

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Evidenčné číslo: FEI-104364-64812

**INOVATÍVNE METÓDY GENEROVANIA TRAJEKTÓRIE
PRE PRIEMYSELNÝ MANIPULÁTOR
AUTOREFERÁT DIZERTAČNÉJ PRÁCI**

Študijný program:	Robotika a kybernetika
Študijný odbor:	9.2.7 Kybernetika
Školiace pracovisko:	Ústav robotiky a kybernetiky
Vedúci záverečnej práce/školiťel:	doc. Ing. Andrej Babinec, PhD.

Bratislava 2021

Ing. Michal Adamík

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave robotiky a kybernetiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Michal Adamík

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Andrej Babinec, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponent: prof. Ing. Michal Kelemen, CSc.

Technická univerzita Košice

Strojnícka fakulta, Letná 9, 042 00 Košice

Oponent: doc. Ing. Dušan Koniar, PhD.

Žilinská univerzita

Elektrotechnická fakulta Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol odoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, Bratislava, v miestnosti D424 pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie 9.2.7 Kybernetika.

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

dekan FEI STU

ANOTÁCIA DIZERTAČNÉJ PRÁCE

Slovenská technická univerzita v Bratislave
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný odbor: kybernetika

Študijný program: Robotika a kybernetika

Autor: Bc. Ing. Michal Adamík

Diplomová práca: Inovatívne metódy generovania trajektórie pre priemyselný manipulátor

Vedúci diplomovej práce: doc. Ing. Andrej Babinec, PhD

Mesiac, rok odovzdania: August, 2021

Kľúčové slová: robot, manipulátor, generovanie dráhy nástroja, generovanie kódu, robotická kresba.

Generovanie trajektórie sa prvý krát začalo používať v CNC strojoch, ktoré sú schopné vytvoriť sériu pohybových inštrukcií z CAD modelu. Prístup generovania trajektórie z digitálov dát teda nie je nový, ale nasadenie na 6-osé manipulátory nie je časte. Tieto roboty sú schopné širokej škály pohybov, čo im prináša vysokú využiteľnosť v rozličných aplikáciách. Cenou za tieto schopnosti sú problémy spojené s náročnejším programovaním respektíve s nižšou flexibilitou výroby. Práve tento problém adresuje táto práca, ktorá komplexne rozoberá problematiku generovania trajektórie pre robotický manipulátor. Analyzuje existujúce a nami vytvorené robotické aplikácie, ktoré využívajú generatívny prístup. Generovanie umožňuje vytvoriť program v priebehu sekúnd až minút špecificky pre danú situáciu. Zároveň otvára dvere robotike aj do iných odvetví ako je umenie a stavebníctvo. So súčasným tlakom na flexibilnú a kolaboratívnu výrobu je toto cesta, ktorá môže naplniť očakávania a požiadavky budúcnosti.

DISSERTATION THESIS ABSTRACT

Slovak University of Technology in Bratislava
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION
TECHNOLOGY

Branch of Study: Cybernetics

Study Programme: Robotics and Cybernetics

Author: Ing. Michal Adamík

Master Thesis: Innovative tool path generation methods for
industrial manipulator

Supervisor: doc. Ing. Andrej Babinec, PhD

Year, Month: August, 2021

Keywords: robot, manipulator, toolpath generation, code generation, robotic
drawing.

Trajectory generation was first used in CNC machines, which are able to create a series of motion instructions from a CAD model. Thus, the approach to generating trajectories from digital data is not new, but deployment on 6-axis manipulators is not common. These robots are capable of a wide range of movements, which brings them high usability in various applications. The price for these capabilities are the problems associated with more demanding programming or lower production flexibility. This work is addressed by this work, which comprehensively discusses the issue of trajectory generation for a robotic manipulator. Analyzes existing and created robotic applications that use a generative approach. Generation allows you to create a program in seconds to minutes specifically for a given situation. At the same time, it opens the door to robotics in other industries such as art and construction. With the current pressure for flexible and collaborative production, this is a path that can meet the expectations and requirements of the future.

Obsah

Obsah	5
Úvod	6
1 Tézy dizertačnej práce	7
1.1 Návrh a výpočet dráh vyplňajúcich priestor alebo plochu.	7
1.2 Výskum a algoritmizácia generovania trajektórie pre špecifickú aplikáciu.	7
1.3 Návrh na výskum a návrh nových nástrojov pre robotické manipulátory.	8
1.4 Návrh metodiky vyhodnotenia experimentov na vytvorenej aplikácii.	8
2 Nefotorealistické vykresľovanie grafitom	9
3 Robotická aplikácia kreslenia grafitovou tuhou	10
3.1 Konštrukcia a proces kalibrácie nástroja.	10
3.2 Genetický algoritmus (GA)	12
3.3 Generovanie robotického programu.	13
3.4 Výsledky a meranie rôznych typov papierového média.	17
3.5 Meranie odtieňa kreslených čiar.	20
3.5.1 Meranie odtieňa a profilu čiary.	21
3.5.2 Meranie zmiešavania dvoch vrstiev grafitu.	23
3.5.3 Meranie zmiešavania viacerých vrstiev grafitu.	24
4 Prínosy dizertačnej práce	27
Záver	28
Literatúra	29
Zoznam publikačnej činnosti autora	31

Úvod

Priemyselné robotické manipulátory sa dnes využívajú bežne v každej výrobnjej prevádzke. Prevažná väčšina týchto robotov sa nasadzuje pri jednoduchých opakovaných úlohách, na výrobných linkách alebo v malých robotických bunkách. Úlohou programátora je naučiť robot vykonávať danú opakovanú úlohu. Potenciál týchto robotov je však väčší, zvyčajne majú 6 alebo 7 stupňov voľnosti, dosah od pár desiatok centimetrov až po niekoľko metrov. Ich presnosť a opakovateľnosť sa pohybuje v desatinách až tisícinách milimetra. Komerčne dostupne jednotky sa stávajú čoraz pokročilejšími, a to napriek tomu, že sa väčšinou využívajú na to iste.

Klasické programovanie robotov je zdĺhavé a komplikované. Problém nastáva vždy, keď dôjde k výmene typu výrobku, pretože je nutné celú výrobu zastaviť a robot preprogramovať. Napriek tomu, že robot má stále rovnaký nástroj a vykonáva veľmi podobné pohyby, je nutné ho znova učiť danú úlohu. Veríme, že toto programovanie nie je vždy nevyhnutné. Dokážeme ho nahradiť generovaným off-line programom z prístupných CAD dát alebo 3D senzorov. Prípadne, ak je to nutné, po vygenerovaní programu robot môže ďalej upravovať trajektóriu s využitím integrovaných snímačov. Týmto spôsobom môžeme zvýšiť flexibilitu výroby v podobe kratšej odstavky výrobnjej linky a po pripravení GUI v generátore môžeme eliminovať kvalifikovanú pracovnú silu potrebnú na pregenerovanie programu. V súčasnosti takáto potreba vysoko flexibilnej a adaptabilnej výroby prirodzene vzniká so zvyšujúcou sa variabilitou výrobkov a so znižovaním ich počtosti [1]. Práve táto výzva vytvára priestor na generatívne robotické aplikácie.

Generovanie trajektórie pre robotický manipulátor patrí medzi offline programovanie, ktoré automaticky pripraví kód na základe digitálneho vstupu, napr. CAD modelu, mračna bodov, vektorovej grafiky, prípadne textu... V súčasných vedeckých prácach sa už dopodrobna rozoberali prípady aditívnej výroby [5], frézovania [6], inšpekcie dielov [2] alebo vyberania neorientovaných súčiastok z koša [3]. Práve tento generatívny prístup otvoril dvere robotike aj do iných odvetví, akým je napríklad stavebníctvo, v ktorom roboty môžu stavať domy z tehál alebo aditívnou tlačou. Svoje uplatnenie nachádzajú napríklad aj v umení, v rámci ktorého robot dokáže nakresliť umelcovu víziu na plátno alebo vyfrézovať sochu. Tento prístup otvára dvere aj do výroby malých a stredných podnikov, pre ktoré je finančne náročné integrovať klasické robotické riešenia veľkých spoločností [4].

1 Tézy dizertačnej práce

V písomnej práci k dizertačnej skúške sme si stanovili tézy, ktoré budeme adresovať na praktických príkladoch generovania trajektórie. Využívame získané teoretické poznatky pri navrhovaní našich robotických aplikácií. V praktickej časti sme vytvorili 4 generatívne robotické aplikácie:

1. Robotická stavba steny.
2. Robotická aplikácia kreslenia.
3. Robotická aplikácia kreslenia grafitovou tuhou, ktorú rozoberáme v tomto referáte.
4. Robotická aplikácia gravírovania neznámeho objektu.

1.1 Návrh a výpočet dráh vyplňajúcich priestor alebo plochu.

Opisujeme genetický algoritmus, ktorý generuje dráhy nástrojom, pričom každý ťah má v dvojrozmernom priestore určený odtieň, ktorý sa robot snaží replikovať rozdielnym prítlakom na papier. Nie je nám známe, či sa genetický algoritmus niekedy využil takýmto spôsobom. Prístup je možné adaptovať aj do tretieho rozmeru.

1.2 Výskum a algoritmizácia generovania trajektórie pre špecifickú aplikáciu.

V každej aplikácii sa snažíme vysvetliť funkčnosť, ciele a postup. Zvyčajne našou snahou je znížiť časovú náročnosť procesu, preto implementujeme algoritmy riešenia problému obchodného cestujúceho. Časovú úsporu dokážeme získať napríklad aj preskočením nepotrebných krokov, v kapitole 3.3 analyzujeme vzdialenosť koncových a začiatočných bodov úsečiek a spájame ich na základe nášho nastaveného parametra vzdialenosti.

Vytvorili sme dva rozdielne varianty aplikácie s cieľom získať kvalitnejší a rýchlejší proces. Pri aplikácii robotického kreslenia sa ukázalo použité Voronoiových diagramov ako neefektívne oproti algoritmu „scribble“, dostupnému v softvéri Adobe Illustrator. V aplikácii robotického gravírovania sme využili dva prístupy gravírovania, jeden so silovo-momentovým riadením a druhý s meraním korekcií vzdialenosti s laserom. Tu sa ukázalo, že použitie silovo-momentového riadenia pravdepodobne nie je možné s dostupným hardwarom.

1.3 Návrh na výskum a návrh nových nástrojov pre robotické manipulátory.

Prichádzame s vlastným návrhom pasívneho pružného nástroja, v ktorom je osadená grafitová tuha. Proces obrusuje tuhu a efektor nástroja sa posúva, čím vzniká potreba častej a efektívnej kalibrácie. Tento problém sa vyriešil prostredníctvom kalibračnej rutiny, ktorá sa vykonáva cyklicky. Skúmame základné parametre nástroja, akými sú: presnosť kalibrácie, koeficient pružnosti, tlak vyvíjaný medzi obrobkom a nástrojom. Skúmame vytvorený nástroj pri rozličných procesných hodnotách v kapitole 3.5. s cieľom lepšie pochopiť proces aplikácie a navrhnúť zlepšenia.

1.4 Návrh metodiky vyhodnotenia experimentov na vytvorenej aplikácii.

V každej aplikácii sa snažíme nájsť merateľné numerické metódy vyhodnotenia s výnimkou robotickej stavby steny, v ktorej sme nestanovili požadované kritérium okrem funkčnosti. Aplikáciu kreslenia sme vytvorili s prezentačným cieľom a s požiadavkou na čo najnižší čas kreslenia, pričom sme do úvahy brali aj nemerateľné kritérium estetickosti výtvoru.

V aplikácii kreslenia grafitovou tuhou sa výtvary snažíme priblížiť fotorealite, preto sme navrhli metodiku merania s RGB kamerou, v ktorej porovnávame výtlačok originálneho obrazu z tlačiarne oproti nakreslenému obrazu robotom. Experimentujeme s rôznymi druhmi papiera s cieľom získať najväčšiu podobnosť oproti originálu.

Posledná aplikácia gravírovania predstavuje výzvu z pohľadu presnosti. Gravírujeme neznámy objekt umiestnený do pracovného priestoru robota, ktorý sa sníma 3D snímačom. Ako sme už spomenuli, aplikácia má dva varianty. V prvom používame silovo-momentový snímač, z ktorého získame dáta na vyhodnotenie experimentu. V druhom používame laserový merač vzdialenosti, ktorý slúži na zmeranie korekcií. Po aplikovaní korekcií meriame v generátore znova odchýlky, aby sme získali dáta na vyhodnotenie experimentu.

2 Nefotorealistické vykresľovanie grafitom

Nefotorealistické vykresľovanie (NPR – Non-photorealistic rendering) je oblasť počítačovej grafiky, ktorá sa sústreďuje na vykresľovanie rozdielnych grafických štýlov. Na rozdiel od klasickej počítačovej grafiky, ktorá je zameraná na fotorealizmus, NPR je často inšpirované štýlmi z umenia, ktoré sa snaží napodobniť. Simulovanie grafitovej kresby je dôležitá časť NPR. Aplikácia v 4. kapitole využíva nástroj s grafitom a analyzuje charakteristické vlastnosti grafitu pri kreslení v realite. Cieľom tejto kapitoly je vytvoriť prehľad o technikách, ktorými môžeme simulovať príznačné vlastnosti grafitu pri kreslení v počítačovej simulácii.

Súčasný algoritmy NPR sa rozdeľujú do dvoch kategórií: 2D a 3D renderovanie. Pri 3D scéna obsahuje presný 3D model, ktorý obsahuje kompletnú geometrickú informáciu a svetelné podmienky sú kontrolovateľné. Avšak zvyčajne vstupom do systému NPR je fotografia 2D, ktorá neobsahuje informáciu 3D, preto je vyšší dopyt po 2D systémoch [7].

V posledných rokoch sa vykonával rozsiahly výskum metódami hlbokého učenia s cieľom presunu štýlu na cieľový obrázok. Výsledky týchto algoritmov lepšie adaptujú štýl ako klasické matematické renderovacie algoritmy. Napriek pokroku metodík procedurálnych algoritmov a umelej inteligencie zvyčajne tieto algoritmy neposkytujú postup kreslenia jednotlivých ťahov [8]. Zvyčajným výstupom je priamo vygenerovaný obrázok a systém poskytne nanajvýš prehľad vrstiev, z ktorých bol obrázok vytvorený, ako je to napríklad na Obr. 1. V malom množstve dostupnej literatúry, ktorá vytvára aj proces kreslenia ťahov [8], [9], [10], sa nenachádza meranie, ktoré by verifikovalo vytvorený renderovaný ťah s rovnakým ťahom v realite. To vytvára priestor na budúci výskum tejto problematiky napríklad s využitím opakovateľnosti robotických systémov, ktoré budú reprodukovat tieto ťahy.



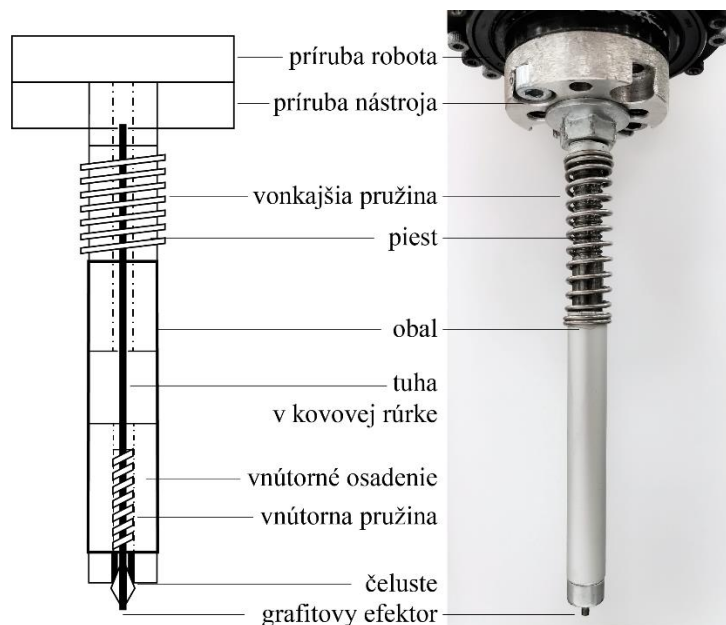
Obr. 1 Zľava: vstupný obrázok, čiarová grafika, tonálna mapa, výsledný render [7].

3 Robotická aplikácia kreslenia grafitovou tuhou

V aplikácii sme použili robotickú platformu ABB IRB120, ktorá má za úlohu prekresliť požadovaný digitálny obrázok grafitovou tuhou na papier, ktorý je umiestnený v magnetických svorkách pri základni robota. Na robote je namontovaný náš vyrobený nástroj s grafitovou tuhou. Nástroj umožňuje vytvoriť pružnú kompresiu v smere kolmom na prírubu robota. Touto pružnosťou sa vytvárajú rozdielne prítlaky, a tým aj rozdielne odtiene, čím je možné napodobňovať proces kreslenia ľudského umelca. Proces generovania trajektórie je zabezpečený genetickým algoritmom, ktorý generuje úsečky s rozdielnym odtieňom sivej. Proces evolúcie minimalizuje funkciu fitness s každou pridanou úsečkou, ktorú vyberie genetický algoritmus za najvhodnejšiu, respektíve má najvyšší príspevok k minimalizovaniu funkcie fitness. Výsledný obraz je uložený v súbore CSV, ktorý popisuje každú úsečku odtieňom a dvoma bodmi v dvojrozmernom priestore. Tento súbor následne analyzuje generátor kódu a obraz sa transformuje (umiestni) do 3D pracovného priestoru robota v mieste, kde sa nachádza vopred pripravený papier. Výsledný robotický kód je optimalizovaný s cieľom znížiť časovú náročnosť kresby. Cely kód je pripravený off-line a počas kreslenia robot nevykonáva žiadne korekcie. Robotická platforma neobsahuje žiadne dodatočné snímače.

3.1 Konštrukcia a proces kalibrácie nástroja

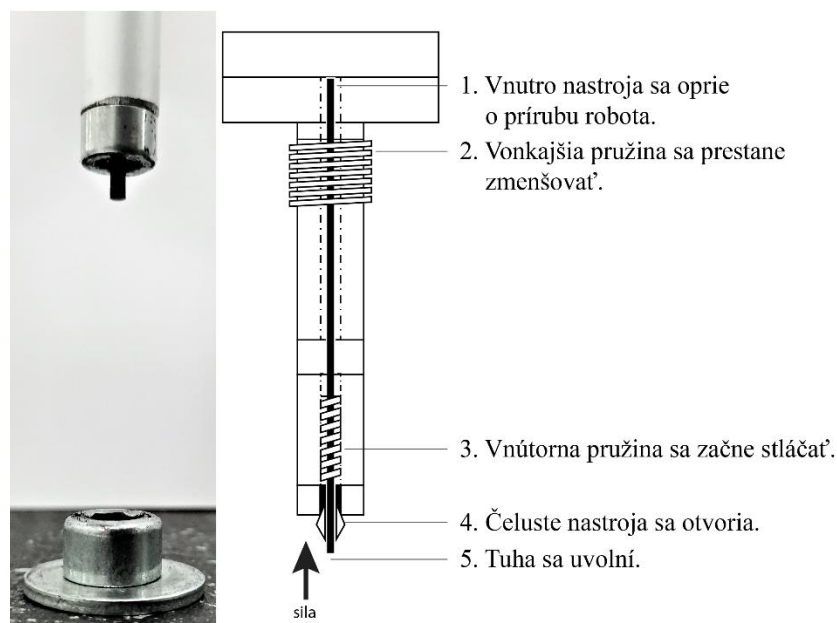
Konštrukcia je vyobrazená na Obr. 2. Pozostáva z kruhovej príruby nástroja, v ktorom je presne v strede vysústružený závit M8, na ktorý sa skrutkuje dutý nerezový piest. Po pieste sa kľže hliníkový obal, na ktorom je upevnená vonkajšia pružina, ktorá zabezpečuje pruženie nástroja. Na opačnom konci obalu je vnútorné osadenie (oceľová hmoždinka, rozperka), na ktoré je naskrutkovaná dutá imbusová skrutka s valcovou hlavou. Dovnútra nástroja je umiestnená tuha v kovovej rúrke s čeľuťami, ktoré držia grafit na mieste. Na čeľuste pôsobí vnútorná pružina, ktorá ich zatvára. Čeľuste sa opierajú o dutú skrutku, ktorej priemer otvoru je menší ako priemer otvoru čeľusti s grafitom. V prípade pôsobenia sily na grafitovú tuhu držia čeľuste pevnejšie. Konštrukcia nástroja umožňuje výmenu tuhy.



Obr. 2 Konštrukcia nástroja.

Dôležitou funkciou nástroja je mechanická kalibrácia grafitu, keďže proces kreslenia ho obrusuje. Proces kalibrácie (vyobrazený na Obr. 3) prebieha vytvorením maximálnej kompresie vonkajšej pružiny. Táto kompresia je vyvolaná robotom, ktorý oprie okraj nástroja o kalibračný prípravok umiestený v jeho pracovnom priestore. Počas plnej kompresie sa vnútro nástroja oprie o prírubu robota. Čím sa začne stláčať vnútorná pružina, ktorá pôsobí na čeluste. S pokračujúcou kompresiou sa čeluste naplno otvoria a grafitová tuha môže voľne vypadnúť do kalibračného prípravku. Následne robot zdvihne nástroj, čím sa znovu aktivuje vnútorná pružina, ktorá zamkne čeluste s nakalibrovanou tuhou. Kalibračný prípravok predstavuje imbusová skrutka s valcovou hlavou. Počas kalibračného procesu robot vykoná dodatočnú kompresiu nástroja, počas ktorej tlačí na grafit s cieľom dosiahnuť lepšie uzamknutie čeluste, a tak zabrániť pohybu grafitu v čelustiach počas kreslenia. Táto celá operácia je naprogramovaná metódou teach-in a uložená je ako funkcia, ktorú je možné vyvolať z generovaného programu.

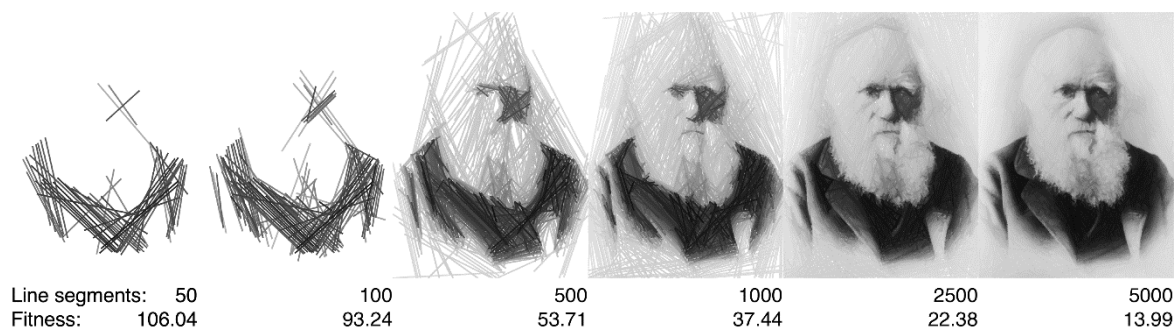
Skalibrovaný hrot grafitu presahuje 2,932 mm od čelustí nástroja. Táto hodnota umožňuje vytvoriť bezpečnú 8 mm kompresiu bez zlomenia alebo drobenia hrotu. Meranie dĺžky hrotu grafitu sa realizovalo desaťkrát posuvným elektronickým meradlom s priemernou odchýlkou 0,03995 mm.



Obr. 3 Proces kalibrácie.

3.2 Genetický algoritmus (GA)

K dispozícii sme mali už vytvorený genetický algoritmus naprogramovaný v jazyku Python, ktorý sme museli upraviť, aby sa dal použiť v robotickej aplikácii. Algoritmus pracuje v hlavnom cykle tak, že s každou genetickou optimalizáciou pridá jednu úsečku do generovaného obrazu. GA sa snaží minimalizovať fitness funkciu vypočítanú z rozdielu pôvodného obrazu a generovaného obrazu. Postupným mutovaním a selekciou vhodných prvkov (úsečiek) je vybraná tá najvhodnejšia, ktorá prispeje k najvýraznejšiemu zníženiu fitness funkcie. Každá úsečka má 4 gény predstavujúce dva body v dvojrozmernom priestore. Farebnosť každej úsečky je determinovaná na základe hodnôt farby z pôvodného obrázka.



Obr. 4 Postup evolúcie s pribúdajúcimi úsečkami.

Prostredie, v ktorom sa generujú úsečky, je nutné upraviť tak, aby sa napodobňovali reálne vlastnosti kreslenia grafitovou ceruzkou. Napríklad, keď umelec nakreslí čiaru s konzistentným prítlakom po už existujúcich čiarach, výsledný odtieň vznikne kombináciou už existujúcej čiary na danom mieste a aktuálnej nakreslenej čiary. V kapitole 3.5 sa venujeme práve tejto analýze, avšak v prípade prvotného prototypu sme sa rozhodli experimentovať už s existujúcimi zmiešavacími módm, ktoré sa dajú ľahko implementovať v dostupných knižniciach.

Zmiešavací mód je spôsob spojenia dvoch vrstiev do jednej [13], reprezentovaný funkciou $f(a, b)$. V našom prípade spodná vrstva a predstavuje generovaný obrázok, ktorý obsahuje súbor všetkých optimalizovaných úsečiek. Vrchná vrstva b obsahuje práve jednu úsečku, pri ktorej sa zisťuje jej príspevok k minimalizácii fitness funkcie. Zmiešavacích módov je viacero druhov. Tie základné, ktoré boli otestované v aplikácii, sú [13]:

- Normal – $f(a, b) = b$. Výsledný odtieň daného pixelu je hodnota najvyššej vrstvy. Tento režim nie je vhodný, pretože vytvára možnosť opravy. Ak na istom mieste bol použitý tmavší odtieň, aký je na pôvodnom obrázku, opätovne sa tento odtieň môže prekryť slabším odtieňom. Grafit sa v realite takýmto spôsobom neprejavuje.
- Multily – $f(a, b) = ab$. Výsledný odtieň daného pixelu je vynásobená hodnota oboch vrstiev. Výsledok bude vždy tmavší ako obe vrstvy. Tento režim sa tiež ukázal ako nevhodný, pretože pri prechode svetlejšej čiary a ponad svetlejší podklad, výsledný odtieň je násobne tmavší ako v skutočnosti.
- Darken – $f(a, b) = \min(a, b)$. Výsledný odtieň daného pixelu je minimálna hodnota jednej z vrstvy. Tento režim bol vybraný ako najvhodnejší. Raz, keď je na danom mieste istý odtieň, zmeniť sa dá iba prekrytím tmavším odtieňom. V kapitole 3.5.3 meriame viacnásobné zmiešavanie toho istého odtieňa grafitu. Zistili sme, že pri tmavších odtieňoch po druhej vrstve grafitu odtieň klesá minimálne.

3.3 Generovanie robotického programu

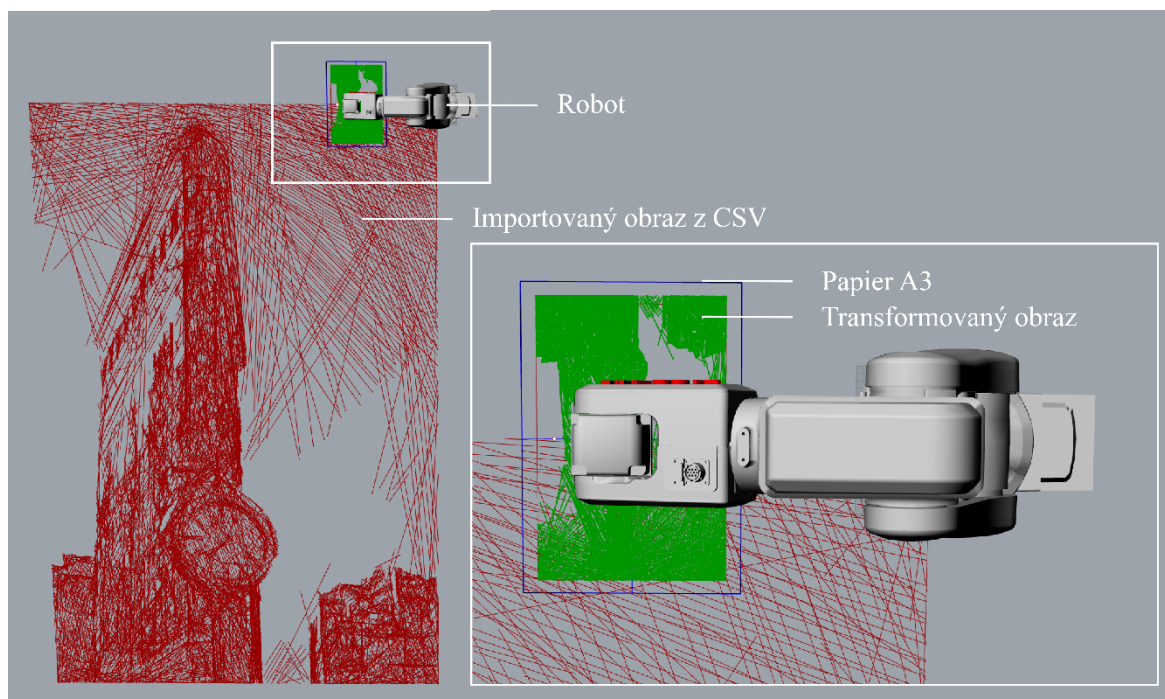
Výsledok generovania je roboticky program, ktorý je zložený zo série inštrukcii MoveL. Každá inštrukcia MoveL obsahuje nami zadané parametre na vykonanie lineárneho pohybu nástroja z aktuálnej pozície. Tieto parametre sú cieľový bod, rovina popisujúca spôsob dosiahnutia bodu nástrojom, rýchlosť nástroja a zone data. Tento proces generovania robotického programu, z výstupu GA, je zabezpečený v nasledujúcich krokoch:

1. Pasovanie dát z CSV a import netransformovaných dát do 3D prostredia Rhinoceros.
2. Transformácia a škálovanie čiar do pracovného priestoru robota.
3. Optimalizácia trajektórie.
4. Výpočet offsetu nástroja zo želaného odtieňa.
5. Spájanie čiar.
6. Naplánovanie vykonania kalibračných funkcií.
7. Generovanie RAPID kódu.

Generátor robotického programu je naprogramovaný v prostredí Grasshopper, ktorý je zásuvným modulom do NURBS modelovacieho programu Rhinoceros.

V prvom kroku, je CSV súbor importovaný a analyzovaný. Informácie o bodoch (x_a , y_a , x_b , y_b), ktoré opisujú úsečky sú vložené do 3d prostredia so súradnicou $z = 0$. Informácia o odtieni je uložená na neskoršie spracovanie. Rozsah odtieňov je (0, 255), 0 reprezentuje čiernu a 255 bielu farbu .

Takto importovaný obraz je v pôvodnom súradnicovom systéme ako bol generovaný. Je nutne ho otočiť o 180 stupňov a zrkadlovo transformovať. Potom je obraz posunutý a škálovaný do pracovného priestoru robota. To vykonáme za pomoci prekalibrovaného rámu v 3D priestore, do ktorého je grafika umiestnená. Algoritmus očakáva že vstupná grafika je orientovaná na výšku a preto grafiku rozťahne vždy do šírky. V prípade že grafika je vyššia môže presahovať cez kraj papiera. čo používateľ musí skontrolovať. Na Obr. 5 je celý proces znázornený. Do 3d prostredia importuje obraz 5th Ave, ktorý má šírku 2048 px v pôvodnom súradnicovom systéme. Obraz je importovaný 1px = 1mm na obrázku je znázornený červenou farbou. Zelený obrázok je už transformovaný a zmenšený do priestoru papiera. Treba si všimnúť, že transformovaný obrázok je menší ako papier A3 presne je zmenšený na 256 mm na šírku. táto hodnota bola špecificky vybraná ako násobok rozlíšenia 2048. V tomto pomere je aj definovaný pracovný nástroj, ktorý v realite vytvára čiaru šírky 2 mm, vo virtuálnom prostredí GA je reprezentovaná 16 pixelmi. Optimalizácia trajektórie je vykonaná heuristikou najbližšieho suseda.

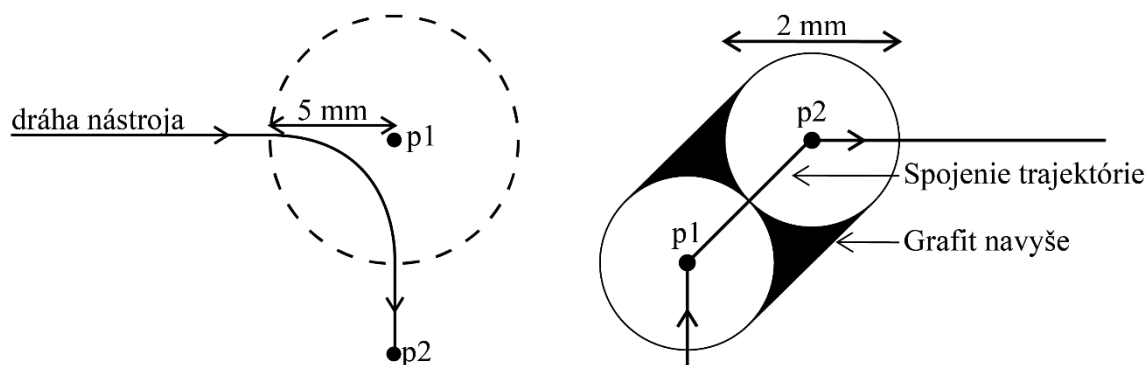


Obr. 5 Import a transformácia obrazu v 3D prostredí.

Nasledujúcim krokom je ofsetovanie úsečiek v z osi v negatívnom smere na základe informácii o odtieni. Čím tmavší odtieň je požadovaný tým viac musí robot pritlačiť na nástroj. Maximálny ofset $Ofset_{max}$ je nastavený na 8 mm reprezentuje čiernu farbu. Ofset zo želaného odtieňa $C_{odtieň}$ sa vypočíta na základe vzorca (3.1) Získaný ofset je následne aplikovaný na každú úsečku.

$$Ofset = Ofset_{max} - (Ofset_{max} / 255) * C_{odtieň} \quad (3.1)$$

Do reťazca bodov sú zaradené aj približovacie a ustupovacie (tranzitné) body, ktoré sú kópiou bodov opisujúce úsečky posunuté o 10 mm v kladnom smere osi z. Zistili sme, že niektoré tranzitné body sú redundantné, keďže body kreslených úsečiek sú blízko seba. S cieľom zefektívniť program pol pripravený algoritmus, ktorý rozhoduje o odstránení týchto bodov na základe parametra ich vzdialenosti. Tento parameter sme experimentálne nastavili na hodnotu 2 mm. Na Obr. 6 je vizualizovaný najhorší prípad spojenia úsečiek so vzdialenosťou 2 mm. P1 predstavuje ukončovaci bod úsečky P2 začiatočný bod novej úsečky čiernou farbou je znázornené množstvo grafitu navyše. Tento prípad skončí s 0,8584 mm plochy pokrytej grafítom navyše. V prípade kreslenia 5000 úsečiek tento algoritmus spoji približne jednu tretinu z nich. Pri vyššom počte úsečiek stúpa aj percento spojení. Heuristika najbližšieho suseda úsečky usporiada tak, aby trasa medzi tranzitnými bodmi bola čo najkratšia



Obr. 6 Vľavo nastavenie zone data, vpravo spájanie dvoch čiar

Počas kreslenia sa grafit obrusuje a skracuje čím sa menia fyzické rozmery nástroja. K potlačeniu tohto deja bola pripravená kalibračná funkcia popísaná v kapitole 3.1. Táto funkcia je cyklicky vykonávaná a je nastaviteľná parametrom počtu nakreslených čiar. Toto nastavenie má vysoký vplyv na celkový čas kreslenia a závisí od typu použitého grafitu a drsnosti papiera. Nami experimentálne zvolená hodnota je 20 nakreslených úsečiek, po ktorých sa vykoná kalibrácia. Toto nastavenie platí pri použití kancelárskeho papiera a pri grafit s tvrdosťou 7B.

Kalibračná funkcia sa dostáva do konfliktu s algoritmom so spájaním čiar. Tento problém bol vyriešený aplikovaním boolean masky s veľkosťou podľa počtu čiar, ktorá zabráni spojeniu čiar na mieste, kde je očakávaná kalibračná funkcia.

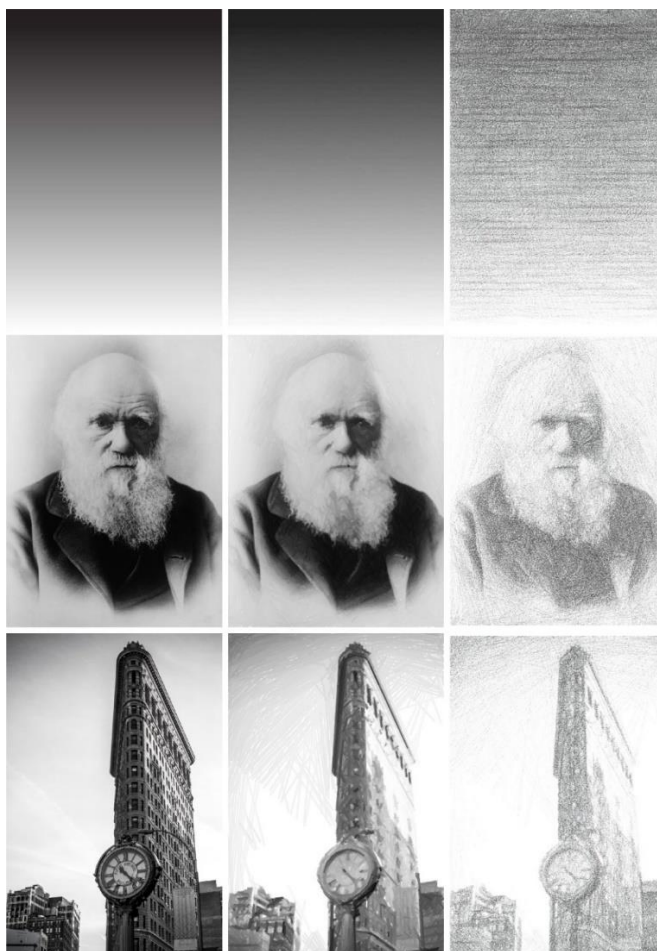
Posledným krokom je vytvorenie rapid kódu, jazyka použitej robotickej platformy. Vygenerované body sú transformované na roviny, vždy kolmé na os z. Orientácia týchto rovín hovorí o spôsobe, ako má robot dosiahnuť želaný bod pomocou nástroja. Roviny sú následne skonvertované na TCP body, ktoré obsahujú aj informáciu o rýchlosti nástroja a zone data. Rýchlosť je konštantne nastavená 100 mm/s. Zone data je parameter udávajúci, ako precízne má robot dosiahnuť želanú pozíciu. V našom prípade sme použili „z0“ alebo „fine“ na body úsečky a „z5“ na tranzitné body. Nastavenie „z0“ znamená, že robot musí dosiahnuť bod presne, pri „z5“ je dovolené riadiacej jednotke optimalizovať dráhu nástroja 5 mm pred dosiahnutím bodu, čím je výsledný pohyb robota súvislejší. Tento prípad je ilustrovaný na Obr. 6.

Používame zásuvný modul TacoABB do Grasshopperu na prevedenie týchto rovín do robotického kódu. Hlavnými funkciami TacoABB je generovaný kód simulovať, nahrávať kód priamo do riadiacej jednotky robota, spustiť a pozastaviť exekúciu robota.

3.4 Výsledky a meranie rôznych typov papierového média

Správanie systému bolo overené na troch obrázkoch (Obr. 7) s rozličnými vlastnosťami. Prvý je jednoduchý gradient od bielej po čiernu. Druhý obrázok je fotografia Charlesa Darwina, založená z gradientov bez nadmerných detailov. A tretí je detailná fotografia 5th Ave. Je očividné, že systém nedokáže kresliť detaily. Na časti obrazov, na ktorých je súvislý gradient, je GA vygenerovaný takmer identicky s originálom. Tuha s priemerom 2 mm predstavuje vo virtuálnom prostredí GA 16 pixelov, ak je gradient užší, bude reprezentovaný jeho najbeľšou zložkou. Robotický systém v tejto kapitole bol nastavený na maximálny prítlak 5 mm.

Pri obraze s gradientom pozorujeme horizontálne čiary, ktoré sú spôsobené vyššou koncentráciou úsečiek na danom mieste. Generátor pseudonáhodných čísel GA negeneruje čísla úplne náhodne. Zároveň zmiešavací mód „darken“ nespôsobí stmavnutie daného miesta a tým aj zhoršenie fitness funkcie, čo by viedlo k odstráneniu daného jedinca (úsečky). Kombináciou týchto dvoch faktorov vznikol daný efekt, ktorý je pozorovateľný aj meraním na Obr. 9. Na iných obrázkoch tento efekt nebol pozorovaný.



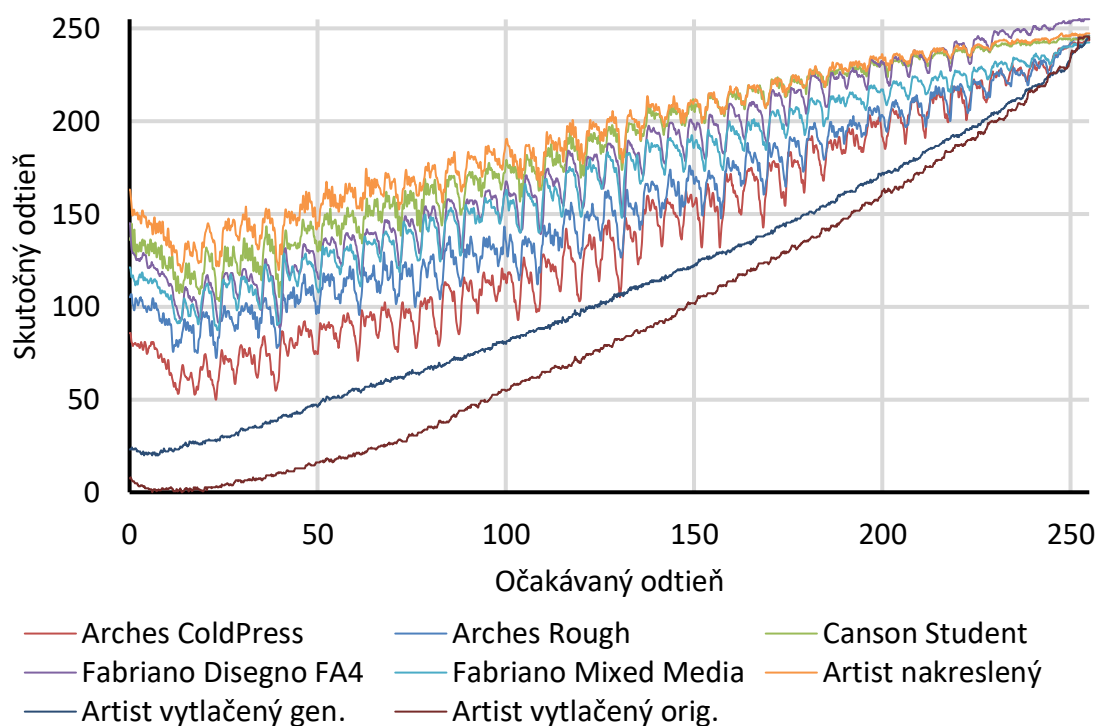
Obr. 7 Výsledky kreslenia systému – prvý obrázok zľava je pôvodný, v strede je výstup z genetického algoritmu, vpravo obrázok nakreslený fyzickým systémom.

Ďalšou časťou je overenie hodnovernosti odtieňov na šiestich rozličných papierových médiách. Každý papier má rozdielnu textúru a drsnosť, čo ovplyvňuje množstvo obrúseného grafitu a hĺbku výsledného odtieňa. Na každom papieri je nakreslený obraz s jednoduchým lineárnym gradientom, ktorý je zmeraný RGB kamerou v celom profile od bielej po čiernu. Výsledkom merania bolo pole hodnôt, popisujúce priebeh gradientu. Keďže výsledky merania variovali v závislosti od polohy, t. j., v ktorej časti obrazu sme merali, spriemerovali sme všetky pixely v riadku. Týmto krokom sme sa vyhli variáciám a výsledne pole obsahuje informáciu o gradiente celého obrazu. Proces, podmienky a nastavenie RGB kamery popisujeme v nasledujúcej kapitole 3.5.



Obr. 8 Vybrané papierové médiá s nakresleným testovacím obrazom.

Originálny a vygenerovaný obraz sme vytlačili na atramentovej tlačiarni, aby sme ho porovnali s nakreslenými obrazmi. Výsledky sú zachytené v Obr. 9. Získané dáta boli transformované v rozsahu (0, 255) s cieľom uľahčiť porovnanie výsledkov. Papiere majú rozličný odtieň bielej, čo spôsobuje, že nemajú rovnakú nameranú hodnotu bielej. Nakreslený gradient by mal byť lineárny. V Tab. 1 sú uvedené parametre z lineárnej regresie ku každému typu papiera.



Obr. 9 Graf merania gradientného obrázku na rozličných médiách.

Tab. 1 Lineárna regresia jednotlivých médií.

Názov	k	q	R ²
Arches ColdPress	-0,094719	234,2364	0,961797
Arches Rough	-0,08025	234,0071	0,96363
Canson Student	-0,072137	258,3852	0,966417
Fabriano Disegno FA4	-0,082113	259,8748	0,963044
Fabriano Mixed Media	-0,076021	245,7746	0,971205
Artist nakreslený	-0,063235	256,4454	0,966553
Artist vytlačený gen.	-0,10861	219,0435	0,985487
Artist vytlačený orig.	-0,123332	213,6974	0,971192

Z merania sme zistili, že vygenerovaný obraz z GA nie je taký intenzívny ako originál. To je spôsobené tým, ako GA vyberá odtieň každej úsečky. Analyzuje originálny obraz, v ktorom vyberie všetky pixely, cez ktoré prejde úsečka. Následne identifikuje pixel, ktorý má najbelší odtieň, ktorý je nastavený na generovanú úsečku. Týmto spôsobom

zabezpečujeme, aby sa GA nepomýlil a nezafarbil niektorý z pixelov odtieňom tmavším než želaným.

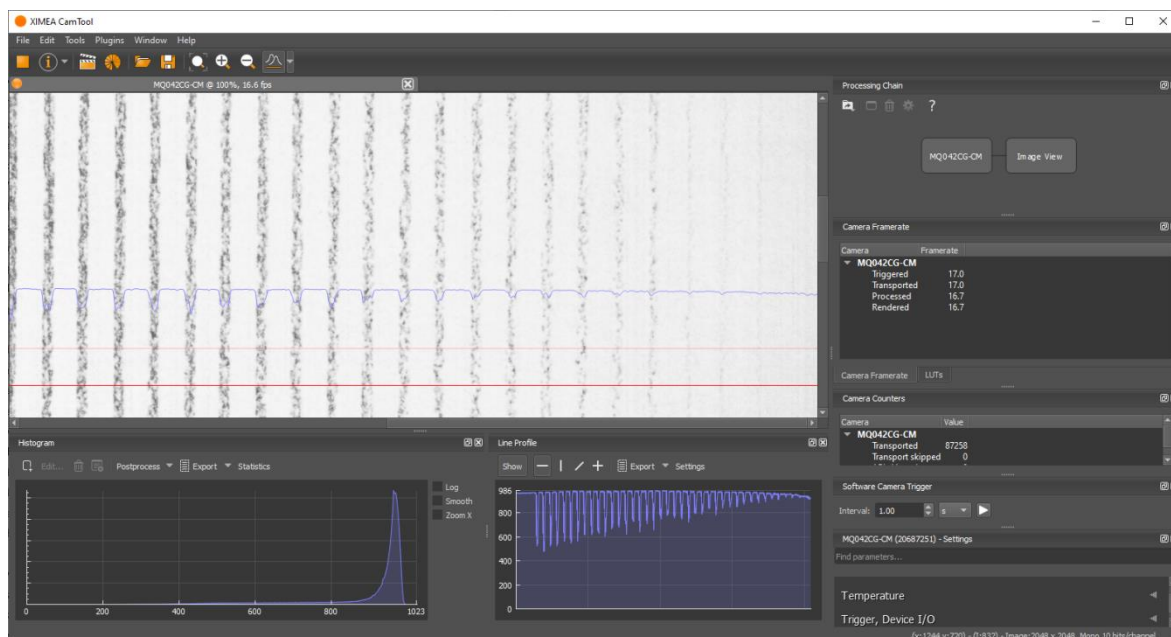
Najvhodnejším papierom je Arches ColdPress, ktorý má najbližší koeficient priamky k k vytlačeným originálom. Tento papier je vyrobený z bavlny a je na dotyk drsnejší ako celulóзовé papiere. Papier Arches Rough má textúru výraznejšiu, ktorá vytvára biele miesta, kam sa hrot grafitu nedokáže dostať, čím spôsobuje nižšiu intenzitu. Arches ColdPress dosahuje najhorší koeficient R^2 , lebo (už popisované) koncentrovanie úsečiek v tomto prípade vytvára najväčšie chyby.

Ku kraju okolo nuly vidíme, ako odtieň v každom prípade klesá, čo je spôsobené nižšou koncentráciou úsečiek.

3.5 Meranie odtieňa kreslených čiar

Táto kapitola je rozdelená na 3 hlavné sekcie, ktoré zodpovedajú 3 rozdielnym meraniam zameraným na zistenia vlastností grafitu pri jeho nanášaní na papier robotickým systémom. Tieto merania boli problematické z pohľadu presnosti a vyžadovali si niekoľkokrát zopakovať celý proces, až pokým sa nepodarilo odstrániť alebo aspoň minimalizovať chyby. Vytvorili sme parametrické generatívne programy v prostredí Rhinoceros a Grasshopper, ktoré nakreslili želané obrazce na papier. Kreslenie všetkých obrazcov prebiehalo v jeden deň. Robotický systém sme pred kreslením kalibrovali, pričom bol nahriaty z predchádzajúcej úlohy, aby sme zabránili zmenám v rámci presnosti a opakovateľnosti. Kalibračná rutina nástroja prebehla po každej úsečke, prípadne po každej druhej úsečke, aby sme zabránili nepresnostiam. Rýchlosť bola nastavená na 50 mm/s, čo je znížená rýchlosť. Tá by mala zlepšiť precíznosť robota.

Následne tieto obrazce sme skúmali RGB kamerou Ximea MQ042CG-CM. Merania sme realizovali počas jednej noci, aby sme zabránili svetelnej interferencii medzi meraniami. Merací priestor bol osvetlený trubicovými žiarivkami Polylux F36W/860 s teplotou 6400K. Žiarivky boli zapnuté 2 hodiny pred meraním, aby bol zabezpečený stály svetelný tok. Na kamere sme vykonali korekciu plochého poľa podľa inštrukcií výrobcu [12]. Automatické funkcie vyváženie bielej a časovanie expozície boli vypnuté. Expozícia bola nastavená na 60 ms, trojnásobok periódy 50 Hz blikania žiariviek. Clonu sme nastavili manuálne, aby merané odtiene sa nenachádzali blízko k okraju rozsahu kamery $<0,1024>$. Kamera snímala v režime najvyššieho rozlíšenia 2048 x 2048 pixelov a režim snímania bol nastavený na 16-bit mono. Kamera bola už 2 hodiny pred meraním pod napätím, aby zmena teploty interných komponentov nezmenila meranie.



Obr. 10 Príklad merania softwarom CamTool.

Meranie prebieha dostupným softwarom kamery CamTool, v ktorom využívame vstavané nástroje na analýzu obrazu. Všetky testy pozostávajú z rovnobežných čiar, ktoré zmeriame profilom orientovaným kolmo na čiary. Tento profil vracia pole hodnôt pixelov s veľkosťou 2048, ktoré sa nachádzajú pod profilom. Keďže grafít sa neotiera všade rovnako, meranie sme zintenzívnili pridaním algoritmu na spriemerovanie, ktorý spracuje hodnoty 50 pixelov z každej strany profilu. Príklad merania je na Obr. 10. Hrubá červená čiara prezentuje merací profil, tenšie čiary po okrajoch predstavujú limity algoritmu na spriemerovanie a modrá čiara výsledok merania.

Súčasťou meraní je skúmanie maximálneho odtieňa, ktorý môže dosiahnuť robotický systém. Každé meranie je preškálované na rozsah 0 až 255, pričom 0 predstavuje maximálny dosiahnutý odtieň a 255 biely papier. Preškálovanie sa vykonalo s cieľom zlepšiť porovnanie meraní medzi sebou pred ich následným spracovaním.

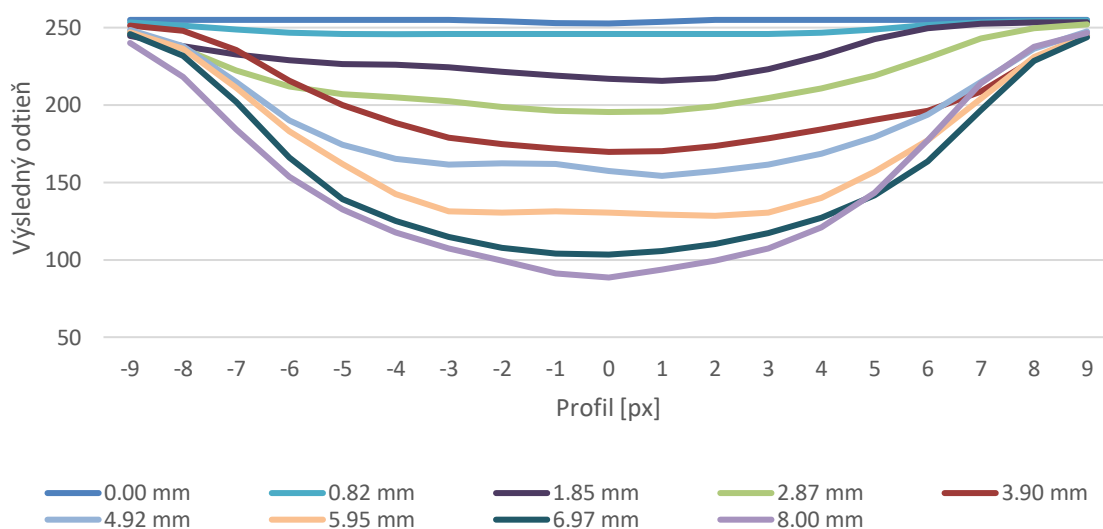
Pri meraní sme použili papier Fabriano Mixed Media s gramážou 250g/m² a s rozmerom A3. Tento papier sme vybrali na základe hrúbky, štruktúry papiera a schopnosti obrusovať grafít. Každý papier má iné vlastnosti, a preto nie je každý vhodný na použitie v robotickej aplikácii.

3.5.1 Meranie odtieňa a profilu čiary

Toto meranie je vytvorené s cieľom zistiť vlastnosti odtieňov čiar pri rozdielnych prítlakoch – od minimálneho (0 mm) po maximálny (8 mm). Parametrický testovací program bol nastavený na vytvorenie 40 jednoduchých čiar s postupným zvyšovaním

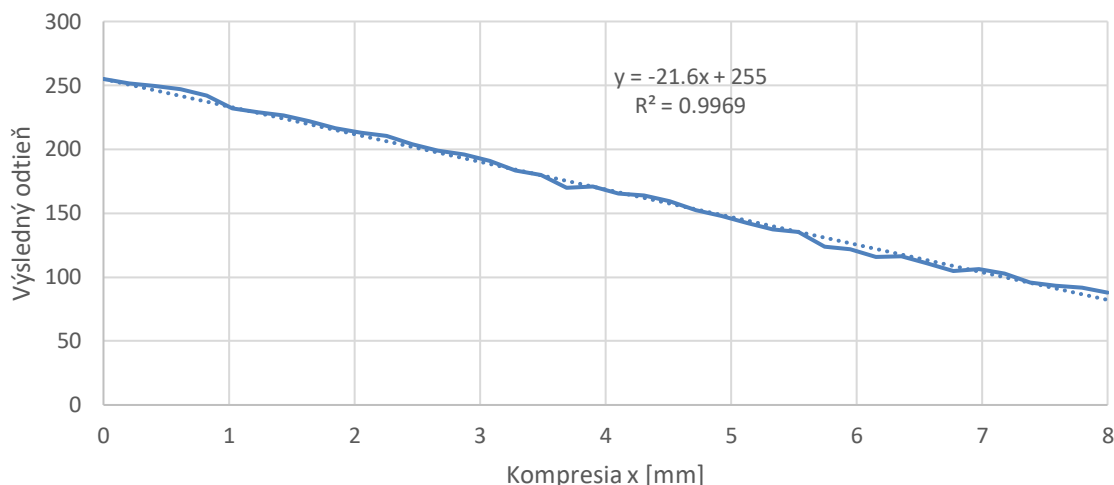
prítlaku. Keďže kamera sníma profilom, ktorý je kolmý na čiary, mohli sme získať aj informáciu o profile čiar, ktoré pozostávajú z 19 pixelov. Profil čiar nie je v celej ich šírke rovnaký, stráca sýtosť pri krajoch. Tuha, ktorú používame, má kruhový prierez a pri kreslení je nastavená vždy kolmo na papier. Preto papier, ktorým prejde stred tuhy, sa dostane do kontaktu s grafitom intenzívnejšie ako pri okrajoch tuhy.

Hodnoty v grafe na Obr. 11 sme získali zopakovaním šiestich rôznych meraní, pri ktorých sme papier posunuli na iné miesto. Dáta sme ručne porovnávali tak, aby jednotlivé profily merania čiar na seba sedeli. Potom sme jednotlivé merania spriemerovali. Takýmto spôsobom sme získali 40 profilov čiar pozostávajúcich z 19 pixelov. Aby sme zjednodušili zobrazenie, v grafe sa nachádza profil každej piatej čiary.



Obr. 11 Namerané profily čiar s rôznym prítlakom.

Hodnoty v grafe na Obr. 12 sme získali ďalším spracovaním dát a spriemerovaním 5 stredných hodnôt profilu čiary. Dáta boli aproximované lineárnou trendovou čiarou tak, aby prechádzala hodnotou (0, 255). Koeficient determinácie má hodnotu $R^2 = 0,9969$.



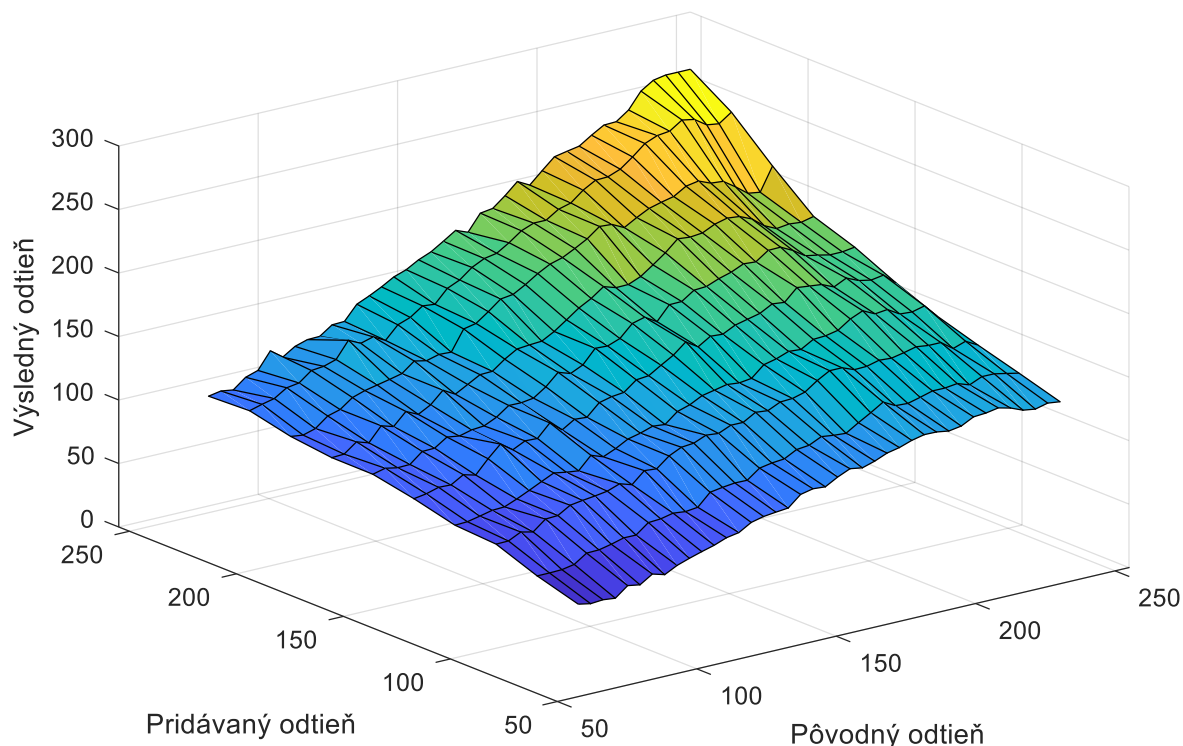
Obr. 12 Meranie maximálneho odtieňa čiary.

Zistenia a závery merania:

- Rozloženie grafitu naprieč profilom čiary nie je rovnaké. V záujme lepšieho výsledku genetického algoritmu môže byť vhodné implementovať funkciu simulujúcu takúto činnosť (priebeh úkonov).
- Grafít sa so stúpajúcou kompresiou obrusuje lineárne. Robot by mohol používať aj vyššie prítlaky, pokiaľ zvýšenie tlaku prinesie tmavší odtieň. Avšak konštrukcia nástroja neumožňuje použiť väčší prítlak bez toho, aby sa nepoškodil hrot grafitu.

3.5.2 Meranie zmiešavania dvoch vrstiev grafitu

Pri nasledujúcom testovaní sme zisťovali správanie systému pri kombinovaní rôznych prítlakov. Parametrický testovací program bol nastavený na vytvorenie 40 jednoduchých čiar s postupným zvyšovaním prítlaku ako v predchádzajúcom teste. Po dokončení jednej podkladovej čiary ju robot prekryva druhou čiarou, ktorá je rozdelená na 10 diskretných segmentov s lineárne rozdelenými prítlakmi. Týmto spôsobom získame 400 hodnôt, ktoré sú rovnomerne rozložené medzi celým spektrom možných vrstiev. Tento test je nakreslený 3-krát a aj každá hodnota z papiera sa 3-krát odčítava na rozdielnych miestach. Merací profil kamery bol nastavený identicky ako pri predchádzajúcom meraní. Profily čiar sme porovnávali ručne, aby sedeli na seba. Potom sme týchto 9 meraní spriemerovali. Finálnu hodnotu z daného meracieho segmentu sme získali spriemerovaním 5 stredných hodnôt profilu čiary rovnako ako v predchádzajúcom meraní.



Obr. 13 Meranie zmiešavania dvoch vrstiev grafitu.

Získané dáta sú zobrazené na Obr. 13. Hodnoty odtieňov osí x a y sme získali z modelu z merania z kapitoly 3.5.1. podľa rovnice (3.2).

$$\text{Odtieň} = 255 - 21.6 * \text{Offset} \quad (3.2)$$

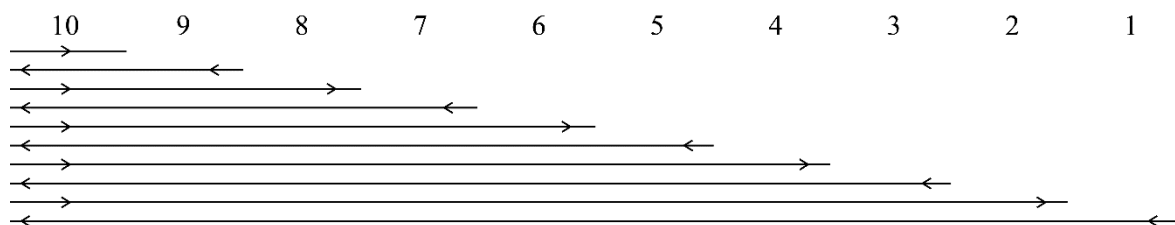
Zistenia a závery merania:

- Získaný čiastočný model zmiešavania nefunguje lineárne. Hlavne pri kombinácii pôvodného odtieňa v rozsahu (240; 255) a pridávaného odtieňa v rozsahu (150; 250). Tento efekt je spôsobený zníženou schopnosťou papiera absorbovať grafít. Preto výsledný odtieň klesá rýchlejšie tam, kde pôvodný odtieň nie je žiadny alebo je len minimálny. So zvyšujúcim sa pridávaním odtieňa a pôvodným odtieňom sa tento efekt stráca.
- Gradient klesania výsledného odtieňa je vyšší tam, kde je papier menej zničený, resp. kde bol naň aplikovaný nižší tlak [10].

3.5.3 Meranie zmiešavania viacerých vrstiev grafitu

Meranie sme realizovali podobným spôsobom ako v predchádzajúcich kapitolách. Opäť sme kreslili 40 čiar rozdelených na 10 segmentov, čo činí spolu 400 hodnôt. Každý segment na čiare je prekrytý o jedno prekrytie grafitom navyše oproti susednému

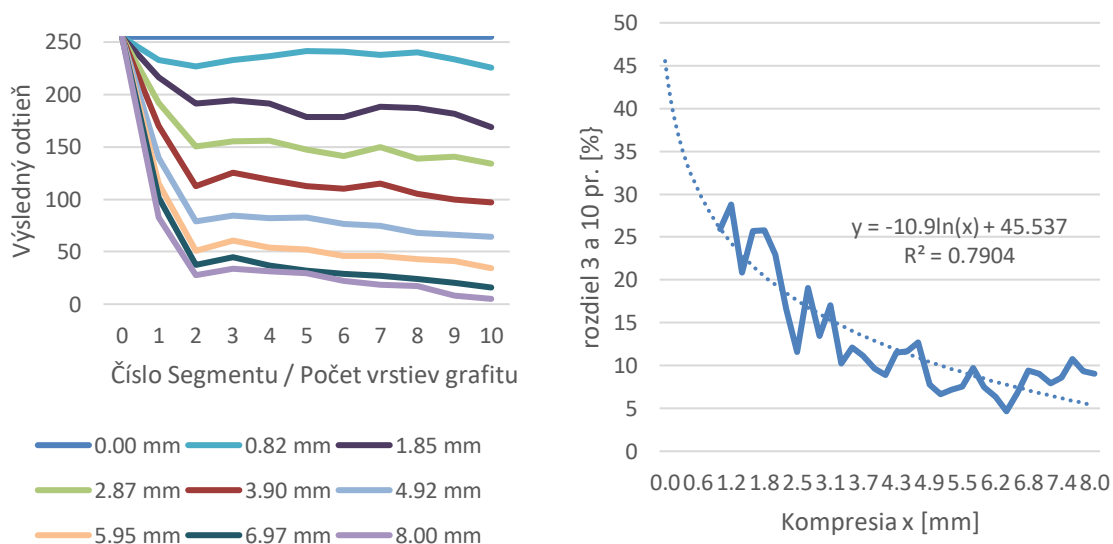
segmentu. Trajektórie jednej čiary sú znázornené na Obr. 14. Robot v poslednom 10 segmente prejde po tom istom mieste 10-krát. Po každej zo 40 čiar sa prechádza rovnakým tlakom, respektíve ofsetom nástroja. Robot trajektórie reverzuje, aby sa zabezpečilo rovnomerné opotrebovanie tuhy grafitu a zníženie času testovania.



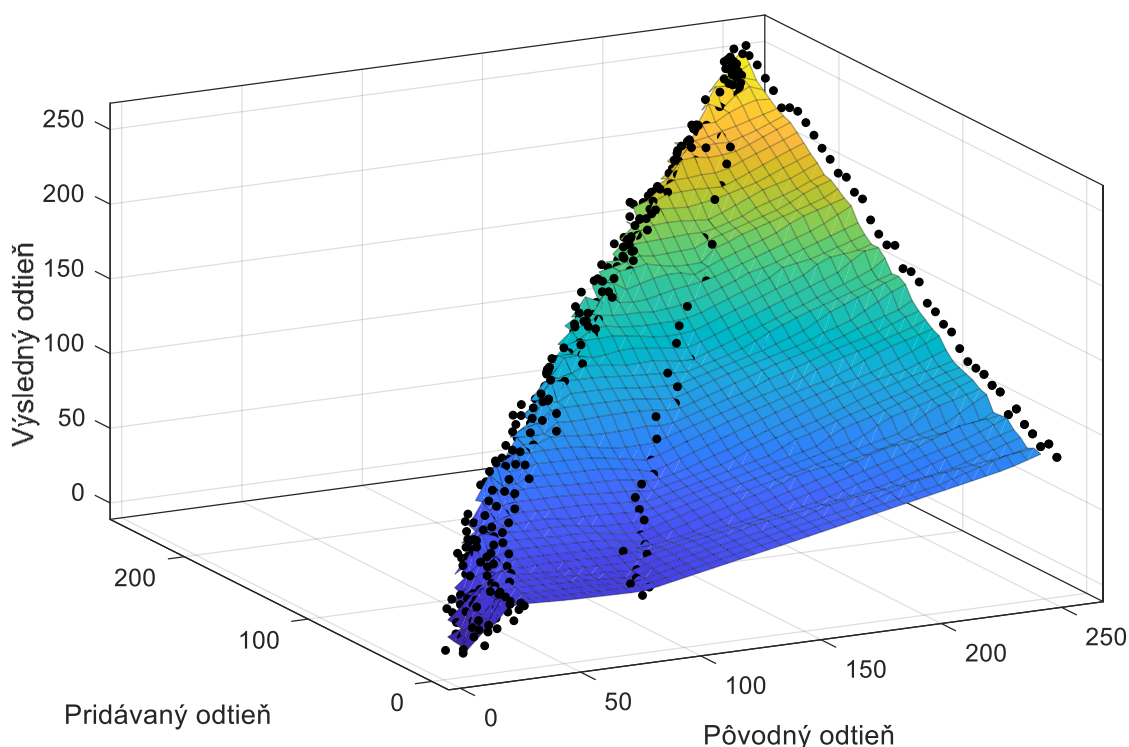
Obr. 14 Konštrukcia jednej čiary, rozdelenie na segmenty s vyznačením trajektórie robota.

Tento test je nakreslený 3-krát a každá hodnota sa z papiera odčítala 3-krát na rozdielnych miestach. Merací profil kamery je nastavený identicky ako pri predchádzajúcom meraní. Profily čiar sme porovnávali ručne, aby sedeli na seba. Následne sme týchto 9 meraní spriemerovali. Finálnu hodnotu z daného meracieho segmentu sme získali spriemerovaním 5 stredných hodnôt profilu čiary rovnako ako v predchádzajúcom meraní.

Na zobrazenie do grafu sa pri pridávanom odtieni znova používa model a dáta podľa rovnice (3.2). Na pôvodný odtieň sa používajú namerané dáta z predchádzajúceho segmentu na čiare, ktorý by mal reprezentovať pôvodný (podkladový) odtieň.



Obr. 15 Priebeh zvyšovania vrstiev grafitu pri rozdielnych prítlakoch.



Obr. 16 Meranie zmiešavania viacerých vrstiev grafitu.

Zistenia a závery merania:

- Namerané dáta vytvorili tri lúče, prvý zľava reprezentuje prvý segment, v ktorom robot prechádzal po čiare raz. Druhý lúč reprezentuje druhý segment a tretí všetky ostatné merania. Prvé dve vrstvy grafitu majú najväčší vplyv na odtieň.
- Na základe merania sme získali maximálny odtieň, ktorý vznikol kombináciou 10 vrstiev grafitu s vysokým prítlakom. Získanú informáciu sme využili pri spracovaní ostatných meraní.
- Na Obr. 15 je graf postupného zvyšovania vrstiev pri rozličných prítlakoch. Vidíme, že odtieň s 3 až 10 vrstvou nemá až taký vplyv na výsledný odtieň. V priemere medzi 3 a 10 vrstvou je rozdiel o 17,88 bodu odtieňa so štandardnou odchýlkou 4,8. Percentuálne vyjadrenie je na grafe Obr. 15 a pohybuje sa v rozmedzí od 4,66 po 28,79 percenta. Percentuálny rozdiel je vyšší v súvisi s vyšším prítlakom. Prvých 5 prítlakov nebolo zahrnutých do porovnávania, keďže robot pri nich dosahoval značné nepresnosti a dáta obsahovali vysokú chybovosť.

4 Prínosy dizertačnej práce

- Práca rieši nasadenie a použitie robotov aj do iných odvetví, ako je priemysel. Opisuje aplikácie zamerané na oblasť stavebníctva a umenia, čo je možné práve vďaka generatívnemu prístupu.
- Práca prináša pohľad na rozširovanie schopnosti robotov generátormi kódu a na ich budúce využívanie vo flexibilnej výrobe.
- Prináša nový prístup ku generovaniu trajektórie v dvojrozmernom priestore pre robotický manipulátor za pomoci genetických algoritmov. Rozšírením algoritmu do tretieho rozmeru vznikajú nové možnosti použitia.
- Práca skúma zmiešavanie grafitových vrstiev na papieri. Získané dáta sa môžu využiť pri ďalšom výskume NPR (non-photorealistic rendering). Tento výskum je dôležitý aj z pohľadu aplikácie kreslenia grafitovou tuhou pri generovaní programu genetickým algoritmom.
- V práci je navrhnutý a analyzovaný unikátny pasívny pružný nástroj s grafitovým efektorom. Tento výskum môže poslúžiť aj ako inšpirácia pri budúcich návrhoch, ale aj pri parametrizácii riadenia silovo-momentovým snímačom.
- Obrazy vytvorené generatívnym programovaním a nakreslené robotom majú aj umeleckú hodnotu. Každý vytvorený obraz má svoj špecificky umelecký štýl, ktorý sa odvíja od naprogramovaného generátora. Tak ako ťahy štetcom identifikujú maliara, rovnako môžeme identifikovať typ generátora a umelca, ktorý ho naprogramoval.
- Práca prináša prehľad architektúr, aplikácií, algoritmov, metód a postupov, ktorými sa dá inšpirovať a stavať na ich základe ďalších aplikácií v budúcnosti.
- Práca rozoberá možnosti a nové postupy s meraniami gravírovania so šesťosím robotom neznámeho objektu umiestneného v jeho pracovnom priestore.
- Výsledky spojené s aplikáciou gravírovania sa použili v projekte IZVAR (ŽoNFP: NFP313010P386), s víziou do budúcnosti toto riešenie použiť komerčne.

Záver

V práci sme opísali rôzne techniky, algoritmy, generovania trajektórie a programu pre robotický manipulátor. Benefitom vytvorenia takého generátora je rozšírenie schopností robota napríklad v podobe vyššej flexibility výroby, keďže generátor používa digitálne dáta na vytvorenie programu a lepšie sa adaptuje na zmeny v prostredí. Robot sa dokáže efektívnejšie a kreatívnejšie rozhodovať v porovnaní s klasickým online programovaním. Prípadne po vytvorení GUI môže generátor obsluhovať operátor po zaučení bez nutných znalostí programovania robotov. Tým sa zvyšuje potenciál opakovateľnosti riešenia aj na iných pracoviskách.

Samozrejme, tento prístup nesie aj negatíva v podobe nutnosti vyšších nákladov na vývoj týchto generátorov. Nutná je expertná pracovná sila, ktorá má potrebné znalosti a skúsenosti s prácou s robotickými systémami. Každý generátor je unikátny, musí sa naprogramovať na špecifický proces so špecifickými nástrojmi a snímačmi.

V praktickej časti tejto práce sme vytvorili 4 rozličné aplikácie využiteľné v rozdielnych odvetviach, ako je umenie a kultúra, stavebníctvo a, samozrejme, priemysel. Vytvorenie návrhu týchto aplikácií je kreatívna činnosť, ktorá si vyžaduje skúsenosti a znalosti na základe dostupných algoritmov a princípov ich fungovania. Implementácia je aj časovo náročná, pretože aby generátor fungoval stopercentne, je nutné vykonať extenzívne testovanie s rozličnými vstupnými dátami na fyzickom systéme.

V dizertačnej práci sa podarilo vytvoriť jedinečný systém kreslenia grafitovou tuhou, ktorý používa rozdielne stupne prítlaku na vytvorenie odtieňov na papieri. Ťahy sú generované genetickým algoritmom, ktoré sú potom transformované na pohybové inštrukcie, ktoré vykonáva robot. Podľa našich vedomostí je tento spôsob robotickej kresby prvý svojho druhu.

Úspechom je aj otestovanie robotického gravírovania neznámeho objektu. Aplikácia využíva 3D snímač na určenie približnej polohy objektu a v druhej fáze meria korekcie laserovým snímačom. Po získaní korekcií sa trajektória robota zmení, aby sa zachovala konštantná vzdialenosť nástroja od obrobku. Táto aplikácia je vyvinutá s podporou projektu IZVAR a výsledky môžu byť použité v praxi.

Literatúra

- [1] PAN, Zengxi et al. Recent progress on programming methods for industrial robots. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2012, vol. 28, no. 2, s. 87–94.
- [2] *Metrolog x4*. In *Metrologic Group* [online] [cit. 27.07.2021]. Dostupné na internete: <https://www.metrologicgroup.com/metrolog-x4/>
- [3] BLANK, Andreas et al. 6DoF Pose-Estimation pipeline FOR texture-less industrial components in Bin Picking Applications. In *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. 2019
- [4] KROT, Kamil, KUTIA, Vitalii. Intuitive methods of industrial robot programming in advanced manufacturing systems. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018, s. 205–214.
- [5] ISMAYUZRI, I., FISHER J., LAROCHEELLE P.: *Robot Arm Platform for AdditiveManufacturing: Multi-Plane Printing*. Florida Institute of Technology, Melbourne, 05/2016.
- [6] SHOKROLLAHI N., SHOJAEI, E.: *Experimental comparison of iso scallop, iso planar and iso parametric algorithms in machining sculptured surfaces*. 2014.
- [7] CEWU LU,, THE CHINESE UNIVERSITY OF HONG KONG et al. *Combining sketch and tone for pencil drawing production*. In *Combining sketch and tone for pencil drawing production | Proceedings of the Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering* [online] [cit. 08.08.2021]. Dostupné na internete: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2330147.2330161>
- [8] TONG, Zhengyan et al. *Sketch generation with drawing Process guided by VECTOR flow and grayscale*. In *arXiv.org* [online] [cit. 09.08.2021]. Dostupné na internete: <https://arxiv.org/abs/2012.09004>
- [9] SOUSA, Mario Costa, BUCHANAN, John W. Computer-Generated graphite Pencil rendering of 3D polygonal models. In *Computer Graphics Forum*. 1999, vol. 18, no. 3, s. 195–208.

- [10] SOUSA, Mario Costa, BUCHANAN, John W. *Observational Models of Graphite Pencil Materials*. In *Wiley Online Library* [online] [cit. 30.06.2021]. Dostupné na internete: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-8659.00386>
- [11] KERN & SOHN GMBH. *Operating Manual Precision Balance*. In [cit. 30.06.2021]. Dostupné na internete: <https://dok.kern-sohn.com/downloads/de/PCB%206000-0/file/PCB-BA-e-1718.pdf>
- [12] XIMEA. *xiQ USB 3.0 camera series Technical Manual*. In [cit. 01.07.2021]. Dostupné na internete: <https://www.ximea.com/products/usb3-vision-cameras-xiq-line/mq042cg-cm>
- [13] In *Compositing and Blending Level 1* [online] [cit. 07.07.2021]. Dostupné na internete: <https://www.w3.org/TR/compositing/>

Zoznam publikačnej činnosti autora

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 ADAMÍK, Michal - BABINEC, Andrej. Generovanie trajektórií pre robotický manipulátor na báze vektorovej grafiky. In *Automa*. Roč. 23, č. 2-3 (2017), s. 78-79. ISSN 1210-9592.

ADE02 DEKANOVÁ, Martina - DUCHOŇ, František - PÁSZTÓ, Peter - ADAMÍK, Michal - KLÚČIK, Marian. Mobile robot localization and path planning in Open Street Map. In *GRANT Journal [elektronický zdroj]*. Vol. 7, Iss. 1 (2018), s. 134-136. ISSN 1805-062X.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 ADAMÍK, Michal - BABINEC, Andrej - CHOVANEC, Ľuboš. Tool path generator for artistic drawing with industrial robot. In *ISMCR 2019 : IEEE International Symposium on Measurement and Control in Robotics. Houston, USA. September 19-21, 2019*. Danvers : IEEE, 2019, Art. no. C2-3-1 [4] s. ISBN 978-1-7281-4899-1. V databáze: IEEE: 8955707 ; WOS: 000533907200024 ; DOI: 10.1109/ISMCR47492.2019.895570.

AFC02 DEKANOVÁ, Martina - DUCHOŇ, František - PÁSZTÓ, Peter - ADAMÍK, Michal. Localization and path planing in Open Street Map. In *QUAERE 2018 [elektronický zdroj] : Roč. VIII : Interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů a odborných asistentů. Hradec Králové, Česká republika. 27.-29. června 2018*. Hradec Králové : Magnanimitas, 2018, CD-ROM, S. 1476-1482. ISBN 978-80-87952-26-9.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

BDF01 SLODIČÁK, Bohumil - KONEČNÝ, Maroš - BARŠOVSKÝ, Michal - ADAMÍK, Michal. Riadenie technológie tunelov Ovčiarsko a Žilina, 1. časť. In *Inžinierske stavby*. Roč. 67, č. 5 (2019), s. 42-44. ISSN 1335-0846.

BDF02 SLODIČÁK, Bohumil - KONEČNÝ, Maroš - BARŠOVSKÝ, Michal - ADAMÍK, Michal. Riadenie technológie tunelov Ovčiarsko a Žilina, 2. časť. In *Inžinierske stavby*. Roč. 67, č. 6 (2019), s. 62-64. ISSN 1335-0846.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADE	Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch	2
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	2
BDF	Odborné práce v ostatných domácich časopisoch	2
Súčet		6

V review procese

ADC ADAMÍK, Michal – GOGA, Jozef – PAVLOVIČOVÁ, Jarmila – BABINEC, Andrej - SEKAJ Ivan. Fast robotic pencil drawing based on image evolution by means of genetic algorithm in *Robotics and autonomous systems*