem. Takto umístěný skener by ale mohl být použit v kombinaci s 3D tiskárnou založenou na polárním souřadném systému, jako je například Circa [70], pokud by byl sken synchronizován s tiskem. Jisté problémy při využití jako zdroj dat může působit to, že by zřejmě bylo potřeba minimalizovat dobu skenování. Zde se však vyskytl problém, že při snížení deadtime k určité hodnotě začal kontroler profilometru hlásit zahlcení komunikačního kanálu, v důsledku příliš vysoké snímací frekvence, přestože frekvence trigger signálu zůstala nezměněná.

Využití mikrokrokování obecně pomohlo dosáhnout detailnějšího povrchu, od určité délky kroku však byla vzdálenost mezi sousedními body v rámci profilu značně větší než mezi sousedními profily. To je vidět na obrázku 31. Body jsou v tomto případě soustředěny v kružnicích mezi nimiž jsou jisté rozestupy. Tyto kruhové obrazce jsou vidět u skenu mince.

U většiny měření byla chyba řádově odpovídající přesnosti použitých metod. Současně byla také menší, nebo srovnatelná s obvyklým rozlišením systémů aditivní výroby. V tomto ohledu byla přesnost skeneru shledána dostatečnou pro sběr dat během aditivní výroby.

Spolu se profilometrem byl dodán i počítač, který byl dříve používán pro obsluhu kontrolního systému, využívajícího profilometr. Protože se zřejmě jedná o starší počítač, vyskytly se určité komplikace. Některé novější knihovny nebylo možno využít a omezená paměť omezovala zpracovávání mračen bodů nasnímaných s jemnějším mikrokrokováním. Nakonec byly funkce filtrování profilů, které využívaly hodnoty ze sousedních profilů nahrazeny jednoduššími, u kterých není potřeba udržovat větší množství profilů v paměti.

Jedna z věcí, které se nepodařilo vyřešit je určení nepřesnosti vzniklé vlivem otáčení a posouvání profilu. Zprvu byla zkoumána možnost odhadnutí vhodných parametrů pro úspěšný sken, na základě chyb samotného profilu. K žádnému výsledku se však nedospělo.

Dalším možným zlepšením by tedy bylo za pomoci další kamery určit materiál skenovaného předmětu s využitím např. [71], na základě čeho by se mohlo odhadnout vhodné nastavení parametrů skenu.

Pro využití při aditivní výrobě by bylo užitečné do skriptu přidat porovnávání mračka bodů nebo meshe s STL modelem, podle kterého byl skenovaný kus vyroben. Z rozdílu mezi nimi by se dal vytvořit model, ve kterém jsou kompenzovány případné systematické deformace při výrobě.

Seznam použitých zdrojů

- [1] GLOBAL MARKET INSIGHTS. Digital Twin Market Size By Application [online]. [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-twin-market>
- [2] RESEARCHANDMARKETS. Global Digital Twin Market (2020 to 2035): Opportunity and Trend Analysis [online]. [cit. 2020-08-12].
- [3] Infographic. In: 3D&FPP: Integration Metal 3D Printing & Flexible Post Processing [online]. [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: http://www.3dfpp.eu/resources/Infographic-3D_FPP_5b.pdf
- [4] KAGERMANN, Henning, Wolf-Dieter LUKAS a Wolfgang WAHLSTER. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. Ingenieur.de [online]. Düsseldorf: VDI Verlag, 2011, 01.04.2011 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/produktion/industrie-40-mit-internet-dinge-weg-4-industriellen-revolution/>
- [5] KAGERMANN, Henning, Wolfgang WAHLSTER a Johannes HELBIG. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013. Dostupné také z: http://www.forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_final_report.pdf
- [6] NECHVÁTAL, Filip. Digitální dvojče: od koncepčního návrhu po zprovoznění. 2016. Dostupné také z: http://www.aero-cluster.cz/sites/default/files/06._digitalni_dvojce_filip_nechvatal.pdf
- [7] MAŘÍK, Vladimír a kol. Iniciativa Průmysl 4.0. 2016. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [8] MAŘÍK, Vladimír a kol. , MAREK, Jiří, ed. Národní iniciativa Průmysl 4.0. 2015. Dostupné také z: https://storage.googleapis.com/businessinfo_cz/files/dokumenty/narodni-iniciativa-prumysl-40.pdf
- [9] CULOT, Giovanna, Guido NASSIMBENI, Guido ORZES a Marco SARTOR. Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. International Journal of Production Economics [online]. 2020. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107617. ISSN 09255273. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527320300050>
- [10] Manufacturing's next act. McKinsey&Company [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>
- [11] TAY, Shu, Lee TE CHUAN, Ahmad Nur Aizat AHMAD a A. H. Nor AZIATI. An Overview of Industry 4.0: Definition, Components, and Government Initiatives. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems [online]. 14 December 2018, (10) [cit. 2020-06-07]. ISSN 1943-023X. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/332440369_An_Overview_of_Industry_40_Definition_Components_and_Government_Initiatives
- [12] What is Industry 4.0? | Siemens. Siemens Digital Industries Software [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/industry-4-0/29278>
- [13] MUNIRATHINAM, Sathyan. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases [online]. Elsevier, 2020, 2020, , 129-164 [cit. 2020-06-21]. Advances in Computers. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.010. ISBN 9780128187562. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065245819300634>
- [14] WEKING, Jörg, Maria STÖCKER, Marek KOWALKIEWICZ, Markus BÖHM a Helmut KRCCMAR. Leveraging industry 4.0 – A business model pattern framework. International Journal of Production Economics [online]. 2020, 225 [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107588. ISSN 09255273. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092552731930427X>
- [15] ZELINSKI, Peter. Additive Manufacturing and 3D Printing Are Two Different Things [online].

8/4/2017 [cit. 2020-08-03]. Dostupné z:

<https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/additive-manufacturing-and-3d-printing-are-two-different-things>

[16] Additive manufacturing technologies at Sulzer [online]. In: . [cit. 2020-08-01]. Dostupné z:

<https://www.sulzer.com/en/shared/about-us/additive-manufacturing-technologies-at-sulzer>

[17] TAPIA, Gustavo a Alaa ELWANY. A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2014, 136(6). DOI:

10.1115/1.4028540. ISSN 1087-1357. Dostupné také z:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/doi/10.1115/1.4028540/377521/A-Review-on-Process-Monitoring-and-Control-in>

[18] Fused Deposition Modeling (FDM) [online]. [cit. 2020-08-04]. Dostupné z:

<https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

[19] AM Machine and Process Control Methods for Additive Manufacturing [online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/programs-projects/am-machine-and-process-control-methods-additive-manufacturing>

[20] TruPrint monitoring [online]. [cit. 2020-08-07]. Dostupné z:

https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/servis/servis-strojni-systemy-a-lasery/monitoring-analyza/truprint-monitoring/

[21] HAFKAMP, Thomas, Gregor VAN BAARS, Bram DE JAGER a Pascal ETMAN. A feasibility study on process monitoring and control in vat photopolymerization of ceramics. *Mechatronics*. 2018, 56, 220-241. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.006. ISSN 09574158. Dostupné také z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095741581830028X>

[22] HE, Ketai, Qian ZHANG a Yili HONG. Profile monitoring based quality control method for fused deposition modeling process. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019, 30(2), 947-958. DOI:

10.1007/s10845-018-1424-9. ISSN 0956-5515. Dostupné také z:

<http://link.springer.com/10.1007/s10845-018-1424-9>

[23] WOLFS, Rob J. M., Freek P. BOS, Emiel C. F. VAN STRIEN a Theo A. M. SALET. A Real-Time Height Measurement and Feedback System for 3D Concrete Printing. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Cham: Springer International Publishing, 2018, 2018-08-06, , 2474-2483. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_282. ISBN 978-3-319-59470-5. Dostupné také z:

http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59471-2_282

[24] Digital Twin | Siemens. Siemens Digital Industries Software [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>

[25] SKV wins 'Industry 4.0 transformation' campaign for Siemens Digital Industries [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.skvcommunications.co.uk/our_news/skv-wins-industry-4-0-transformation-campaign-for-siemens-digital-industries/

[26] GREENFIELD, David. Siemens Positions Itself as an Industry 4.0 Example. In: *Automation World* [online]. PMMI Media Group, May 3rd, 2016 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://www.automationworld.com/products/control/blog/13315384/siemens-positions-itself-as-an-industry-40-example>

[27] BLACKMAN, James. Siemens and SAP join Industry 4.0 initiative to move enterprises out of digital 'pilot trap'. In: *Enterprise IoT Insights* [online]. RCR Wireless News, January 24, 2019 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://enterpriseiotinsights.com/20190124/channels/news/siemens-sap-move-enterprises-out-of-digital-pilot-trap>

[28] SCHNITGER, Monica. Siemens all in on digitalization and the digital twin. In: *The Business of Engineering IT: CAD/CAM, CAE, PLM* [online]. Sep 18, 2017 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://schnitgercorp.com/2017/09/18/siemens-digitalization-digital-twin/>

[29] OGEWELL, Verdi. Siemens PLM, NX 12.0 and the Road to the Digital Twin. In: *Engineering.com*

- [online]. November 14, 2017 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/PLMERP/ArticleID/16009/Siemens-PLM-NX-120-and-the-Road-to-the-Digital-Twin.aspx>
- [30] Co je digitální dvojče a proč je užitečné. In: AI World [online]. 02.02.19 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://aiworld.cz/digitalizace/co-je-digitalni-dvojce-a-proc-je-uzitecne-232>
- [31] HAYASHI, Alden M. Alan Alda Meets Alan Alda 2.0. Scientific American. New York: Springer Nature, 1998, 278(3), 68-69. ISSN 0036-8733.
- [32] TUEGEL, Eric J., Anthony R. INGRAFFEA, Thomas G. EASON a S. Michael SPOTTWOOD. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. International Journal of Aerospace Engineering. 2011, 2011, 1-14. DOI: 10.1155/2011/154798. ISSN 1687-5966. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/ijae/2011/154798/>
- [33] SHIVES, W. David. How Design Thinking Saved the Apollo 13 Astronauts. In: IRIS Health Solutions [online]. 19 September 2018 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.irishealthsolutions.com/index.php/blog/24-how-design-thinking-saved-the-apollo-13-astronauts>
- [34] GRIEVES, Michael a John VICKERS. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017, 2017-08-17, , 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4. ISBN 978-3-319-38754-3. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [35] 3D Scanning Provides a Digital Twin As Built for Demolition & Installation Projects. Acensium llc [online]. February 22, 2019 [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://acensium.com/3d-scanning-provides-a-digital-twin-as-built-for-demolition-installation-projects/>
- [36] SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE. Dostupné také z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>. [cit. 2020-07-02].
- [37] Coordinate-measuring machine. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine
- [38] Smart Factory CMM Series Launched. In: Metrology News [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://metrology.news/smart-factory-cmm-series-launched/>
- [39] MicroScribe Portable CMMs. In: GoMeasure3D [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://gomeasure3d.com/microscribe/>
- [40] PROKOP, Martin. Co je laserový tracker a jak se s ním měří? Automa. Automa-časopis pro automatizační techniku, 2009, (08), 40-41. ISSN 1210-9592.
- [41] BRIDGES, Bob. How Laser Trackers Work. Quality Digest [online]. June 25, 2009 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/how-laser-trackers-work.html>
- [42] MASON, Austin. Making 3D Models with Photogrammetry [online]. [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: <https://thehaskinssociety.wildapricot.org/photogrammetry>
- [43] Visual hull. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_hull
- [44] CHARVAT, Gregory, Andrew TEMME, Micha FEIGIN a Ramesh RASKAR. Time-of-Flight Microwave Camera. Scientific Reports. 2015, 5(1). DOI: 10.1038/srep14709. ISSN 2045-2322. Dostupné také z: <http://www.nature.com/articles/srep14709>
- [45] YAO, C W. An ultrasonic method for 3D reconstruction of surface topography. Journal of Physics Communications. 2018, 2(5). DOI: 10.1088/2399-6528/aac691. ISSN 2399-6528. Dostupné také z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2399-6528/aac691>
- [46] COLE, Timothy. NEAR Laser Rangefinder: A Tool for the Mapping and Topologic Study of Asteroid 433 Eros. JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST. 1998, 19(2), 142-157. ISSN 0270-5214.
- [47] YASUTOMI, Keita, Takahiro USUI, Sang-Man HAN, Taishi TAKASAWA, Keiichiro KAGAWA a Shoji

KAWAHITO. A Submillimeter Range Resolution Time-of-Flight Range Imager With Column-Wise Skew Calibration. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016, 63(1), 182-188. DOI: 10.1109/TED.2015.2447525. ISSN 0018-9383. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7206574/>

[48] ANDERSEN, J., J. BUSCK a H. HEISELBERG. Submillimeter 3-D laser radar for Space Shuttle tile inspection. Danish Defense Research Establishment, Copenhagen, Denmark, [2013]. Dostupné také z: <https://stanfordcomputeroptics.com/download/Submillimeter%203-D%20Laser%20Radar%20for%20Space%20Shuttle%20Tile%20Inspection.pdf>

[49] Time-of-flight camera. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera

[50] Introduction to the Laser Scanning Guide. *Archaeology Data Service / Digital Antiquity* [online]. [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: https://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/LaserScan_1-2

[51] YOON, Heesun, Hajun SONG a Kyihwan PARK. A phase-shift laser scanner based on a time-counting method for high linearity performance. *Review of Scientific Instruments*. 2011, 82(7). DOI: 10.1063/1.3600456. ISSN 0034-6748. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3600456>

[52] The Reality: TOF vs Phased based scanners. *LIDAR Magazine* [online]. [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://lidarmag.com/2013/04/06/the-reality-tof-vs-phased-based-scanners-2/>

[53] KAHLMANN, Timo, Fabio REMONDINO a Hilmar INGENSAND. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRanger. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2006, 36(5), 136-141.

[54] 3D scanning. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanning

[55] New Advances in 3D Laser Scanning Technologies From Laser Design [online]. [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: <https://www.laserdesign.com/new-advances-in-3d-laser-scanning/>

[56] Using Conoscopic Laser Holography to Gauge a Crankshaft [online]. [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: <https://medium.com/@HankRearden67/using-conoscopic-laser-holography-to-gauge-a-crankshaft-bd368d2802ff>

[57] EMS. Types of 3D Scanners and 3D Scanning Technologies. Dostupné také z: <https://www.ems-usa.com/tech-papers/3D%20Scanning%20Technologies%20.pdf>

[58] Structured-light 3D scanner. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light_3D_scanner#Precision_and_range

[59] BOISVERT, Jonathan, Marc-Antoine DROUIN, Louis-Guy DICAIRE, Michel PICARD a Guy GODIN. Motion Compensation for Phase-Shift Structured-Light Systems Based on a Total-Variation Framework. *2017 International Conference on 3D Vision (3DV)*. IEEE, 2017, , 658-666. DOI: 10.1109/3DV.2017.00080. ISBN 978-1-5386-2610-8. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8374621/>

[60] What is Structured Light Imaging? [online]. 04/24/18 [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2018/04/what-is-structured-light-imaging/11821>

[61] SOR filter. *CloudCompareWiki* [online]. [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=SOR_filter

[62] Noise filter. *CloudCompareWiki* [online]. [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Noise_filter

[63] Iterative closest point. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Iterative_closest_point

- [64] PATIL, Hemprasad, Ashwin KOTHARI a Kishor BHURCHANDI. 3-D face recognition: features, databases, algorithms and challenges. *Artificial Intelligence Review*. 2015, 44(3), 393-441. DOI: 10.1007/s10462-015-9431-0. ISSN 0269-2821. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10462-015-9431-0>
- [65] MICRO-EPSILON. Instruction Manual: scanCONTROL 2800/2810. Dostupné také z: <https://www.lagerwerk.com/media/pdf/f0/33/51/scanCONTROL-28x0-en.pdf>
- [66] LEADSHINE. Datasheet of the Easy Servo Motor ES-M Series. Version 1.3. Dostupné také z: http://www.cncshop.cz/PDF/ES/ESM/ES-Md_V1.3.pdf
- [67] NEU! 2D/3D-Linien-Triangulation [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20030611015718/http://www.micro-epsilon.de:80/>
- [68] LEADSHINE. Datasheet of the Easy Servo Drive ES-D508. Version 1.2. Dostupné také z: http://www.cncshop.cz/PDF/ES/ES-D508d_V1.2.pdf
- [69] ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 22(11), 1330-1334. DOI: 10.1109/34.888718. ISSN 01628828. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/888718/>
- [70] BOSHOF, Willem. CIRCA POLAR 3D PRINTER [online]. [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: <https://willemhboshoff.wordpress.com/my-projects/circa-3d-printer/>
- [71] SCHWARTZ, Gabriel a Ko NISHINO. Recognizing Material Properties from Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020, 42(8), 1981-1995. DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2907850. ISSN 0162-8828. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675400/>