

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

**VIRTUÁLNE MEZZOTINTOVÉ TECHNIKY
RENDROVANÉ FYZIKÁLNYM MODELOM**

Diplomová práca

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

VIRTUÁLNE MEZZOTINTOVÉ TECHNIKY RENDROVANÉ FYZIKÁLNYM MODELOM

Diplomová práca

Študijný program: Aplikovaná informatika
Študijný odbor: 2511 Aplikovaná informatika
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej informatiky
Školiteľ: prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.

Bratislava, 2019

Bc. Eva Kunovská



ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Eva Kunovská
Študijný program: aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: aplikovaná informatika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Virtuálne mezzotintové techniky renderované fyzikálnym modelom
Physical based shader to achieve Virtual Mezzotint Techniques

Anotácia: Mezzotint je ritinová technika do medených platní objavená v Európe počas stredoveku. Povrch je zdrsnený rôznymi oceľovými nástrojmi, ako sú rydlá, poltónové hrebene. Na vytváranie mnohých bodov sa používa šidlo, zatiaľ čo pichliače vystupia z dosky. Pichliače držia dodatočný atrament a vytvárajú mierne machule a rozmazanie pri tlači. Po zdrsnení je doska zbavená prebytočnej farby, aby sa kontrolovala zostávajúca farba okolo pichliačov. Vyškrabané časti vytvárajú polotóny na tlači. Ak chce umelec dosiahnuť jasnejšie tóny, doska je leštená pomocou horáka. Ako výsledok týchto procesov získava mezzotintová tlač graduovaný efekt od čiernej až po bielu. Všeobecne platí, že ide o veľmi časovo náročný proces umelcov, (napríklad s doskou s rozmermi 50 x 65 cm práca trvá približne 30 až 40 dní).

Cieľ: The aim of the thesis is to design and implement virtual mezzotint comfortably for non-professional users. Another goal is to generate nearly realistic print results on images.

Literatúra: Virtual Mezzotint using a Model-driven Strategy
dl.acm.org/ft_gateway.cfm?id=1186992&ftid=394228&dwn=1&CFID...

Virtual mezzotint using a model-driven strategy - ACM Digital Library
dl.acm.org/citation.cfm?id=1186992&CFID=793699027&CFTOKEN=68496417

Physical Model to Achieve Virtual Mezzotint - J-Stage
https://www.jstage.jst.go.jp/article/imt/2/3/2_3_849/_pdf
by D Tasaki - 2007 - Cited by 1 - Related articles

Model-driven Virtual Mezzotint Techniques - DataCite Search
<https://search.datacite.org/works/10.2312/EGS.20051016>

Model-driven Virtual Mezzotint Techniques. Daisuke Tasaki, Shinji Mizuno & Minoru Okada. Work published 2005 via The Eurographics Association. EG Short ...

An improved physical model for virtual mezzotint - ResearchGate
www.researchgate.net/.../240319954_An_improved_physical_model_for_virtual_mezz...



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Kľúčové

slová: Počítačová grafika, 3D realizmus, Medenná ritina

Vedúci: prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.

Katedra: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky

Vedúci katedry: prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.

Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce:

bez obmedzenia

Dátum zadania: 26.09.2017

Dátum schválenia: 26.09.2017

prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Čestne prehlasujem, že túto diplomovú prácu som vypracovala samostatne len s použitím uvedenej literatúry a za pomoci konzultácií u môjho školiteľa.

Bratislava, 2019

.....

Bc. Eva Kunovská

Pod'akovanie

Ďakujem svojmu vedúcemu diplomovej práce prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD. za pripomienky a hodnotné rady pri tvorení a spracovaní tejto práce.

Abstrakt

Bc. Eva Kunovská: **Virtuálne mezzotintové techniky rendrované fyzikálnym modelom.**

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity

Komenského v Bratislave.

Katedra aplikovanej informatiky.

Vedúci diplomovej práce: prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD. – Bratislava, 2019.

Cieľom diplomovej práce je vytvoriť aplikáciu, ktorá simuluje proces techniky mezzotintu. Jedná sa o techniku hĺbkotlače, ktorá je časovo náročná, robí sa ručne a využívajú sa ostré kovové nástroje. Takýto proces obnáša vytvorenie dosky, ktorá má v sebe vyhlbený obrazec. Následne treba povrch potrieť farbou a zmývať ju, aby sa vytvorili tieňovania. Posledný krok je otláčenie farby na papier. V našom simulačnom procese sme dosiahli nasledovné nové výsledky: namodelovali sme platňu pomocou virtuálnych nástrojov, handru, tlač, difúziu a zasychanie farby počas tlače.

Kľúčové slová: Mezzotint, Hĺbkotlač, Počítačová grafika, Medenná rytina

Abstract

Bc. Eva Kunovská: **Physical based shader to achieve Virtual Mezzotint Techniques.**

Faculty of Mathematics, Physics and Informatics

Comenius University, Bratislava.

Department of applied informatics.

Supervisor: prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.– Bratislava, 2019.

The aim of the master thesis is to create an application that simulates the process of the mezzotint technique. It is a gravure printing technique that is time consuming, whole process is hand-made, and sharp metal tools are used. Such a process involves the creation of a plate that has a design on surface. Subsequently, the surface must be dyed and discolored to create shading. The last step is to squeeze the color on the paper. In our simulation process, we have achieved the following new results: we modeled the plate using virtual tools, clout, printing, diffusion and drying of the ink during printing.

Keywords: Mezzotint, Gravure printing, Computer graphics, copper engraving

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivácia	1
1.2	Ciele práce	2
1.3	Štruktúra práce	2
2	Hĺbkotlač, technika Mezzotint	4
2.1	Vytvorenie vzoru na platni	4
2.2	Vyhladzovanie platne a vytvárania obrazca	6
2.3	Nanesenie farby a tieňovanie	7
2.4	Vytvorenie obrazu	8
3	Prehľad problematiky	9
3.1	Virtuálna metóda suchej ihly pomocou modelovej stratégie	9
3.2	Fyzikálny model na dosiahnutie virtuálneho mezzotintu	10
3.3	Modelové virtuálne mezzotintové techniky	11
4	Formulácia problému	12
5	Definícia problému	14
5.1	Definícia jednotiek modelu	14
5.2	Virtuálny model mezzotintu	15

<i>OBSAH</i>	<i>x</i>
5.2.1 Model platne	15
5.2.2 Model farby	15
5.2.3 Model handry	16
5.2.4 Model papiera	17
6 Návrh riešenia	19
6.1 Diskrétné modely nástrojov	19
6.1.1 Model na zdrsnenie povrchu	20
6.1.2 Model brúsenia povrchu	25
6.1.3 Modely pre škrabanie povrchu	27
6.1.4 Model leštenia povrchu	31
6.2 Proces natretia farbou	33
6.3 Stieranie farby	33
6.4 Otláčanie farby na papier	35
6.4.1 Difúzia	36
6.4.2 Zasychanie	37
7 Implementácia	38
7.1 Použité technológie	38
7.2 Triedy modelu	39
7.3 Vizualizácia platne v blendri	45
7.4 Rozhranie aplikácie	47
8 Výskum a výsledky	49
9 Záver	62

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivácia

Mezzotint je veľmi zaujímavá technika z odvetvia polygrafie. Ide o spôsob tlače, kedy sa obraz na papier otláča do vyhlúbenej platne natretej farbou. Je pomerne staršia, nakoľko sa používa od 18. storočia, ale stále sa využíva dodnes. Práve preto si myslím, že táto téma je lákavá pre každého, kto sa trochu rozumie polygrafii. Keď som navštevovala strednú odbornú školu Polygrafie, podobné techniky zaberali veľmi veľa času na vytvorenie priemerného až horšieho diela. Pri vytváraní virtuálneho modelu platne je čas prípravy nepomerne kratší a bezpečnejší, pretože nemusíme pracovať s ostrými nástrojmi, ktoré spracovávajú platňu. Preto si tento proces môže vyskúšať aj dieťa. Keď sa v školách učí o takýchto technikách, vysvetľujú sa veľmi stručne, maximálne s obrázkami, ktoré nie každému hneď povedia, ako daný proces prebieha. S aplikáciou, ktorá obsahuje celý proces mezzotintu, je veľmi pohodlné a rýchle sa naučiť prakticky, ako technika funguje. Pri vytváraní platne môže aj skúsený majster spraviť chybu, niekde zaškrabať do platne neprimerane viac alebo len krivým sekcom pokaziť obrazec. Veľa z týchto chýb sa dá zahla-

diť, ale výsledok už nebude rovnaký, aký si autor platne predstavoval alebo v horšom prípade môže začať od začiatku celý zdĺhavý proces. Vo virtuálnom modeli sú takéto chyby jednoduchšie na opravenie alebo prosté sa dajú zvrátiť. Keby sa autor v aplikácii rozhodne začať od začiatku, tak to pre neho nebude také demotivujúce, pretože v aplikácii je celý proces rýchlejší.

1.2 Ciele práce

Cieľom aplikácie je dosiahnuť dôverný virtuálny model mezzotintu. Mal by sa dať vyskúšať celý proces so základnými nástrojmi od vytvorenia modelu pre platňu až po otláčanie farby na papier, konkrétne:

- úprava platne pomocou nástrojov,
- natretie farbou,
- stieranie tarlatánom,
- otláčenie farby na papier.

1.3 Štruktúra práce

Práca je štruktúrovaná do viacerých kapitol. Prvá kapitola obsahuje motíváciu pre vytvorenie aplikácie, ciele práce a štruktúru. Ďalšia kapitola sa podrobnejšie venuje technike mezzotintu, nakoľko sa jedná o málo známy pojem a zložitejšiu techniku. V nasledujúcej kapitole si povieme, ako niektoré tímy riešili podobné problémy so simulovaním vybraného druhu hĺbkotlače. V kapitole formulácia problému zdefinujeme základne prvky nášho modelu a uvedieme, ako by mal fungovať. V ďalšej kapitole s názvom definícia problému určíme mierky, s akými budeme pracovať v našom virtuálnom

modeli a konkrétne navrhujeme modely pre vrstvy procesu. Návrh riešenia je nasledujúca kapitola, ktorá popisuje spôsoby, akými sa budú simulovať procesy na modeloch, to znamená opracovanie platne, naniesenie farby, odsávanie farby a otláčenie farby na papier. Nasledujúca kapitola sa zaoberá implementáciou aplikácie. Ďalšia kapitola spíše výskum a výsledky, ktoré sme dosiahli. Posledná kapitola je záver, kde zhrnieme, čo sa nám podarilo vytvoriť a navrhujeme možné vylepšenia.

Kapitola 2

Hĺbkotlač, technika Mezzotint

Mezzotint je technika hĺbkotlače, medzinárodne označenie C7, pri ktorej sa vytvára kresba vyškrabávaním. Pri tejto technike sa využíva zvyčajne medená alebo mosadzná doska o výške 1.5 až 2 mm. Technika mezzotintu prebieha v nasledujúcich bodoch:

- vytvorenie vzoru na platni,
- vyhladzovanie platne a vytvárania obrazca,
- naniesenie farby a tieňovanie,
- vytvorenie obrazu.

2.1 Vytvorenie vzoru na platni

Ako prvé pri zhotovovaní mezzotintovej rytiny sa vytvorí vzor pozdĺž celej platne. Používa sa na to oceľový polkruhový nôž (obr.2.1) s ostrým vybrúsením do jednej alebo viac radov ostrých zubov. Vzor vytvárame opakovaným pritláčaním a rotovaním nástroja ostrou hranou o platňu. Proces opakujeme v štyroch smeroch, a to horizontálne, vertikálne a po uhlopriečkach.



(a) Medená platňa a oceľový polkruhový nôž. (b) Použitie oceľového polkruhového noža.

Obr. 2.1: Vytváranie vzoru na platni pomocou polkruhového oceľového noža [Buc14].

Tento proces je manuálne veľmi náročný, preto pre vytvorenie vzoru existuje ďalší nástroj jednoduchší na používanie, nazývaný kotúčový zrníč (obr.2.2). Nástroj má držiak vo valcovitom tvare a na konci otočnú hlavicu s ostrými výčnelkami. Zrníčom prechádzame po medenej rytine, pokým nezmiznú všetky nedotknuté väčšie plochy platne.



Obr. 2.2: Kotúčové zrníče na vytváranie vzorky po povrchu platne [mez].

Obidvoma procesmi dosiahneme na platni vzor pozostávajúci z vyhlbených priestorov, ktoré majú neskôr zachytávať farbu. Po tomto procese má platňa

materiál prevyšujúci jej pôvodnú výšku, ktorý vznikol opakovaným zatláčaním ostrých nástrojov o povrch platne, z ktorej sa materiál z miest, kde sú vyhlbené miesta, vytlačil do okolia priehlbiny. Tieto procesy nevytvárajú medené piliny alebo iné ostatky oddelené od platne, čiže objem platne sa zachováva rovnaký.

2.2 Vyhladzovanie platne a vytvárania obrazca

Vyhladzovaním platne vytvárame základ obrazca, ktorý chceme, aby platňa otláčala. Slúži na to sada nástrojov s ostrými hlavicami rôzneho tvaru a ostroty (obr.2.3). Vyškrabávaním do platne jej povrch zjemňujeme od zrna, ktoré sme vytvorili. Objem platne znižujeme o medené piliny, ktoré vznikajú zoškrabaním povrchu. Ak chceme doceliť hladký povrch, ktorý bude tvarom reprezentovať objekt, zoškrabeme povrch až na úroveň, kde má platňa stálu konštantnú výšku alebo isté oblasti aj nižšie. Čím väčší priestor platne vyhladíme, tým ľahšie je farbu z týchto miest neskôr odstrániť, čím môžeme dosiahnuť svetlejšie priestory, tieňovanie a rôzne ornamenty.



Obr. 2.3: Rôzne nástroje využívané pri technike mezzotintu na vytváranie obrazca do platne [Mor].

2.3 Nanosenie farby a tieňovanie

Ďalší krok v procese mezzotintu je nanosenie farby na platňu. Po povrchu dosky sa farba nanáša pomocou valca, ktorý sa do farby neponára, ale otláča sa o sací povrch naliaty farbou. Platňa sa prejde valcom niekoľkokrát pre rovnomerné rozloženie farby. Potom sa použije tarlatan, veľmi absorbujúca látka, ktorou odstránime prebytočnú farbu z miest, ktoré potrebujeme pre výsledný efekt svetlejšie (obr.2.4). Môžeme doceliť viaceré efekty, hlavne sú tieňovanie a vytvorenie objektov v obraze. Tieňovanie sa dá jednoducho doceliť vďaka vzorkovanému povrchu. Prikladaním tarlatánu na miesta, kde je povrch spracovaný iba prvým procesom a postupným znižovaním sily tlaku s tarlatánom o platňu sa vytvorí vzorkované tieňovanie. Vytvorenie objektov v obraze má za úlohu už proces vyhladzovania platne, kde sa snažíme vyhladiť priestory od vzorky, aby sme dosiahli rôzne objekty alebo dojem abstrakcie. Na zotretie farby z povrchu platne sa nikdy nevyužíva vlhčený tarlatán ani žiaden prípravok, pretože by sa tým znehodnotil výsledný obraz.



(a) Nanosenie farby pomocou valca.



(b) Odsávanie farby pomocou tarlatánu.

Obr. 2.4: Proces nanosenia farby a vytváranie tieňovania [Hub].

2.4 Vytvorenie obrazu

Prichystanú platňu položíme pred tlakový valec a na jej povrch sa pritlačí papier, na ktorý sa obrazec z dosky otláči. Aby sa papier pod prítlakovým valcom neznehodnotil a kvôli fixácii, aby bol obraz presne otláčený, prekryjeme celý povrch papiera a aj jeho okolie viacerými vrstvami hrubej látky. Platňa potom putuje pod prítlakový valec, kde je obrazec otláčený o papier (obr.2.5). Obraz mezzotintovou technikou je týmto krokom hotový. Platňa je znovu použiteľná pre ďalšie obrazy.



(a) Otláčanie farby pod prítlakovým valcom.



(b) Hotové dielo.

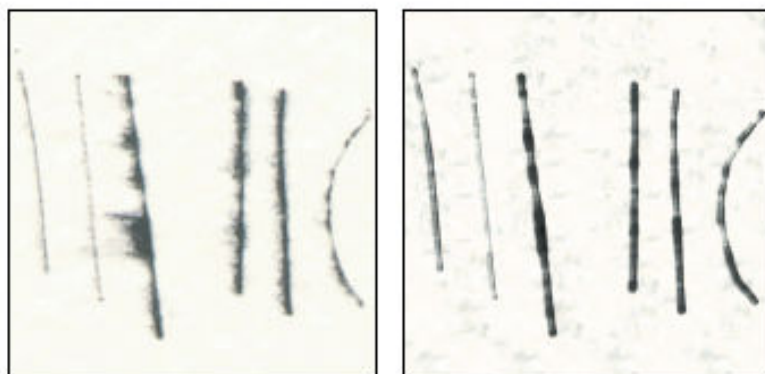
Obr. 2.5: Vytvorenie obrazu [Hub].

Kapitola 3

Prehľad problematiky

3.1 Virtuálna metóda suchej ihly pomocou modelovej stratégie

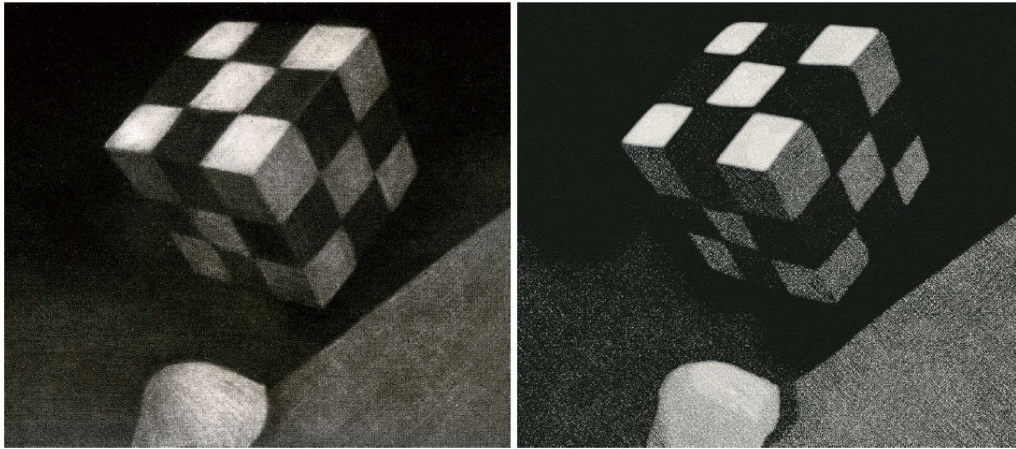
Autori článku navrhli metódu na syntetizáciu virtuálnej medenej dosky a vytlačeneho obrazu založeného na fyzickom modeli s nefotorealistickým renderovaním v počítačovej grafike. Metóda, ktorú sa snažili napodobniť, sa nazýva drypoint, je podobná mezzotintu, ale používajú sa iné nástroje a nevzniká vzorka po celom povrchu platne. Proces ich virtuálneho modelu rozdelili do štyroch krokov, a to vytvorenie medenej platne, nanášanie farby, stieranie farby z povrchu platne a tlačenie. Pri medenej platni sa sústredili na vytvorenie nástroja, ktorý je podobný ihle a slúži na vyškrabávanie povrchu platne. Nanášanie farby spravili jednoducho ako globálnu operáciu platne, kedy sa na jej povrch naniesla farba. Na odstraňovanie farby simulovali dva druhy látok, takzvaný tvrdý a mäkký mušelin. Farba v priehlbínach, ktoré sa vyrezali, zostávala. Pri odstraňovaní farby brali do úvahy aj smer, ktorým handru ťahali, preto docielili aj efekt rozmazania farby do smeru ťahania [TMO04].



Obr. 3.1: Na prvom obrázku zľava vidieť skutočný výsledok po technike suchou ihlou, na druhom obrázku je použitý virtuálny model navrhnutý v tomto článku [TMO04].

3.2 Fyzikálny model na dosiahnutie virtuálneho mezzotintu

Autori tohoto článku navrhli metódu na vytváranie virtuálneho mezzotintu na fyzikálne založenom rendrovacom prístupe. Postup pre vytvorenie platne rozdelili do troch fáz, a to proces zdrsňovania, oškrabávania a leštenia platne. Vytvorili vzorku dierok alebo rýh po celom obsahu povrchu platne, aby sa farba dostala všade. Využili na to parabolické diery a vzorku rýh, ktoré boli v cikcakovitom usporiadaní. V druhom kroku pomocou škrabacích modelov odstraňujú vytvorené diery a ryhy, aby dosiahli polotóny po aplikovaní farby. Pre vytvorenie úplne bielych miest po otláčení farby na papier využili model leštenia povrchu platne. Modely, ktoré opracovávali povrch platne, jej veľkosť iba redukovali a vyhladzovali [TKMO07].



Obr. 3.2: Na prvom obrázku zľava je skutočný výsledok po technike mezzotintu, na druhom obrázku je použitý virtuálny model navrhnutý v tomto článku [TKMO07].

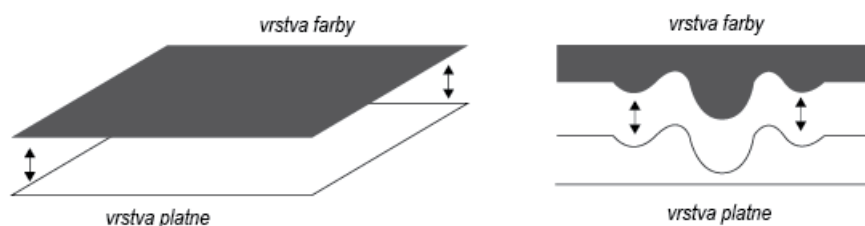
3.3 Modelové virtuálne mezzotintové techniky

V článku autori opisujú ručnú techniku mezzotintu a navrhujú svoj virtuálny model. Rovnako ako v predošlom článku využívajú na vytvorenie platne tri procesy, a to zdrsňovanie, škrabanie a leštenie povrchu platne, ktorými dosahujú stupňovanie farby od čiernej až k bielej. Na vzorky autori využili parabolické modely dierok a ťahaný parabolický model. Operácie na platni jej povrch výhradne znižovali a vyhladzovali. Povrch platne sa nikde nezvyšoval [TMO05].

Kapitola 4

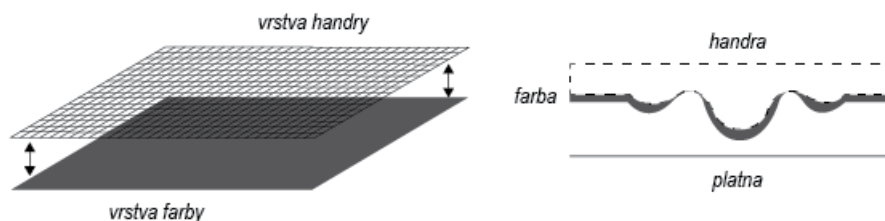
Formulácia problému

V tejto kapitole si zadefinujeme, ako náš virtuálny model mezzotintu navrhujeme. Celý proces rozdelíme do štyroch základných vrstiev. Tieto vrstvy prezentujú platňu, farbu, handru a papier. Najspodnejšia vrstva je vrstva medenej platne, do ktorej vytvárame vzor. Na manipuláciu a opracovanie povrchu platne využijeme fyzikálne modely, ktoré budú napodobňovať nástroje využívané pri technike mezzotintu. Tieto nástroje budú ovplyvňovať len prvú vrstvu a to vrstvu platne. Po nanesení farby na povrch platne budú tieto nástroje neaktívne. Po opracovaní bude využitá vrstva farby, ktorá sa vleje do škár a priehlbín platne a vytvorí na povrchu jemný nános farby.



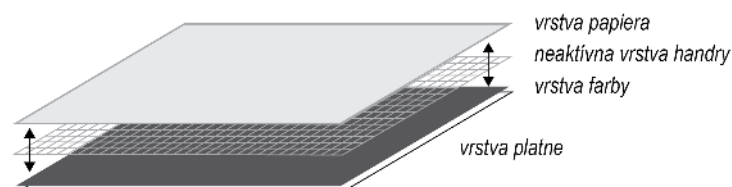
Obr. 4.1: Obrázky znázorňujú, ako sa priloží vrstva farby na povrch platne. Druhý obrázok je z pohľadu rezu vrstiev.

Ďalej je priložená vrstva handry, ktorá je tesne nad povrchom celej vrstvy farby. V priestore, kde hanričku využívame, sa vrstva zníži a odsáva farbu.



Obr. 4.2: Prvý obrázok zľava znázorňuje vrstvu farby a neaktívnu vrstvu hadry. Druhý obrázok je z pohľadu rezu vrstiev, kde handra je pritlačená k povrchu platne a odsáva farbu.

Posledná vrstva je papier, ktorá sa prikladá na povrch platne tak, aby sa všetok povrchový nános farby otláčil a s ním aj čo najviac farby zo škár a priehlbín v platni. Vrstva handry je v tomto procese neaktívna.



Obr. 4.3: Obrázok znázorňuje vrstvy modelu vo finálnom kroku, kedy sa farba otláča na papier.

Kapitola 5

Definícia problému

5.1 Definícia jednotiek modelu

Jednotky využívané v modeloch sú zadefinované podľa nasledujúcej tabuľky. Jedná sa o tri mierky, mierku medzi skutočnosťou a dvojrozmernými poliami modelov, mierku medzi skutočnosťou a tretím rozmerom - výškou a mierku medzi výškou a dvojrozmernými poliami modelov. Preddefinovaný rozmer platne je zúžená veľkosť A6, čo je v našom prípade 148x86 mm. Rozmer sa odvíjal od veľkostí nástrojov na vytváranie medenej rytiny, ktoré simulujeme a od výškových jednotiek, ktoré po prevode na pixely mali zachovať dostatočný počet pixelov.

Tabuľka jednotiek modelu	
Mierka pre dvojrozmerné polia	$0,01 \text{ mm}^2 = 1 \text{ px}$
Mierka pre tretí rozmer (výšku)	$0,01 \text{ mm} = 1 \text{ vj}$
Mierka medzi pixelom a vj	$1 \text{ px} = 10 \text{ vj}$

Tabuľka 5.1: Tabuľka zobrazuje tri mierky, ktoré využívame v našom virtuálnom modeli mezzotintu.

Výškové jednotky sú v tabuľke označené ako v_j a reprezentujú hodnotu úrovne šedej alebo hodnotu vybraného kanálu farby. Pre možnosť vizualizácie uvádzame aj prevod medzi pixelom a výškovou jednotkou. Medená platňa by mala mať výšku približne 2 mm. V našom modeli má výšku 2,55 mm.

5.2 Virtuálny model mezzotintu

Základ virtuálneho modelu mezzotintu sa bude skladať z modelov platne, farby, handry a papiera.

5.2.1 Model platne

Platňa je v skutočnom svete 3D objekt reprezentovaný svojou výškou, šírkou a hĺbkou. Kvôli výpočtovej zložitosti je ale platňa reprezentovaná ako výšková mapa. Hodnoty tretej súradnice sú uchovávané na pozícii i, j , ktorá aj naďalej bude v článku definovaná ako priestor $R = \{x = (i, j) \in N^2\}$, výškovej mapy P reprezentujúca platňu.

$$P(x) = s, \quad (5.1)$$

kde hodnota s je v intervale od 0 po 255, pretože reprezentuje odtieň šedej, vďaka ktorému môžeme neskôr výšku vypočítať. Počiatočná hodnota P_{init} je po celom obsahu rovnaká.

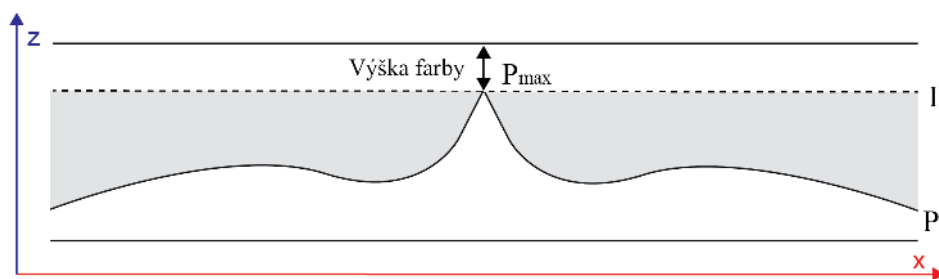
5.2.2 Model farby

Farba je reprezentovaná ako model platne a to výškovou mapou I pre jednoduchšiu manipuláciu s dátami. Farba sa pridáva až po upravení platne, kedy je jej povrch nerovnomerný, preto výška farby bude hneď rôzna podľa

pozície na platni. Základný model farby je definovaný nasledovne:

$$I(x) = f, \quad (5.2)$$

kde hodnota f je z intervalu 0 až 255. Vo vizualizácii hodnota f určuje alfa kanál farby priradenej k vybranému x . Hodnota výšky náteru je stanovená konštantne a počíta sa od maximálnej globálnej hodnoty výšky platne P_{max} . Priestor medzi $P(x)$, ktoré nieje P_{max} , a výškou P_{max} je automaticky vyplnený farbou.



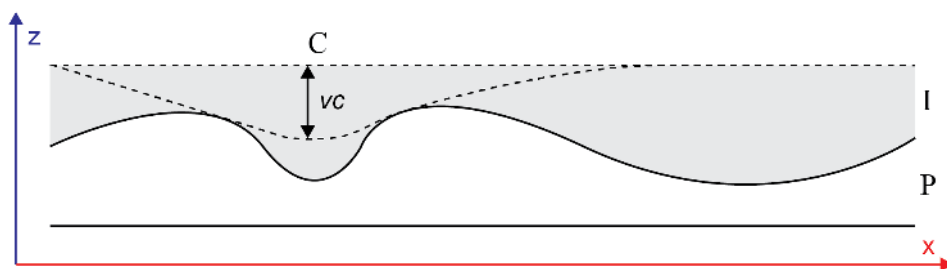
Obr. 5.1: Obrázok znázorňuje priečny pohľad na platňu pri pridaní farby. Sivý priestor znázorňuje miesta, kde je výška farby automaticky pridaná.

5.2.3 Model handry

Model handry, ktorá stiera farbu z platne, reprezentujeme ako prázdnu mriežku $C(x)$, ktorá po aplikácii sily na vybranom mieste si zapamätá navonadobudnutú výšku posunutia handričky:

$$C(x) = vc, \quad (5.3)$$

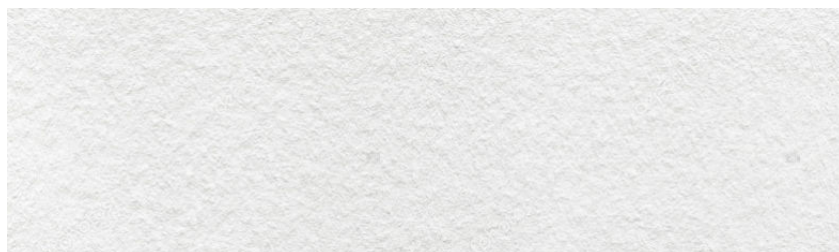
kde vc reprezentuje výšku posunutia od pôvodných súradníc a zároveň hovorí o tom, ako veľmi zasiahne do farby. Na mieste, kde handru priložíme, sa hodnoty mriežky $C(x)$ zmenia a ovplyvnia hodnoty výškovej mapy I .



Obr. 5.2: Obrázok znázorňuje handričku vyznačenú čiarkovaným okrajom, ktorá zasahuje do výšky farby a odsáva ju, pričom sa snaží prispôbiť výške platne, aby nebrala z priestorov, kde nedosiahne.

5.2.4 Model papiera

Papier sa vyrába zhutnením vlákien, ktoré po spracovaní vytvárajú na povrchu papiera jemnú štruktúru. Zblízka má preto papier nerovnomerný povrch, ktorý vďaka svojej nekonštantnej výške nasáva farbu rôzne v rozličných miestach papiera.

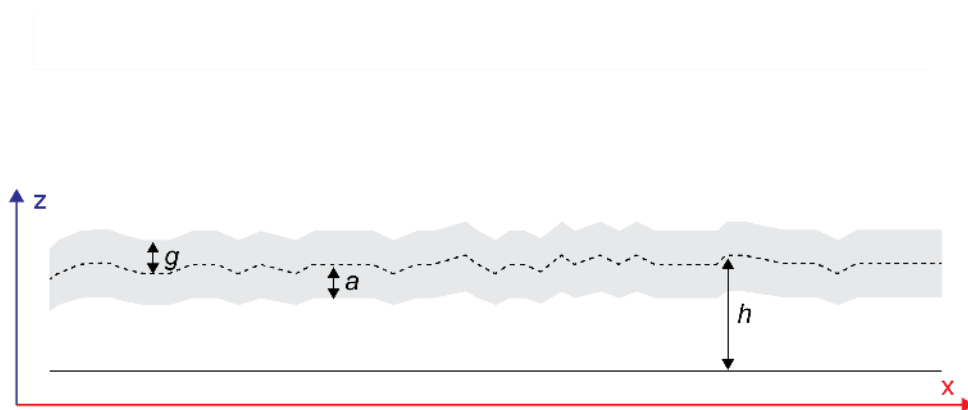


Obr. 5.3: Nerovnomerná štruktúra papiera.

Papier reprezentujeme ako výškovú mapu $V(x)$, v ktorej uchováваме množstvo otláčenej farby, množstvo absorbovanej farby a výšku papiera, nakoľko povrch papiera nie je rovnomerný.

$$V(x) = (a, g, h), \quad (5.4)$$

kde hodnota a určuje výšku absorbovanej farby, g určuje výšku farby na povrchu papiera. Pomocou hodnoty absorbovanej farby vieme lepšie simulovať proces rozpíjania farby ďalej od nasiaknutého okolia. Premenné g a a sú na sebe závislé a navzájom sa ovplyvňujú. Sú z intervalu 0 až 255. Mikroštruktúra klasického papiera nie je nikdy dokonale hladká, a preto sme zadefinovali ďalší parameter h , ktorý hovorí o pôvodnej výške papiera na vybraných miestach vzhľadom na jeho mikroštruktúru. Táto výška neskôr ovplyvní to, ako a koľko farby papier prijme.



Obr. 5.4: Obrázok znázorňuje, ako papier nasáva farbu. Povrch papiera je nerovnomerný a jeho celá výška je označená h . Výška farby nanесenej na povrch papiera je označená premennou g a výška absorbovanej farby do papiera je označená a .

Kapitola 6

Návrh riešenia

Kapitola sa venuje návrhnutým riešeniam pre samotné procesy pri vytváraní mezzotintovej rytiny. Každá podkapitola opisuje vytvorený model pre vybranú časť priebehu techniky mezzotintu. A to konkrétne modely pre procesy:

- úpravy povrchu platne pomocou diskétnych modelov nástrojov, konkrétne pre zdrsnenie, brúsenie, škrabanie a leštenie povrchu,
- natretia farby,
- stierania farby handrou,
- otláčania farby na papier.

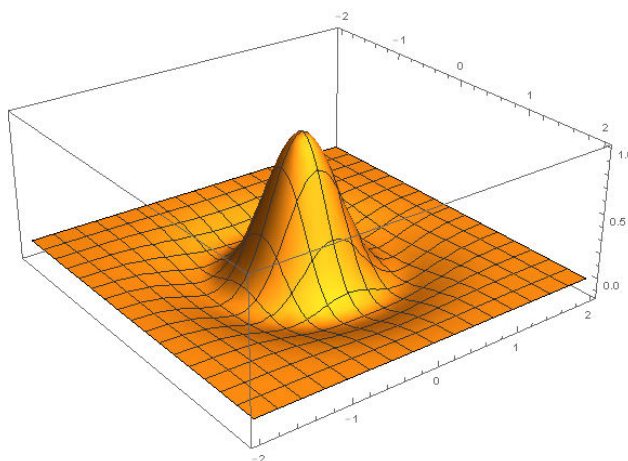
6.1 Diskrétné modely nástrojov

Táto podkapitola sa venuje modelom nástrojov, ktoré využijeme pri vytváraní vyhlbeného obrazcu do platne. Navrhnuté diskrétné modely sú matice, ktoré využívame ako štetec, to znamená, že nepočítame konvolúciu. Vždy jeden prvok matice mení len jednu hodnotu výškovej mapy, nad ktorou sa

nachádza. Modely majú tendenciu znižovať výšku povrchu, preto je minimálna výška platne P_{min} stanovená a nesmie klesnúť nižšie. Tretí rozmer je simulovaný hodnotou úrovne šedej, preto maximálna hodnota P_{max} je ohraňovaná maximálne na 255.

6.1.1 Model na zdrsnenie povrchu

Zdrsnenie povrchu slúži na vytváranie nepravidelne opakovaných výhlbín do povrchu platne, ktoré neskôr zachytávajú farbu. Model na zdrsnenie povrchu je preto globálna operácia, vykonávaná po celom obsahu platne. My však tento model využijeme aj pre lokálne operácie. Hodnoty matice pre tento model zachovávajú objem platne, čiže koľko objemu platne sa zoberie, toľko sa okolo vyhlbeného priestoru vyzdvihne. Pre takýto model sme využili funkciu mexický klobúk 6.1, pretože tvarom dobre imituje prirodzené vyhlbenie a vytlačenie materiálu platne. Toto nás motivovalo k tomu, že sme si zadefinovali svoj vlastný filter v tvare obráteného mexického klobúka. V každom bode, kde sa nástroj pritlačí na platňu, dôjde k defomácii platne v tvare obráteného mexického klobúka. Materiál platne sa nestratí, len sa vyduje do okrajov.



Obr. 6.1: Mexický klobúk v 3D priestore.

Mexický klobúk

Mexický klobúk v spojitelnej forme je rozdiel dvoch gaussianov (DOGs). Stredová časť mexického klobúka je časť funkcie, pre ktorú platí $G_m \geq r$ a pre okolie $G_m < r$, kde r je vzdialenosť ľubovoľného bodu od stredového bodu.

$$r = \sqrt{(i - i_c)^2 + (j - j_c)^2}, \quad (6.1)$$

kde súradnice i_c, j_c sú súradnice stredového bodu filtra. Mexický klobúk je vytvorený pomocou rozdielu stredovej časti gaussianu G_c , ktorý je odpočítaný z okolitého gaussianu G_s . Stredová časť mexického klobúka je klasický gaussian v tvare:

$$G_c(r) = e^{-(cr)^2}, \quad (6.2)$$

a normalizovaný gaussian okolia je definovaný ako:

$$G_s(r) = \frac{1}{m^2} e^{\frac{-r^2}{m^2}}, \quad (6.3)$$

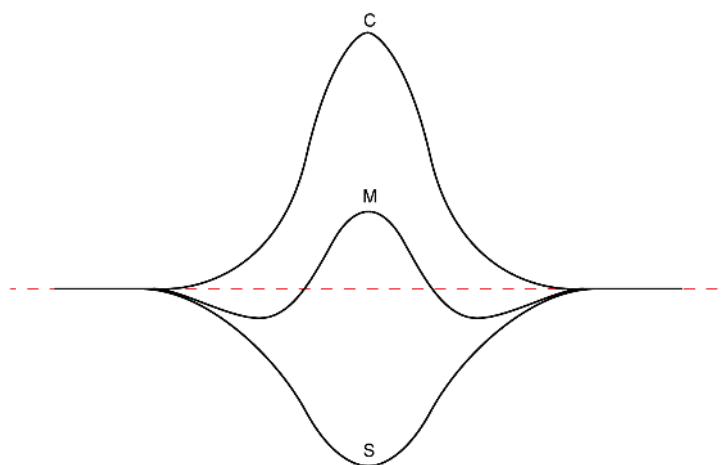
kde $\frac{1}{m^2}$ je normalizačný faktor a platí, že $m > 1$. Pomer medzi stredom a okolím gaussianu je $1 : m$. Funkcia mexický klobúk je rozdiel dvoch predošlých funkcií:

$$G_m(r) = G_c(r) - G_s(r), \quad (6.4)$$

ktoré sú znázornené na obrázku 6.2. V priestore E^2 pre bod so súradnicami (i, j) vieme rozpísať mexický klobúk v tvare:

$$\Psi(i, j) = \left(1 - \frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) e^{\frac{-(i^2 + j^2)}{2\sigma^2}}, \quad (6.5)$$

kde σ je štandardná odchýlka distribúcie.

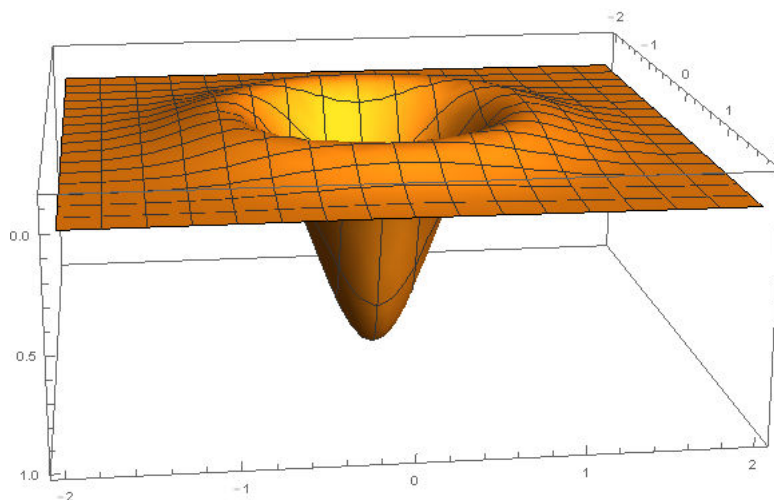


Obr. 6.2: Funkcia označená M je mexický klobúk vytvorený odčítaním funkcie S od C .

Diskretizáciou v malom okolí stredu mexického klobúka vieme vypočítať hodnoty a normalizovať ich, čím dostaneme nasledovnú maticu:

$$M_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -3 & -3 & -3 & -1 & 0 \\ -1 & -3 & 0 & 7 & 0 & -3 & -1 \\ -1 & -3 & 7 & 24 & 7 & -3 & -1 \\ -1 & -3 & 0 & 7 & 0 & -3 & -1 \\ 0 & -1 & -3 & -3 & -3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Hodnoty matice sú pre násobene -1 pre efekt vytvorenia diery do platne (obr.6.3). Hodnoty pixlov mimo obrázku berieme ako nulové, čiže pri aplikácii matice v miestach, kde zasahuje mimo obrázka, využijeme len tie hodnoty matice, ktoré svojou pozíciou patria do obrázka.



Obr. 6.3: Mexický klobúk obrátený tak, aby vyzeral ako zárez do platne.

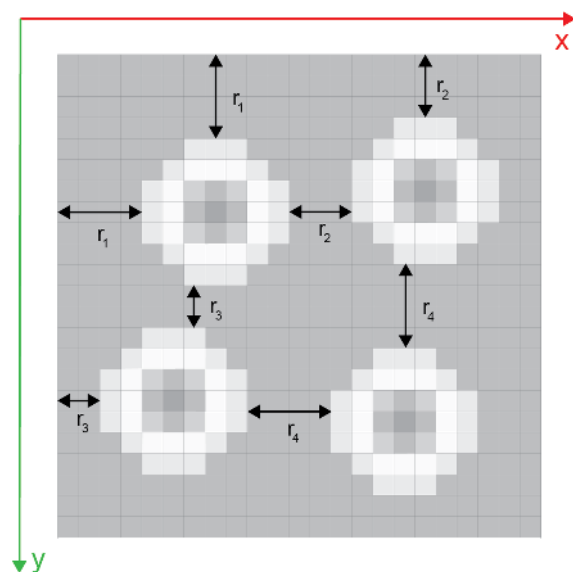
Využitie filtra opačného mexického klobúka

Tento filter má v reálnom svete po prepočte podľa našej mierky veľkosť $0,49 \text{ mm}^2$, to znamená, že dĺžka jeho hrany je $0,7 \text{ mm}$. Filter využijeme na tri rôzne procesy a to na:

- globálnu vzorku,
- lokálnu manuálnu vzorku,
- nástroj so špičkou v tvare mexického klobúka.

Globálna vzorka

Globálnu vzorku vytvoríme pomocou nepravidelného opakovania filtra v tvare opačného mexického klobúka. Vyplníme celý povrch platne vzorkou naraz. Vzorka je navrhnutá tak, aby sa filter opakoval o počet pixlov $r \in (2, 4)$ zhora a zľava.



Obr. 6.4: Vzorka pre povrch platne po využití mexického klobúka. Obrázok znázorňuje ľavý horný roh platne, kde svetlejší tón šedej znamená vyššiu výšku platne.

Lokálna manuálna vzorka

Lokálna manuálna vzorka slúži na vytvorenie frekventovanejšie vzorky na vybranom mieste po použití globálnej vzorky. Je navrhnutá rovnako ako globálna vzorka, ibaže funguje len lokálne. Odsadenie filtra mexického klobúka má medzi sebou 5 pixelov.

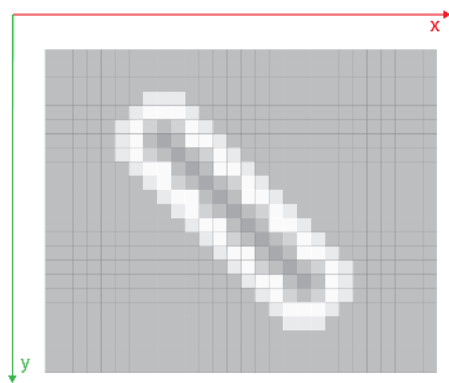
Nástroj so špičkou v tvare mexického klobúka

Tento nástroj zo série klasických štetcových nástrojov, ktoré menia povrch v mieste, kde užívateľ chce, je špecifický tým, že vytláča povrch a zachováva objem. Ďalšie nástroje na úpravu povrchu platne objem nezachovávajú a iba ho znižujú. Využívame otočený mexický klobúk M_m definovaný v diskkrétnej

forme ako štetec. Nové $P'(x)$ po použití nástroju vypočítame ako:

$$P'(x) = P(x) + M_m(x)s + t, \quad (6.6)$$

kde $P(x)$ je vybraný bod platne, kde filter prikladáme. Škálovací parameter $s \in (1.0, 5.0)$ označuje silu, ktorou je nástroj pritláčaný o povrch platne. Na vytvorenie jemnej nerovnomernosti slúži posledný parameter $t \in <-1, 1>$.



Obr. 6.5: Využitie otočeného mexického klobúka ako štetca.

6.1.2 Model brúsenia povrchu

Cieľom brúsenia povrchu je vyhladiť alebo otupiť ostré výbežky, ktoré vznikli vytváraním rýh. A to z toho dôvodu, že ostré výbežky by zadržiavali veľa tlačiarenskej farby, čo by sa nakoniec prejavilo tlačou fľakov alebo machúľ. V predchádzajúcich krokoch nastala zmena výšky medenej platne kvôli ryhovaní do hĺbky, zatiaľ čo na koncoch ryhy vznikli malé výbežky nad povrch medenej platne. Táto zmena je zaznamenaná v dátovej štruktúre výškovej mapy. Navrhovaný virtuálny model zredukuje výšku výbežkov na platni tak, ako ukazuje obr. 6.7. To znamená, že ak na pôvodnom modeli sa nachádzajú výbežky, ktoré prevyšujú svojou výškou nami vypočítanú novú maximálnu

výšku, orežú sa do tejto výšky. Časti modelu, ktoré sú svojou výškou maximálne na úrovni novo zvolenej maximálnej výšky alebo nižšie, sa neorežú. Model brúsenia je operáciou na lokálnej oblasti obrázka, ktorá určuje špecifickú výšku, o ktorú máme povrch zbrúsiť. Najskôr si vypočítame najväčšiu aktuálnu výšku P_{max} v oblasti $R = \{x = (i, j) \in N^2\}$ pomocou vzťahu:

$$P_{max} = \max_{x \in R} P(x). \quad (6.7)$$

V druhom kroku znížime výšku v oblasti R vybraných hodnôt, ktoré majú výšku väčšiu ako $P_{max} - rb$, kde rb reprezentuje maximálnu odchýlku od P_{max} kedy je ešte brúsenie potrebné, o hodnotu $M(x)$ z matice modelu, čím dostávame aktualizovanú novú výšku platne $P'(x)$ po zbrúsení:

$$P'(x) = \max\{P_{min}, ((P(x) - M_b(x)\alpha)F_b s)\}, \quad (6.8)$$

kde $P(x)$ je vybraný bod platne, kde filter prikladáme. α je škálovací parameter zníženia. Pretože proces brúsenia je robený ručne, výška sa zníži v skutočnosti nerovnomerne. Tieto jemné nerovnosti môžeme modelovať funkciou, ktorá bude náhodne generovať hodnoty $\alpha \in (0.5, 1)$, samostatne pre každú hodnotu pixela. Tieto hodnoty naškálujeme v rozmedzí 50% až 100% jej pôvodnej hodnoty. M_b je matica pre tento model. F_b označuje brúsiaci parameter, ktorý fixne škáluje model a tým pridáva na jeho silu. Škálovací parameter $s \in (1.0, 5.0)$ označuje silu, ktorou je nástroj pritláčaný o povrch platne, na rozdiel od F_b , ktorý je fixne daný sa parameter s dá nastaviť užívateľom. Tento filter má v reálnom svete po prepočte podľa našej mierky veľkosť $2,25 \text{ mm}^2$, to znamená, že dĺžka jeho hrany je $1,5 \text{ mm}$. Matica M_b má rozmer 15×15 a obsahuje len hodnoty 0 a 1. Hodnoty 1 má v písanom kruhu matice a hodnoty 0 na zvyšných pozíciách.

6.1.3 Modely pre škrabanie povrchu

Tieto modely sú odlišné v tom, že nezanechávajú objem, ale materiál z platne odstránia. Využívajú sa na lokálne úpravy. Povrch platne zjemňujeme od vzorky, ktorú sme vytvorili, a tým vytvoríme priestor pre viac farby, ktorá sa dá aj jednoduchšie odstrániť, pretože sa nachádza vo väčšom priestore. Matice modelov sú jednotkové, aby sme ich mohli naškálovať podľa potreby. Škálovať ich budeme parametrom, ktorý je vo vzorcoch označovaný s . Konkrétne budeme mať štyri modely nástrojov s rôznymi hlavicami zobrazené na obrázku 6.6 a to konkrétne:

- hlavica v tvare kocky,
- hlavica v tvare štyroch špicov,
- hlavica v tvare ostrého špica,
- hlavica v tvare tupého špica.



Obr. 6.6: Obrázok znázorňuje pohľad zboku na hlavice nástrojov. Zľava na hlavicu v tvare kocky, štyroch špicov, ostrého a tupého špica.

Všetky tieto modely majú rovnaký postup spracovania, iba využívajú iný druh matice pre docielenie rôznych efektov na povrchu platne.

Model s hlavicou v tvare štvorca

Model škrabania s využitím hlavice v tvare štvorca je operáciou na lokálnej oblasti platne, ktorá znižuje výšku platne o hodnoty matice M_s , o ktoré máme povrch zbrúsiť. Matica M_s má rozmer 7×7 a jej hodnoty sú všetky rovné -1 kvôli tomu, aby sme približne rovnomerne znižovali povrch platne. Ako prvé nájdeme maximum P_{max} v oblasti $R = \{x = (i, j) \in N^2\}$ pomocou vzťahu 6.7. V druhom kroku znížime výšku v oblasti R iba všetkých tých hodnôt, ktorých výška je väčšia ako $P_{max} - rb$, kde rb reprezentuje maximálnu odchýlku od P_{max} kedy by nástroj ešte povrch ovplyvnil. Novú hodnotu $P'(x)$ vypočítame nasledujúcim vzťahom:

$$P'(x) = \max\{P_{min}, P(x) - M_s(x)s + t\}, \quad (6.9)$$

kde $P(x)$ označuje vybraný bod, kde filter prikladáme. Škálovací parameter $s \in (1.0, 5.0)$ označuje silu, ktorou je nástroj pritláčaný o povrch platne. Na vytvorenie jemnej nerovnomernosti slúži posledný parameter $t \in \langle -1, 1 \rangle$. Filter má v reálnom svete po prepočte podľa našej mierky veľkosť $0,49 \text{ mm}^2$, to znamená, že dĺžka jeho hrany je $0,7 \text{ mm}$.

Model s hlavicou v tvare štyroch špicov

Tento model je vhodný na viac čiarové linky alebo na vytvorenie inej vzorky ako pôvodnej. Model využíva blokovú maticu M_t , kde sú špice reprezentované jedným blokom 5×5 a rozložené každý v jednom rohu. Postup výpočtu novej hodnoty $P'(x)$ je identický ako pri modeli so štvorcovou hlavicou a ma-

tematickým vzťahom ho vyjadríme nasledovne:

$$P'(x) = \max\{P_{min}, P(x) - M_t(x)s + t\}, \quad (6.10)$$

kde $P(x)$ označuje vybraný bod, kde filter prikladáme. Škálovací parameter $s \in (1.0, 5.0)$ označuje silu, ktorou je nástroj pritláčaný o povrch platne. Tak isto ako pri predošlom modeli na jemné nerovnomernosti slúži parameter $t \in <-1,1>$. Filter má v reálnom svete po prepočte podľa našej mierky veľkosť $1,21 \text{ mm}^2$, a dĺžku hrany má $0,11 \text{ mm}$.

$$M_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -3 & -1 & 0 & 0 & -1 & -3 & -1 & 0 \\ -1 & -3 & -7 & -3 & -1 & -1 & -3 & -7 & -3 & -1 \\ 0 & -1 & -3 & -1 & 0 & 0 & -1 & -3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -3 & -1 & 0 & 0 & -1 & -3 & -1 & 0 \\ -1 & -3 & -7 & -3 & -1 & -1 & -3 & -7 & -3 & -1 \\ 0 & -1 & -3 & -1 & 0 & 0 & -1 & -3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Model s hlavicou v tvare ostrého špica

Matica M_o pre tento model má rozmer len 3×3 , pretože sa snažíme napodobniť tenký malý špicatý nástroj na vytvorenie precíznych rýh. Postup výpočtu je rovnaký ako pri modeli so štvorcovou hlavicou. Aktualizovanú hodnotu $P'(x)$ po použití filtra dostaneme ako:

$$P'(x) = \max\{P_{min}, P(x) - M_o(x)s + t\}, \quad (6.11)$$

kde $P(x)$ označuje vybraný bod, kde filter prikladáme. Škálovací parameter $s \in (1.0, 5.0)$ označuje silu, ktorou je nástroj pritláčaný o povrch platne. Rovnako ako pri všetkých modeloch na škrabanie povrchu na jemné nerovnomernosti slúži parameter $t \in <-1, 1>$. Veľkosť filtra v reálnom svete podľa našej mierky je $0,09 \text{ mm}^2$, to znamená, že hrana filtra je dlhá $0,3 \text{ mm}$.

$$M_o = \begin{bmatrix} -1 & -3 & -1 \\ -3 & -6 & -3 \\ -1 & -3 & -1 \end{bmatrix}$$

Model s hlavicou v tvare tupého špica

Tento model využíva maticu M_j , je tupší a väčší ako nástroj s hlavicou s jedným špicom. Sústredíme najväčšie hodnoty smerom k stredu, aby sme vytvorili dojem vrezaného špica po aplikácii modelu na platňu. Vzťah na výpočet novej hodnoty $P(x)$ je identický ako pre predošlé modely na škrabanie povrchu s tým rozdielom, že využijeme inú maticu.

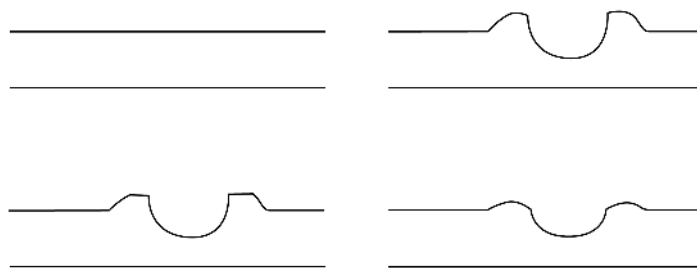
$$P(x) = \max\{P_{min}, P_x - M_j(x)s + t\}, \quad (6.12)$$

kde $P(x)$ označuje vybraný bod, kde filter prikladáme. Škálovací parameter $s \in (1.0, 5.0)$ označuje silu, ktorou je nástroj pritláčaný o povrch platne. Rovnako ako pri všetkých modeloch na škrabanie povrchu na jemné nerovnomernosti slúži parameter $t \in <-1, 1>$. Veľkosť filtra v reálnom svete je podľa našej mierky $0,49 \text{ mm}^2$ a dĺžka hrany je $0,7 \text{ mm}$.

$$M_j = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -2 & -3 & -2 & -1 & -1 \\ -1 & -2 & -4 & -5 & -4 & -2 & -1 \\ -2 & -4 & -6 & -6 & -6 & -4 & -2 \\ -3 & -5 & -6 & -8 & -6 & -5 & -3 \\ -2 & -4 & -6 & -6 & -6 & -4 & -2 \\ -1 & -2 & -4 & -5 & -4 & -2 & -1 \\ -1 & -1 & -2 & -3 & -2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

6.1.4 Model leštenia povrchu

Ak je povrch platne veľmi nerovnomerný a nemá stanovenú približnú maximálnu výšku s nejakou odchýlkou, môže platňa pri procese odtlačania farby poškodiť papier. Preto sa používa nástroj, ktorého hlavica má na leštenie lokálnej oblasti vypuklý tvar. Tento proces stláča medený kov smerom dole a zároveň mierne zapĺňa priehlbiny, pozri obr. 6.7. Opakovaním tohoto procesu vieme zarovnať výbežok k pomeru jeho okolia.



Obr. 6.7: Proces medenej platne po lokálnom leštení. Vľavo hore je pôvodná platňa. Na pravo od nej je platňa po vytvorení rýh. Vľavo dole je platňa po procese brúsenia a vedľa nej po leštení.

Virtuálny model lokálneho leštenia povrchu navrhujeme podobne ako model brúsenia, len s tým rozdielom, že potrebujeme čiastočne vyplniť aj priehlbiny namiesto toho, aby sme materiál len odstránili. To znamená, že materiál sa nestráca, ale zatláča. Model lokálneho leštenia povrchu je operáciou na lokálnej oblasti obrázka R . V prvom kroku si vypočítame priemernú výšku v oblasti R nasledujúcim vzťahom:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{x \in R} P(x), \quad (6.13)$$

kde N je počet pixelov oblasti R . V druhom kroku proces leštenia vyjadríme ako zníženie výšky platne z výšky $P(x)$ približne na priemernú výšku v oblasti R , ak priemerná výška je menšia ako aktuálna, nasledovným vzťahom:

$$P'(x) = P(x) - \text{abs}(P(x) - P)\beta - 1, \quad (6.14)$$

ak výška je väčšia ako aktuálna vyjadríme ju ako:

$$P'(x) = P(x) + \text{abs}(P(x) - P)\beta - 1, \quad (6.15)$$

kde β je škálovací parameter zníženia. Opäť ručným leštením nastáva nerovnomerné zníženie výbežkov a vyplnenie priehlbín. Tento nerovnomerný proces modelujeme rovnako ako pri brúsení, a to funkciou, ktorá vracia náhodne hodnoty β v rozmedzí od 0 po 0.5. Tento model má v reálnom svete podľa našej mierky $0,49 \text{ mm}^2$ a dĺžka hrany je $0,7 \text{ mm}$.

6.2 Proces natretia farbou

V tomto procese treba naniesť farbu na povrch celej platne, ktorá je nerovnomerná. Matematicky môžeme výpočet výšky farby zdefinovať nasledovne:

$$I'(x) = P_{max} + I_{high} - P(x), \quad (6.16)$$

kde P_{max} je globálna maximálna výška platne na celom povrchu, I_{high} je výška náteru farby, ktorá je konštantná a $P(x)$ je aktuálna výška platne vo vybranom bode.

6.3 Stieranie farby

Na stieranie a nasávanie farby využívame pružinový model pre handru znázornený na obrázku 6.8. Handra bude prikladaním na platňu ovplyvňovať množstvo farby v priestore pritlačenia handry, to znamená, že budeme výšku farby znižovať. Hodnota handry $C_{i,j}$ je deformovaná tak, aby sa zachovala rovnováha síl:

$$F_0 + F_4 = 0, \quad (6.17)$$

$$F_0 = k_0(C_{min} - C_{i,j}), \quad (6.18)$$

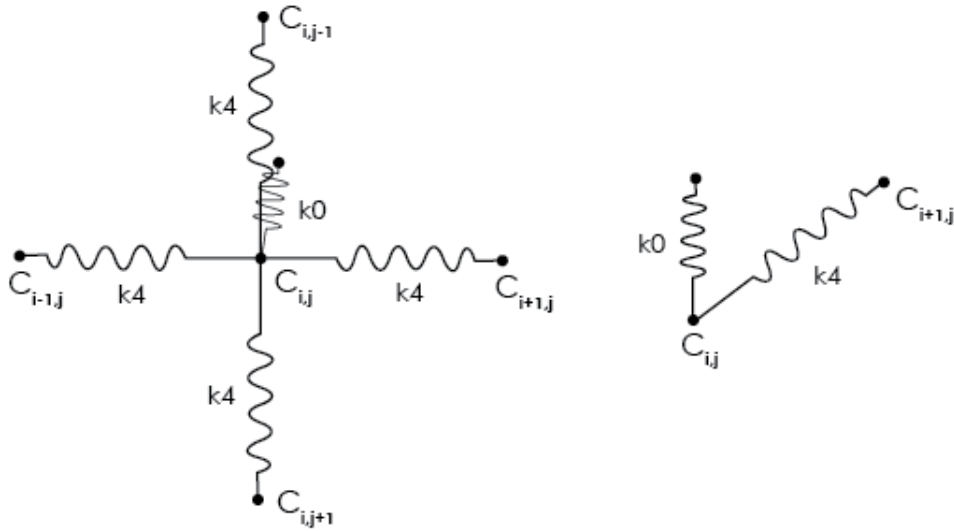
$$F_4 = k_4(C_{i-1,j} + C_{i+1,j} + C_{i,j-1} + C_{i,j+1} - 4C_{i,j}), \quad (6.19)$$

kde F_0 označuje silu, ktorá pôsobí priamo na výšku vybraného pixelu. F_4 označuje sily, ktoré pôsobia na štyroch susedov $C_{i,j}$. Parameter k_0 je rezistencia látky v priloženom mieste a k_4 je rezistencia látky v štyroch okolitých

bodoch. S využitím prelošlých vzťahov sme odvodili výpočet nového $C_{i,j}$:

$$C'_{i,j} = \min\left\{\frac{k_4(C_{i-1,j} + C_{i+1,j} + C_{i,j-1} + C_{i,j+1})}{k_0 + k_4} + \frac{k_0 C_{i,j}}{k_0 + 4k_4}, I(x)\right\}, \quad (6.20)$$

Počiatkové hodnoty handričky sú pre všetky $C_{i,j} = 0$. Aby hodnota handry nebola väčšia ako výška farby a nezasahovala potom do povrchu platne, v takom prípade ju okrešeme na výšku farby $I(x)$. Preto sa vyberie minimálna hodnota medzi výpočtom $C_{i,j}$ a $I(x)$.



Obr. 6.8: Prvý obrázok znázorňuje päť pružiniek ovplyvňujúcich bod $C_{i,j}$ a jeho štyri okolité body, ktoré tlačí nižšie. Druhý obrázok znázorňuje pohľad z boku na pružinky.

Nová hodnota farby $I'(x)$ po pritlačení handry o povrch je vypočítaná ako:

$$I'(x) = \max\{I(x) - (C(x) + t), 0\}. \quad (6.21)$$

Hodnotu handry odčítame od hodnoty farby, aby sme dostali práve rozdiel, ktorý medzi nimi je a ten hovorí o tom, ako hlboko handra zasiahla do farby. Na vytvorenie nerovnomernosti slúži posledný parameter $t \in \langle -1, 1 \rangle$. Pre prípad, aby handra nezobrala viac ako môže, je minimum definované na nulu. Handrička má profil kruhu, ktorý docielime tak, že v mieste pritlačenia handričky na povrch platne zoberieme do úvahy len pixely, ktoré spĺňajú vzorec kruhu:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2, \quad (6.22)$$

kde x a y sú aktuálne koordináty. Hodnoty a a b sú pozície stredu priloženia handričky. r predstavuje polomer veľkosti priloženej handričky. Handričku budeme využívať ako lokálny nástroj ale aj ako globálny nástroj. To znamená, že automaticky zotrieme určitú časť farby po celom povrchu platne pre ušetrenie času používateľa.

6.4 Otláčanie farby na papier

Pri otláčaní farby z platne na papier budeme brať do úvahy vlastnosti difúzie kvapalín a zasychanie. Hodnoty blízke nule vo výškových mapách platne aj farby prezentovali nízky povrch vrstiev. Pri papieri to bude naopak, pretože čím je väčšia hodnota šedej na vybranej pozícii x , tým je farba výraznejšia a tmavšia. Preto hodnoty farby invertujeme. Celý objem farby sa z platne neotlačí úplne, preto určíme konštantný parameter množstva otláčenia γ , ktorý bude využitý iba raz a to pred začatím simulácie difúzie. Obraz na papieri bude zrkadlovo obrátený, keď sa pozrieme spredu oproti vzoru, ktorý

sme vytvorili na platni. Počiatočné hodnoty $V(x)$ sú preto vypočítané ako:

$$V(x) = 255 - RI(x)\gamma, \quad (6.23)$$

kde RI je zrkadlovo otočená výšková mapa farby. Na výsledný odtieň sivej využijeme n -prahov $th_1, \dots, th_n$, podľa ktorých určíme, aká farba bude na mieste $V(x)$, aby z miest kde je dostatočne veľa farby sa otláčila čierna farba a nie svetlo sivá, kvôli škále, ktorú sme používali pri vrstve farby. Po invertovaní farieb, absorbovaní len určitého množstva farby, prahovaní a zrkadlovom otočení obrázku simulujeme difúziu a zasychanie.

6.4.1 Difúzia

Vizkóznou difúziou modelujeme odpor tekutiny voči toku a prenikanie tekutiny do okolia. Nasledujúcu difúznú rovnicu použijeme na popis pohybu farby ako kvapaliny po povrchu a do vnútra štruktúry papiera, čím simulujeme savosť papiera:

$$(I - v\delta t \nabla^2) \vec{u}(\vec{x}, t + \delta t) = \vec{u}(\vec{x}, t), \quad (6.24)$$

kde $\vec{u}(x)$ je hľadaná rýchlosť toku farby, $\vec{x}$ je pozícia vo vrstve farby, t je čas simulácie, I je matica identity a v je konštantná viskozita farby. Čím vyššia viskozita, tým má kvapalina väčší odpor k rýchlosti toku. Parameter δt je časový krok simulácie, ∇^2 je Laplaceov operátor. Po diskretizácii rovnice 6.24 v priestore a čase, použitím diskkrétnej formy Laplaceovho operátora dostaneme diagonálne dominantnú lineárnu sústavu rovníc s pásovou maticou. V našom navrhovanom modeli bude funkcia $\vec{u}(x)$ reprezentovať výšku farby na papieri. Pre výpočet sústavy použijeme Jacobiho iteračnú metódu, ktorej počiatočné hodnoty v čase $t = 0$ budú aktuálne výšky farby na papieri.

Pretože na okraji papiera reálne nemáme farbu, zvolíme okrajové podmienky tak, že $\vec{u}(x)$ je nulové na okraji simulačnej oblasti papiera. Jeden krok k -tej iterácie Jacobiho metódy má po úprave nasledovný tvar:

$$u_{i,j}^k = \frac{u_{i-1,j}^{k-1} + u_{i+1,j}^{k-1} + u_{i,j-1}^{k-1} + u_{i,j+1}^{k-1} + \alpha u_{i,j}^k}{\beta}, \quad (6.25)$$

kde $u_{i,j}$ je množstvo farby na vybranej pozícii i, j , exponent k označuje číslo iterácie.

$$\alpha = \frac{\delta u^2}{v \delta t},$$

kde δu je veľkosť jednej bunky mriežky (pixla). v označuje viskozitu a δt je časový krok. Parameter $\beta = s + \alpha$, kde s označuje počet nezaschnutých buniek v okolí.

6.4.2 Zasychanie

Farba zasychá postupne v každom kroku iterácie tak, že na pozícii (i, j) zmenší množstvo tekutej farby o konštantu zasychania τ , až dosiahne raz nulu. Zaschnutá bunka už neovplyvňuje svoje okolie, ale môže ďalej nasávať farbu z okolia, ktoré ešte nezaschlo, to znamená, že na vyschnutom priestore sa stĺpec farby viac neznižuje, ale môže sa zvýšiť.

Kapitola 7

Implementácia

7.1 Použité technológie

Na implementáciu aplikácie sme zvolili jazyk `c#` s využitím grafickej knižnice GDI+ v platforme NET. Framework vo vývojovom prostredí Visual Studio. Pre 3D vizualizáciu opracovanej platne sme využili Blender.

C#

C# je objektovo-orientovaný programovací jazyk, ktorý bol vyvinutý spoločnosťou Microsoft. Základ má v jazykoch C++ a Java. Využíva virtuálny stroj, ktorý zdrojový kód najskôr preloží pomocou kompilátora do medzikódu, takzvaného CIL (Common Intermediate Language). Je to strojový kód, ktorý má jednoduchšiu sadu inštrukcií a podporuje objektové programovanie. Medzikód alebo CIL je interpretovaný do inštrukcií pre fyzický procesor.

GDI+

GDI+ alebo Graphics Device Interface sa využíva na reprezentovanie grafických objektov a ich transformácie na výstupné zariadenia.

Blender

Blender je voľne dostupný program na modelovanie a zobrazovanie 3D počítačovej grafiky a animácií. Rozhranie je vykresľované pomocou knižnice OpenGL. Pri vytváraní scriptov využíva programovací jazyk Python.

7.2 Triedy modelu

Náš virtuálny model sa skladá z 5 hlavných tried a to *Platna*, *Farba*, *Handra*, *Papier* a *Nastroj*.

Trieda Platna

Objekt triedy *Platna* si uchováva dáta pre vrstvu platne, ktorá je reprezentovaná ako dvojrozmerné pole float hodnôt, ktoré si uchovávajú hodnotu tretieho rozmeru. Toto pole využívame ako buffer, pre zobrazovanie využívame bitmapový obrázok typu *Image* GDI+ knižnice. Pri zobrazovaní sa v obrázku upravujú hodnoty šedej podľa výšky platne na vybranom mieste do RGB farebného modelu.

Trieda Farba

Objekt triedy *Farba* uchováva dáta pre vrstvu farby, ktorá je vytváraná po procese upravovania platne. Má svoj buffer ako dvojrozmerné pole, ktorého hodnoty hovoria o tretej súradnici. Pri zobrazovaní využívame bitmapový obrázok, ktorého alpha kanál predstavuje výšku náteru farby. Pre lepšie zobrazenie využívame červenú farbu, ktorej meníme viditeľnosť, aby náter farby bol ľahko rozoznateľný od povrchu platne, ktorá je pod ňou.

Trieda Handra

Objekt triedy *Handra* slúži na spracovanie bufferu patriaceho triede *Farba*. Spracovávaním tohto bufferu sa upravuje aj bitmapový obrázok, ktorý vidí používateľ. Ak handrička zasahuje mimo priestoru bufferu triedy *Farba*, okrajové podmienky jej v týchto priestoroch nastaví nulu. V nasledujúcom pseukóde je ukázané, ako sa handrička nastavuje a mení hodnoty triedy *Farba*.

Algorithm 7.1 Funkcia *handraFilter(x,y,rozmerHandry)* na prepočet novej výšky farby.

```
yPosition = rozmerHandry/2
half = rozmerHandry/2
velkostFiltru = rozmerHandry2
r1 = randPole(velkost, 0, 0.1)
r2 = randPole(velkost, 0, 1)
for i = 0 → (velkostFiltru − 1) do
    x0 = x + (i mod rozmerHandry − half)
    y0 = y + yPosition
    if isInCircle(x0, y0) then
        okrajovePodmienky(x0, y0)
        handraValue = min(compForces(x0, y0), farba(x0, y0))
        setHandraValue(x0, y0, handraValue)
        fv = farba(x0, y0) − (farba(x0, y0) * r1[i] + handra(x0, y0) + r2[i])
        farbaValue = max(fv, 0)
        setFarbaValue(x0, y0, farbaValue)
    end if
    if (i mod rozmerHandry) = (rozmerHandry − 1) then
        yPosition = yPosition − 1
    end if
end for
```

Parameter *yPosition* hovorí o *y* pozícii vo filtre, na začiatku má veľkosť polovice hrany filtra, neskôr sa znižuje a nadobúda najnižšiu hodnotu rovnú počiatkovej ale v záporných číslach. Podľa hodnoty *i* v cykle vieme určiť, či sme sa už vo filtri neposunuli v *y* smere. Ak áno, hodnotu zmenšíme o jedna. Pozí-

cia x je daná výrazom $(i \bmod \text{rozmerHandry} - \text{half})$, kde parameter half predstavuje číselnú hodnotu polovice rozmeru hanry. $r1$ a $r2$ sú polia veľkosti filtrov a generujú náhodne čísla v rozmedzí 0 až 0.1 pre $r1$ a 0 až 1 pre $r2$. $x0$ a $y0$ sú pozície v bufferi pre farbu. Upravujeme ich tak, aby postupne nadobúdali hodnoty pre pixely, ktoré handra pokrýva. Metóda $\text{isInCircle}(x, y)$ dovolí upravovať len tie pozície, ktoré vzhľadom na počiatočný zadaný pixel vytvárajú filter v tvare kruhu. Metóda $\text{okrajovePodmienky}(x, y)$ skontroluje, či pozícia x, y je v rozmedzí 2D poľa pre farbu, ak nie, na vybranej pozícii sa nastaví nula. Metóda $\text{compForces}(x, y)$ prepočíta sily pôsobiace na vybraný pixel a určí novú hodnotu handry na pozícii $x0, y0$. $\text{farba}(x0, y0)$ je hodnota farby na mieste $x0, y0$. Nová hodnota handry handraValue je vypočítaná ako minimum metódy $\text{compForces}(x0, y0)$ a výšky farby na pozícii $x0, y0$ preto, aby sme nepresiahli výšku farby a nesnažili sa zobrať viac farby, než je v danom priestore možné. fv určí, koľko farby na vybranom pixeli ostane po použití handričky. Nová hodnota farby farbaValue je vybraná ako maximum medzi parametrom fv a nulou, aby sme sa nedostali do záporných čísel. Metódy $\text{setHandraValue}(x, y, \text{handraValue})$ a $\text{setFarbaValue}(x, y, \text{farbaValue})$ nastaví hodnotu na pozícii x, y vo vybranej triede.

Trieda Papier

Táto trieda má vlastnú podtriedu *PaperValues* na lepšie ukladanie a spracovanie dát. Objekt triedy *Papier* je reprezentácia vrstvy papiera, ktorá spracováva dvojrozmerné pole *PaperValues* hodnôt ako buffer a bitmapový obrázok ako reprezentáciu dát pre užívateľa. Nasledujúci zjednodušený pseudokód zobrazuje postupnosť úkonov pri vytvorení objektu typu *Papier*.

Algorithm 7.2 Funkcia Papier(farba) na vytvorenie nového papiera.

Require: *farba* $\neq$ null
 mirror(*farba*)
 generatePaper()
 generateColors9()
 for $i = 0 \rightarrow (\text{pocetSimulacii} - 1)$ **do**
 if *papier*(x) $\neq$ *zaschnuty* **then**
 difuzia($x, \delta x, v, \delta t$)
 end if
 end for
 generateBitmapImage()

Buffer triedy *Farba* nesmie byť prázdny, aby sme mali čo otláčiť. Metóda *mirror(farba)* zabezpečí zrkadlové otočenie bufferu z triedy *Farba*. Nasledujúca metóda *generatePaper()* naplní buffer papiera novovytvorenými triedami *PaperValues* podľa hodnôt z triedy *Farba*. Farby pritom preškáľujeme a invertujeme podľa vzorca 6.23. Ďalšia metóda *generateColors()* nastaví prvotné farby na papieri podľa deviatich prahov, to znamená, že na obrázku pred simuláciou difúzie bude deväť odtieňov sivej. Ďalší krok je kontrola, či vybraný pixel ešte nie je zaschnutý. Ak nie je, spustí sa metóda *difuzia*($\delta x, v, \delta t$), ktorá simuluje difúziu farby. Difúzia sa opakuje dovtedy, kým farba zaschne alebo podľa parametru *pocetSimulacii*. Metóda *generateBitmapImage()* vytvorí bitmapový obrázok zobrazený užívateľovi.

Trieda Nastroj

Trieda *Nastroj* slúži na vytvorenie všetkých nástrojov, ktoré spracovávajú vrstvu platne. Objekty triedy *Nastroj* upravujú len buffer triedy *Platna*, ktorý automaticky aktualizuje aj bitmapový obrázok zobrazovaný užívateľovi. Ak matice nástrojov zasahujú mimo bufferu, okrajové podmienky nastaví v týchto priestoroch matíc nulu. Nasledujúci pseudokód zobrazuje, ako sa rôzne nástroje používajú pri zasahovaní do bufferu triedy *Platna*.

Algorithm 7.3 Funkcia `nastrojFilter(x,y,filter)` na prepočet novej výšky platne.

```
n = 1
rozmer = dlzkaStrany(filter)
if rozmer mod 2 = 0 then
    n = 0
end if
yPosition = rozmer/2
half = rozmer/2
velkost = rozmer2
maxPrvok = 0
for i = 0 → (velkost − 1) do
    x0 = x + (i mod rozmer − half)
    y0 = y + yPosition
    if atLeastOnePixelIn(x0, y0) then
        okrajovePodmienky(x0, y0)
        aktualny = platna(x0, y0)
        maxPrvok = Max(max, aktualny)
    end if
    if (i mod rozmer) = (rozmer − 1) then
        yPosition = yPosition − 1
    end if
end for
yPosition = rozmer/2
rnd = randPole(velkost, −1, 1)
for i = 0 → (velkost − 1) do
    x0 = x + (i mod rozmer − half)
    y0 = y + yPosition
    if atLeastOnePixelIn(x0, y0) and platna(x0, y0) > max − brusMax
    then
        okrajovePodmienky(x0, y0)
        newValue = filter[i mod rozmer, rozmer − ((yPosition + half) +
        n)] * skala + rnd[i] + platna(x0, y0)
        setPlatnaValue(x0, y0, newValue)
        clamp(x0, y0)
        setImage(x0, y0)
    end if
    if (i mod rozmer) = (rozmer − 1) then
        yPosition = yPosition − 1
    end if
end for
```

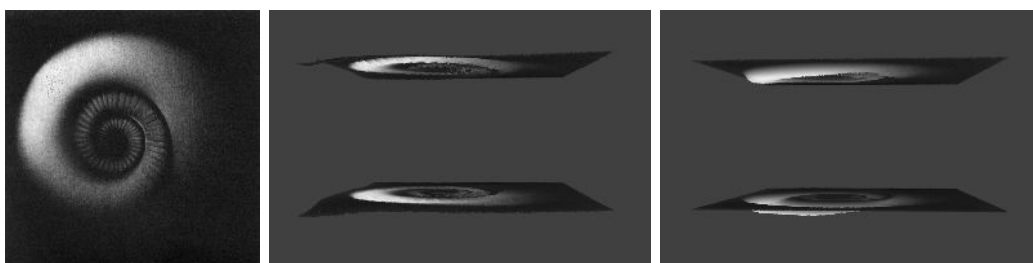
Parameter n hovorí o tom, či dĺžka hrany filtra vybraného nástroja je párne číslo alebo nepárne. Táto informácia nám neskôr posluží na výpočet pozície vo filtri. Parameter *rozmer* uchováva číselnú hodnotu o dĺžke hrany využívaného filtra. Pomocou *yPosition* vypočítame y pozíciu vo filtri. Na začiatku má *yPosition* veľkosť polovice hrany filtra, neskôr sa znižuje a nadobúda najnižšiu hodnotu rovnú počiatočnej ale v záporných číslach. Prvým cyklom hľadáme maximum v oblasti filtra v bufferi triedy *Platna*. $x0$ a $y0$ sú pozície v bufferi pre platňu a menia sa podľa toho, ktorú pozíciu vo filtri upravujeme. Podľa hodnoty i vieme určiť, či sme sa vo filtri už neposunuli v y smere, ak áno, hodnotu zmenšíme o jedna. Po nájdení maximálneho prvku v oblasti filtra resetneme *yPosition* a vytvoríme pole *rnd*, ktoré je dĺžky veľkosti filtra a uchováva hodnoty od -1 po 1. Ďalej prejdeme cyklom všetky pixle v oblasti filtra. Metóda *atLeastOnePixelIn*($x0, y0$) zistí, či aspoň jeden pixel filtra je v priestore platne. Druhá podmienka hovorí o tom, že neupravujeme prvky, ktoré sú nižšie ako nájdený maximálny prvok *maxPrvok* mínus konštanta *brusMax*, ktorá určuje najväčšiu možnú odchýlku od maximálneho prvku, kedy je ešte potrebné povrch upraviť. Metóda *okrajovePodmienky*($x0, y0$) skontroluje, či sa priestor celého filtra nachádza v oblasti platne. Hodnoty pixelov, ktoré sú mimo platne, nastavíme na nulu. Nová hodnota platne *newValue* je vypočítaná ako prvok filtra na príslušnom mieste k platni vynásobený škálovacím parametrom *skala*. K týmto hodnotám pripočítame aktuálnu výšku platne a pre nerovnomernosť vygenerovaný prvok pola *rnd*. Metóda *setPlatnaValue*($x0, y0, newValue$) nastaví novú hodnotu pre buffer platne. Metóda *clamp*($x0, y0$) skontroluje hodnotu na vybranom mieste v bufferi a ak sa vymyká rozmedziu od 0 po 255, oreže sa a uloží v bufferi. Posledná metóda *setImage*($x0, y0$) nastaví hodnotu s bufferu do zobrazeného obrázku.

7.3 Vizualizácia platne v blendri

Na vizualizáciu platne sme vytvorili script v blendri, ktorý nám vytvorí z 8-bitového obrázka 3D platňu pomocou dvoch metód a to displacement mapovanie s UV mapovaním textúry na objekt.

Displacement mapovanie požívame na rovinu s nastavenou textúrou na výškovú mapu vytvorenú predchádzajúcimi úkonmi. Súradnice každého texelu sú prepočítané podľa výškovej mapy a reálne posunuté po normále daného vrcholu. Intenzita daného texelu určuje veľkosť posunutia.

UV mapovanie je zobrazenie 2D textúry na povrch 3D objektu. UV označujú osi 2D textúry, pretože XYZ sú už použité pre 3D model v priestore. Objekty mávajú trojuholníkovú alebo štvoruholníkovú sieť. Takáto sieť je vytvorená aj na UV textúrovej mape, ktorej polygóny sa mapujú na polygóny povrchu 3D objektu.



Obr. 7.1: Prvý obrázok znázorňuje 8-bitový obrázok vytvorenej platne umelcom a nami jemne upravenej nástrojmi na škrabanie. Druhý obrázok znázorňuje vizualizáciu bez použitia UV mappingu a tretí obrázok s použitím UV mappingu.

Pri implementácii sme využili rozšírenie *io_import_images_as_planes*, ktoré nám dovolilo naimportovaný obrázok nastaviť ako objekt. Objektu sme vytvorili štvoruholníkovú sieť, ktorú sme rozčlenili tisíc krát, aby bola čo najhladšia. Obrázok sme ďalej nastavili ako textúru, ktorej sme priradili disp-

lacement mapping s UV mapovaním. Pre reálnejšie zobrazenie sme vytvorili shader pre medený povrch, ktorý nastavíme objektu ako posledný krok.

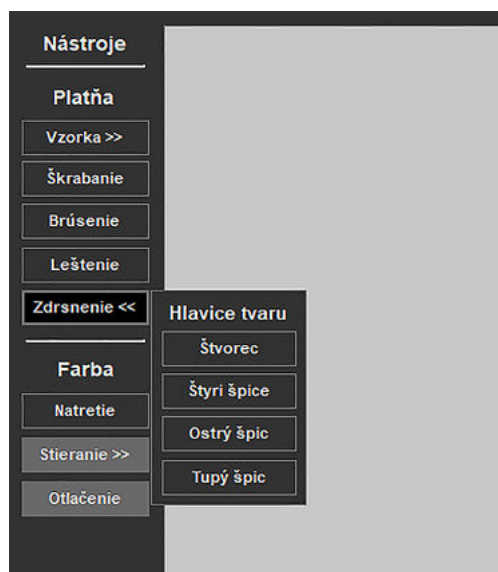
```
1 def 3Dplatna(image):
2
3     for scene in bpy.data.scenes:
4         for ob in scene.objects:
5             scene.objects.unlink(ob)
6             bpy.data.objects.remove(ob) # premazanie sceny
7
8     # vytvorenie objektu z obrazka z jednotnym tretim rozmerom
9     bpy.ops.import_image.to_plane(image)
10    bpy.ops.object.mode_set(mode='EDIT')
11    # rozclenenie povrchu 1000 krat
12    bpy.ops.mesh.subdivide(number_cuts=1000)
13    bpy.ops.object.mode_set(mode='OBJECT')
14    # vytvorenie textury z obrazku
15    heightTex = bpy.data.textures.new('image', type = 'IMAGE')
16    heightTex.image = bpy.data.images['image']
17    # priradenie modifikatoru typu displace s uv mapovanim textury
18    dispMod = bpy.data.objects['platna'].modifiers.new("Displace",
19                                                         type='DISPLACE')
20    bpy.context.object.modifiers["Displace"].strength = 0.02
21    bpy.context.object.modifiers["Displace"].texture_coords = 'UV'
22    bpy.context.object.modifiers["Displace"].mid_level = 0
23    dispMod.texture = heightTex
24    # nastavenie materialu pre objekt na "copper" vytvoreny v node
25    # editore ako shader
26    mat = bpy.data.materials.get("copper")
27    ob = bpy.data.objects['platna']
28    ob.active_material = mat
```

7.4 Rozhranie aplikácie

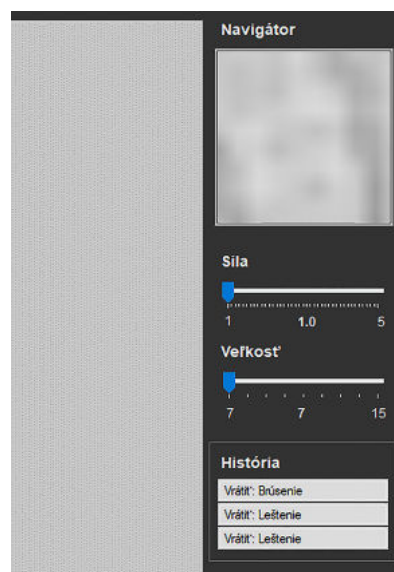
Všetky prvky aplikácie obsahujú tipy na použitie v podobe svetlého okienka s textom, ktoré sa zobrazí po prejdení prvku myškou. Aplikácia povoľuje ukladať prácu ako obrázok platne, ktorý môže užívateľ neskôr načítať do aplikácie a dokončiť zvyšné procesy, alebo ako výsledný obrázok papiera. Je možný aj import ľubovoľných obrázkov, ktoré aplikácia upraví na bitmapové šedotónové obrázky. Aplikácia sa skladá z troch hlavných panelov, a to ľavý, pravý a stredný.

V ľavom paneli sa nachádza celkový sled krokov, ako postupne vytvoriť obrázok pomocou techniky mezzotintu v podobe pod sebou radených tlačidiel. Tlačítka, ktoré sú sivé, sú neaktívne, pretože v danej fáze techniky mezzotintu by sa tieto kroky robiť nemohli. Tlačítka, ktoré majú napravo dvojité šípku, sa dajú rozkliknúť na zobrazenie ďalších možností v novom paneli. Podpanely neaktívnych tlačítok sa nedajú zobraziť.

Pravý panel obsahuje navigátor, ktorý pri držaní približuje plátno v mieste, kde má užívateľ práve myšku. Ďalej obsahuje dva bary na nastavenie sily a veľkosti pre vybrané nástroje a handričku. Ak sa niektorému nástroju nedá nastaviť veľkosť, bar na nastavenie nie je k dispozícii. Posledný prvok na pravom paneli je história, ktorá zobrazuje a pomenúva posledné tri kroky, ktoré užívateľ spravil. Pri kliknutí na niektorú položku z histórie zvrátime vybraný krok, ktorý je na nej napísaný. Pri kliknutí na starší krok zvrátime aj všetky, ktoré nastali po ňom, čiže platňa alebo farba bude identická ako pred vybraným krokom. História sa nedá kombinovať tak, že zvrátime napríklad predposledný krok, ale posledný krok ostane. Po otláčení farby na papier je história neaktívna a tento krok sa nedá zvrátiť.



(a) Ľavý panel používateľského rozhrania s nástrojmi na vytvorenie obrázka technikou mezzotintu.



(b) Pravý panel používateľského rozhrania obsahujúci navigátor, možnosť nastavenia sily a veľkosti pre vybraný nástroj alebo pre handričku a históriu, ktorou sa vieme vrátiť späť.

Obr. 7.2: Ľavý a pravý panel z používateľského rozhrania.

Stredný panel obsahuje plátno, ktoré postupne zobrazuje vrstvy platne, farby a papiera podľa toho, kde sa v procese mezzotintu práve nachádzame. Pri zapnutí aplikácie je plátno prázdne, treba vytvoriť nové v hlavnom menu položkou "New", kde si užívateľ nastaví veľkosť plátna. Plátno nehladiac na veľkosť, sa vždy zarovnáva do stredu plochy preňho vyhradenej. Plátno upravujeme nástrojmi, ktoré si nastavíme v ľavom paneli k príslušnej vrstve.

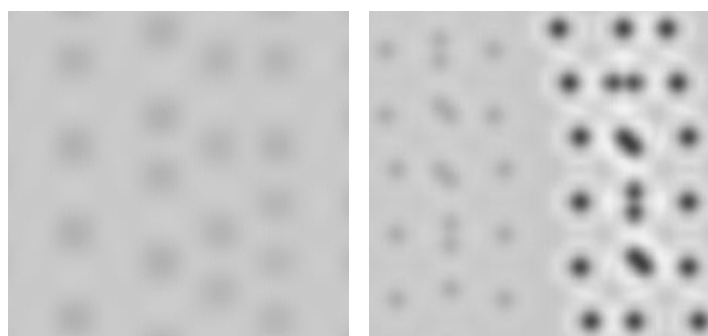
Kapitola 8

Výskum a výsledky

Výskum sme zamerali na to, aby sme sa čo najviac priblížili výsledkom z techniky mezzotintu. V prvom kroku sme postupne prispôbovali nástroje, aby ich použitím vznikali dôveryhodné výsledky. Následne sme odlaďovali handričku, ktorá odsáva farbu. Nakoniec sme sa sústredili na to, ako spraviť otláčanie farby presnejšie, aby bol výsledok porovnateľný s klasickými mezzotintovými prácami.

Nástroje na opracovanie platne

Nástroje sme implementovali presne podľa navrhnutých modelov. Obrázky upraveného povrchu vybraným nástrojom sú vytvorené po jednom ťahu nástroja, preto úpravy pôsobia jemnejšie. V skutočnosti treba na jednom mieste nástroj aplikovať veľa krát, aby sa dosiahol požadovaný efekt. Nástrojom sme preto nastavili možnosť škálovania. Tým simulujeme viacnásobný ťah nástrojov na rovnakom mieste po povrchu platne. Pre rýchlejšie spracovanie platne a vytvorenie vzorov a obrázkov sme nástrojom pridali možnosť nastaviť veľkosť hlavice vybraného nástroja. Možnosti nastavenia veľkosti nemajú všetky nástroje, iba nástroje na zdrsnenie a leštenie povrchu.

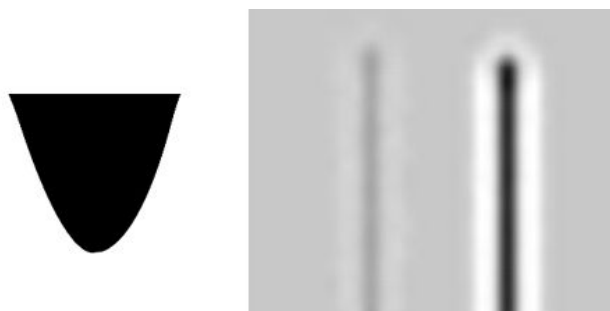


(a) Globálna vzorka.

(b) Lokálna vzorka s najnižším a najvyšším škálovacím parametrom.

Obr. 8.1: Nástroj na vytváranie vzorky po povrchu platne. Lokálna a globálna vzorka funguje rovnako, preto pri rovnakom parametri škálovania sú výsledky identické.

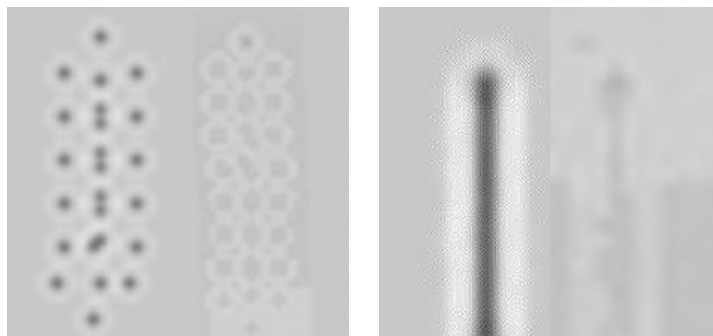
Nástroj na škrabanie využíva diskretnú formu opačného mexického klobúka, ktorým sme docieli to, že objem platne je zachovaný. Povrch platne, ktorý nástroj zatlačí sa v okolí priehlbiny vytlačí. Hlavica v obrázku 8.2 preto nie je ostrá, aby objem nezrezala a tým ho znížila, ale zachovala ho.



Obr. 8.2: Tvar hlavice nástroja pre škrabanie a jeho použitie na platni s najmenším a najväčším škálovacím parametrom.

Nástroj na leštenie povrchu v lokálnej oblasti platne povrch vyrovnáva. Snaží sa veľké výčnelky zatlačiť, a tým zaplniť priehlbiny. Ak v lokálnej časti povrchu platne nie sú žiadne výčnelky, len priehlbiny, znižuje sa okolie priehlbiny

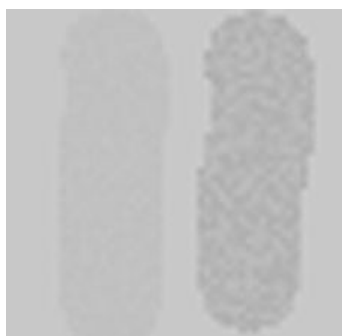
a tá sa vyplňa objemom platne, ktorý bol zobratý z okolia. Rovnako je to pri opačnom prípade, keď nemáme priehlbiny v lokálnej časti platne, ale len výčnelky, vtedy sa povrch platne v okolí zvyšuje a výčnelok znižuje. Obrázok 8.3 znázorňuje použitie nástrojov na škrabanie a na vytvorenie vzorky, na ktoré sme následne použili nástroj na leštenie.



(a) Lokálna vzorka s leštením (b) Škrabanie s leštením povrchu.

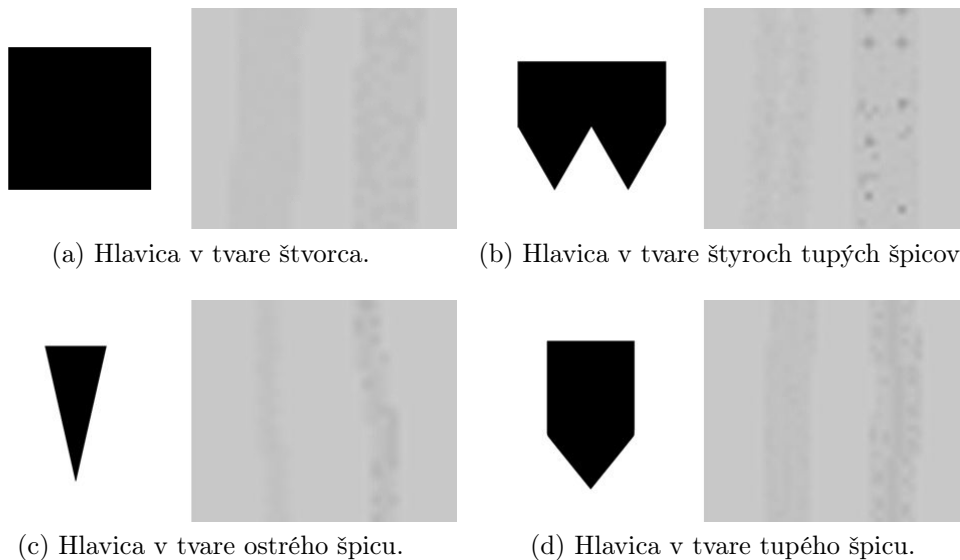
Obr. 8.3: Obrázky znázorňujú upravený povrch platne dvomi nástrojmi, na ktorý sme použili nástroj na leštenie. Zmenu po použití leštenia je vidieť na pravo od originálneho ťahu vybraným nástrojom.

Nástroj na brúsenie je veľkostí o dosť väčší ako ostatné nástroje a jeho veľkosť je fixná. Nástroj nerovnomerne zbrusuje lokálnu časť povrchu platne.



Obr. 8.4: Nástroj na brúsenie s použitým najmenším a najväčším škálovacím parametrom.

Posledná sada nástrojov bola určená na zdrsňovanie povrchu, aby nebol úplne hladký. Nástroje upravujú iba lokálnu časť platne. Zdrsňovaním povrchu ho musíme na niektorých miestach znížiť, aby sme vytvorili nerovnomernosti podľa typu hlavice.



Obr. 8.5: Nástroje na zdrsňovanie povrchu, obrázky ukazujú profily hlavíc nástrojov a ich použitie na platni s najmenším a najväčším škálovacím parametrom.

Použitie handry

Handre sme nastavovali rôzne rezistencie látky v priloženom mieste a v jeho štvoritom okolí. Konkrétne hovoríme o parametroch k_0 a k_4 s rovníc 6.18 a 6.19, ktoré sme otestovali v troch rôznych pomeroch. Pomer medzi k_4 a k_0 by mal byť vyšší, pretože chceme dosiahnuť jemne rozmazaného efektu na hraniciach, kde prešla hanra po farbe a kde sa jej nedotkla. Veľmi veľký pomer by ale spôsobil, že by hanrička odsávala málo farby. V konečnom dôsledku by sme síce dosiahli presnejšie výsledky, ale na úkor času užívateľa, ktorý by musel túto handičku v priestoroch, kde by chcel odstrániť všetku

farbu, prechádzať veľakrát. Nasledujúci obrázok znázorňuje, ako menila handra povrch farby s rôznymi k_0 a k_4 .



Obr. 8.6: Zľava je využitá handra s pomerom medzi k_4 a k_0 50:1, druhá handra má pomer 15:1 a tretia 1:1.

Takéto výsledky sme dosiahli, keď počiatkové hodnoty pre celý rozmer handry, aj pre jej neaktívne časti, boli rovné výške farby, aby sme ju nastavili priamo nad ňu. Takéto riešenie ale bolo nestabilné, pretože prvá iterácia nastavenia síl a tým aj nových hodnôt pre handričku úplne zmenila hodnoty handry od hodnôt, ktoré mala v nulej iterácii, keď sa ako počiatkové hodnoty využili výšky farby. Preto sme nastavili počiatkové hodnoty handry rovné nule, aby sme zaistili stabilitu pri viacerých iteráciách handry na rovnakom mieste. Potom sa zmena pomeru medzi rezistenciami látky v priloženom mieste k_0 a v štvorokolí priloženého miesta k_4 výrazne neobjavila pri nasávaní farby. Zmeny boli menej viditeľné a preto sme nechali pomer medzi k_0 a k_4 1 : 15. Rýchlosť akou sme prešli po farbe handrou, výrazne ovplyvnila množstvo nasatej farby. Na obrázku 8.7 je zachytený povrch platne s náno-

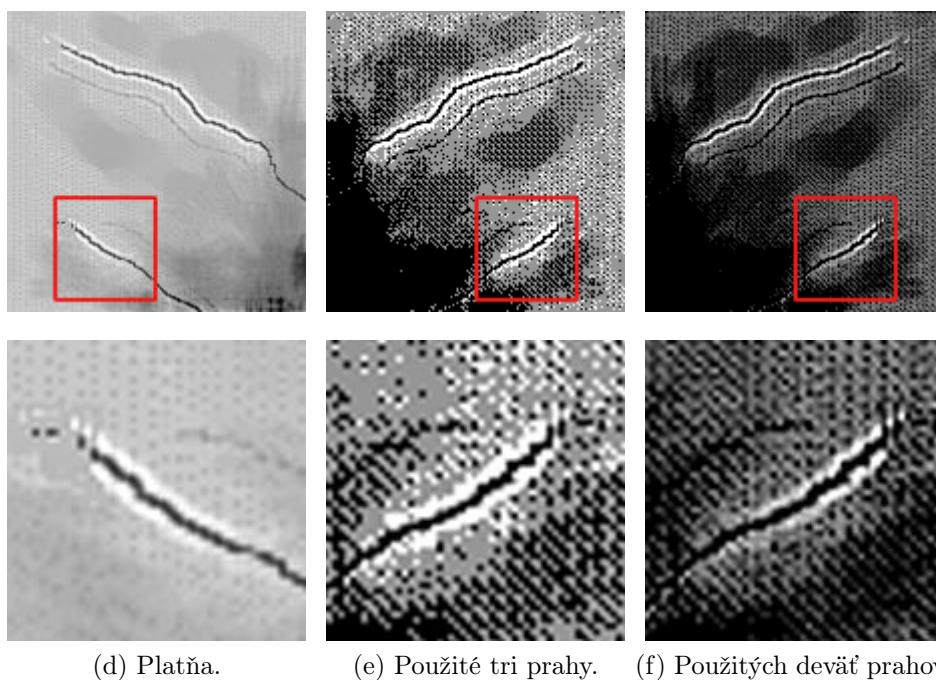
som farby, na ktorej sme dvakrát použili handričku s rôznou rýchlosťou ťahu, pri počiatočných hodnotách handry nastavených na nulu.



Obr. 8.7: Prvý ťah oproti druhému trval 6-krát kratšie na vykreslenie a to približne 1 sekundu.

Otlačenie farby na papier

Pri vyberaní počtu prahov pre odtiene šedej farby, ktoré sa otláčia na papier, sme pôvodne chceli mať len tri a to bielu, čiernu a jednu, čo by ich prepájala, nakoľko tlačiarenská farba má dosť veľkú viskozitu. Preto tam, kde sa otláči, je jednoducho úplne čierna farba a kde nie, je biela. Neskôr sme si ale uvedomili, že toto bolo mylné zmýšľanie, pretože ak priestor vyčistíme handričkou a zanecháme extrémne málo farby na niektorých miestach, úplne čierna farba z takých zvyškov nikdy nevznikne. Preto sme zvolili deväť prahov, uvedených v tabuľke 8.1, ktoré rozhodujú o tom, aký odtieň sivej bude otláčený podľa množstva farby na platni.



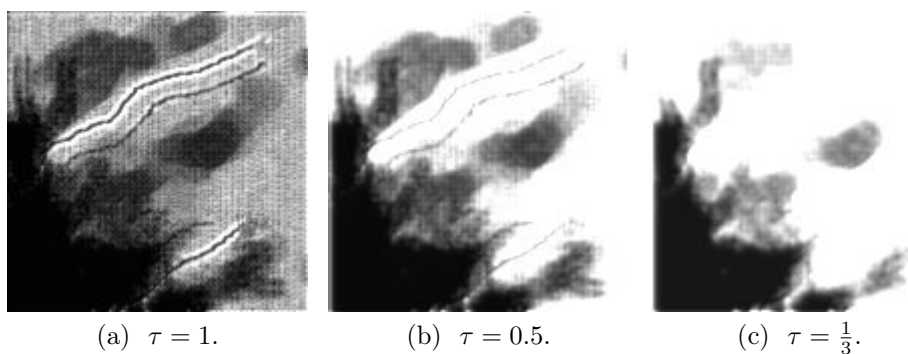
Obr. 8.8: Obrázky zľava znázorňujú lokálnu časť opracovanej platne a výsledky po aplikovaní farby a jej otláčení na papier pri použití rôznych počtov prahov. Obrázky sú vytvorené bez simulácie difúzie a zasychania farby. Spodný obrázok znázorňuje približenú časť obrázka nad ním.

Tabuľka hodnôt pre výpočet odtieňov farieb na papieri	
Prvý prah $th1$ a odtieň sivej	190,0
Druhý prah $th2$ a odtieň sivej	195,35
Tretí prah $th3$ a odtieň sivej	200,70
Štvrtý prah $th4$ a odtieň sivej	210,105
Piaty prah $th5$ a odtieň sivej	220,140
Šiesty prah $th6$ a odtieň sivej	235,175
Siedmy prah $th7$ a odtieň sivej	240,205
Ôsmy prahy $th8$ a odtieň sivej	245,230
Deviaty prah $th9$ a odtieň sivej	250,255

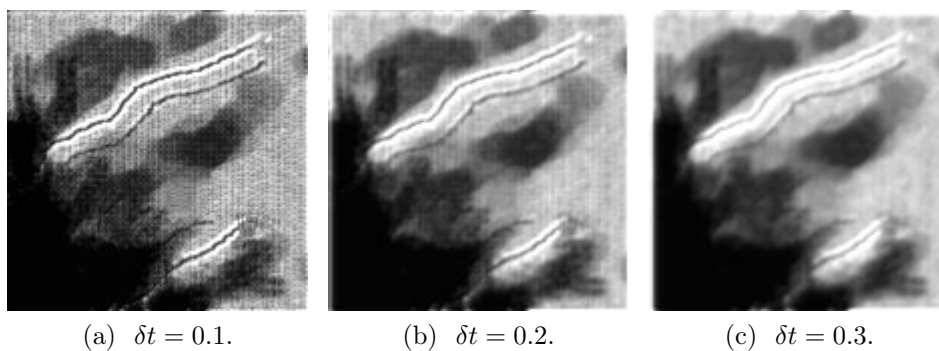
Tabuľka 8.1: Tabuľka zobrazuje prahy a hodnoty šedej, ktoré sme použili pri vytváraní prvotného otláčenia farby na papier bez difúzie.

Difúzia a zasychanie

Pri testovaní difúzie sme skúšali meniť parameter zasychania a časový krok simulácie. Ako príklad sú na obrázkoch 8.9 znázornené výsledky na papieri s rôznou dobou schnutia farby a na obrázkoch 8.10 s rôznym časovým krokom simulácie δt .



Obr. 8.9: Obrázky znázorňujú papier s nasatou farbou po simulovaní difúzie a zasychania farby s rôznym τ . Časový krok je pri všetkých obrázkoch použitý rovnaký $\delta t = 0.1$.



Obr. 8.10: Obrázky znázorňujú papier s nasatou farbou po simulovaní difúzie a zasychania farby s rôznym δt . Parameter schnutia je pri všetkých obrázkoch použitý rovnaký $\tau = 1$.

Najlepšie výsledky pri rôznych vzoroch sme dosahovali vtedy, keď parameter zasychania $\tau = 1$ a časový krok simulácie $\delta t = 0.1$.

Nasávanie farby handrou

Handra sa snaží prispôbiť tvarom povrchu, o ktorý je pritláčaná. Preto aj keď sa vytvoria veľké ryhy, farbu z nich jednoducho odstránime. Z úzkych a malých priehlbín je skoro nemožné farbu odstrániť, keď sa tam naniesie, pretože handra sa do takých malých priestorov nevie dostať a tým padom farbu nevie odsať. Na obrázku 8.11 sme použili nástroje na škrabanie a brúsenie povrchu platne. Po viacnásobnom odsávaní farby handrou v priestore, kde nástroje upravili povrch, sme farbu z brúseného povrchu odstránili úplne. Z miesta, kde sme využili nástroj na škrabanie, sme farbu nevedeli odstrániť z úzkeho rezu v platni.



Obr. 8.11: Na ľavom obrázku je znázornená platňa zoškrabnutým a zbrúseným povrchom. Na pravom obrázku je platňa s nánosom farby, ktorú sme v oblasti nerovnomernosti povrchu platne čistili handrou od farby. Farba sa z miesta, ktoré bolo brúsené a priehlbina mala veľký rozmer, ľahko odstránila. Z priestoru, kde rez do platne bol veľmi úzky a malý, sa farba nedala odstrániť, pretože sa tam handrička nevedela dostať.

Miesto vytvárania platne si môže užívateľ načítať ľubovoľný obrázok, ktorý sa pred zobrazením prehodí na bitmapový formát, zoškáluje sa, aby svojou výškou a šírkou nepresiahol priestor pre plátno a zarovná sa na stred. Obrázok

využitý ako platňa sa dá ďalej upravovať nástrojmi pre platňu, alebo rovno natrieť farbou. V sérii obrázkov 8.12 sme využili ako platňu obrázok, ktorý sme nástrojmi určenými pre platňu neupravovali, pretože sme chceli hlavne ukázať, ako handrička na nasávanie farby dokáže ovplyvniť výsledný obrázok. Používali sme takzvanú globálnu handru, ktorá využíva nastavenú veľkosť pre handru a odsaje s ňou vrchný nános farby. Lokálnu handričku sme použili na úpravu vybraných častí farby.



(a) Bez použitia handry.



(b) Po použití globálnej handry raz.



(c) Po použití globálnej handry raz a lokálnej handry v oblasti tváre mačky.



(d) Po použití lokálnej handry v oblasti očí, papule a kožuchu okolo očí.

Obr. 8.12: Obrázky znázorňujú rôzne odsatie farby s použitím handry.

Na ďalšej sérii obrázkov 8.13 a 8.14 ako prvé porovnáваме vrstvy farieb po rôznom odsatí handrou a výsledky k príslušnej farbe. Ako druhé porovnáваме náš výsledok s výsledkom umelca, ktorý platňu navrhol a vyrobil.



(a) Nedostatočné odsatie farby v oblasti tváre.



(b) Vrstva farby, ktorá je dostatočne odsatá na miestach, ktoré ukazujú dôležité detaily.



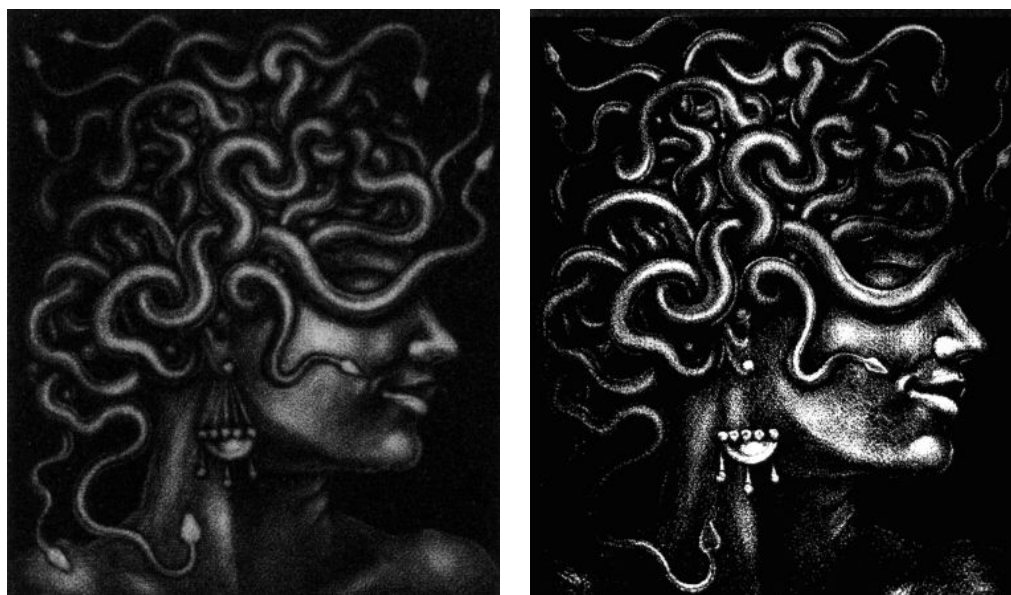
(c) Výsledný otlačok, ktorý je zlý pretože množstvom farby na určitých miestach zničil detaily.



(d) Výsledný otlačok pri lepšie odsatej farbe.

Obr. 8.13: Obrázky znázorňujú výsledný otlačok a vrstvu farby pri rôznom odsatí farby s použitím handry.

Obrázok použitej platne sa nám podarilo nájsť iba deformovaný uhlom fotenia a jemne viac osvietený v oblasti vlasov, preto črty tváre na našom obrázku úplne nezodpovedajú výslednému výtlačku umelca.



(a) Originál výtlačok [Far].

(b) Náš výsledok.

Obr. 8.14: Porovnanie virtuálneho modelu k skutočnému výsledku. Použitý obrázok platne bol jemne viac osvietený v oblasti vlasov a bol deformovaný uhlom fotenia, preto črty tváre úplne nezodpovedajú originálu.

Výsledok nášho virtuálneho modelu a skutočného procesu mezzotintu nemôžu byť nikdy úplne identické, nakoľko nevieme ako autor výtlačku odsával farbu handrou, akú silu zvolil, kde neodsával handričkou vôbec a kde naopak veľa. Handru sme použili tak, ako to naoko vyzeralo, že ju použil autor vzhľadom na výtlačok. Po testovaní všetkých nástrojov, vrstiev a procesov sme vytvorili nasledujúcu tabuľku, ktorá zhrňuje všetky hodnoty parametrov, ktoré sme určili ako najvhodnejšie pre náš virtuálny model. V tabuľke využívame pri parametroch týkajúcich sa platne a farby ako vrstiev, nami definované výškové jednotky, ktoré popisujeme v kapitole 5.1.

Tabuľka hodnôt	
Inicializačná výška platne P_{init}	200
Minimálna výška platne P_{min}	10
Maximálna výška platne P_{max}	255
Brúsiaci parameter (Sila brúsenia) F_b	5
Odchýlka pre brúsenie rb	5
Výška náteru farby I_{high}	20
Rezistencia látky v priloženom mieste k_0	10
Rezistencia látky v štyroch okolitých smeroch k_4	150
Koľko farby sa otlací na papier γ	0.9
Viskozita farby v	5.751
Časový krok difúzie δt	0.1
Parameter schnutia farby τ	1

Tabuľka 8.2: Tabuľka zobrazuje hodnoty, ktoré sme použili pri vytváraní výsledkov. Parametre, ktoré opisujú platňu alebo farbu sú vo výškových jednotkách spomínaných v kapitole 5.1.

Kapitola 9

Záver

Stanovené ciele sa nám podarilo splniť. Vytvorili sme aplikáciu, ktorá simuluje proces špeciálneho typu hĺbkotlače - mezzotintu. Proces sme rozdelili do viacerých vrstiev, z ktorých sme každej navrhli a implementovali samostatný virtuálny model. Algoritmus je robustný, pretože môžeme pracovať s vlastnými vytvorenými dátami alebo ľubovoľnými importovanými obrázkami, ktoré nahradia platňu a tým zjedodušia proces vytvárania výsledného obrazca. Matematické modely simulácií sú stabilné, pretože hodnoty dát vrstiev sa prudko nemenia iteráciami simulácií nástrojov, handry alebo správania sa farby. Pri handre využívame pružinový model, ktorý zachováva rovnováhu síl a simuluje postupne odsávanie farby z povrchu platne. Pri poslednom kroku, kedy vytvárame výtláčok z platne za použitia zvyšnej farby, simulujeme jej difúziu s papierom a postupné zasychanie farby.

Literatúra

- [Buc14] Quenby Bucklaew. 2014 projects: Mezzotint. <https://qbucklaew.com/page/3/>, 2014. Navštívené: 21. november 2017.
- [Far] Nancy Farmer. A first attempt at mezzotint. <https://nancyfarmer.wordpress.com/2011/12/23/a-first-attempt-at-mezzotint-part-3/>. Navštívené: 16. apríl 2019.
- [Hub] Jim Hubbman. The mezzotint process. <http://jimhubbman.calkinsc.com/mezzotint/mezzotint.htm>. Navštívené: 21. november 2017.
- [Lou95] Tino Lourens. Modeling retinal high and low contrast sensitivity filters. In *From natural to artificial neural computation*, pages 61–68, 06 1995.
- [mez] Roulette. <http://art-design-glossary.musabi.ac.jp/roulette/>. Navštívené: 22. november 2017.
- [Mor] Holly Morrison. Platemaking. <http://www.hollymorrison.com/html/platemaking/tools.html>. Navštívené: 22. november 2017.

- [TKMO07] Daisuke Tasaki, Megumi Katou, Shinji Mizuno, and Minoru Okada. Physical model to achieve virtual mezzotint. *Ipsj Digital Courier*, 3:244–254, 01 2007.
- [TMO04] Daisuke Tasaki, Shinji Mizuno, and Minoru Okada. Virtual drypoint by a model-driven strategy. *Comput. Graph. Forum*, 23(3):431–440, 2004.
- [TMO05] Daisuke Tasaki, Shinji Mizuno, and Minoru Okada. Virtual mezzotint using a model-driven strategy. In *32. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2005, Los Angeles, California, USA, July 31 - August 4, 2005, Posters*, page 33, 2005.
- [17] R. Ďurikovič and Z. Páleníková. Real-time watercolor simulation with fluid vorticity within brush stroke. In *2017 21st International Conference Information Visualisation (IV)*, pages 158–163, July 2017.

Zoznam obrázkov

2.1	Vytváranie vzoru na platni pomocou polkruhového oceľového noža [Buc14].	5
2.2	Kotúčové zrnice na vytváranie vzorky po povrchu platne [mez].	5
2.3	Rôzne nástroje využívané pri technike mezzotintu na vytváranie obrazca do platne [Mor].	6
2.4	Proces nanesenia farby a vytváranie tieňovania [Hub].	7
2.5	Vytvorenie obrazu [Hub].	8
3.1	Na prvom obrázku zľava vidieť skutočný výsledok po technike suchou ihlou, na druhom obrázku je použitý virtuálny model navrhnutý v tomto článku [TMO04].	10
3.2	Na prvom obrázku zľava je skutočný výsledok po technike mezzotintu, na druhom obrázku je použitý virtuálny model navrhnutý v tomto článku [TKMO07].	11
4.1	Obrázky znázorňujú, ako sa priloží vrstva farby na povrch platne. Druhý obrázok je z pohľadu rezu vrstiev.	12
4.2	Prvý obrázok zľava znázorňuje vrstvu farby a neaktívnu vrstvu hadry. Druhý obrázok je z pohľadu rezu vrstiev, kde handra je pritlačená k povrchu platne a odsáva farbu.	13

4.3	Obrázok znázorňuje vrstvy modelu vo finálnom kroku, kedy sa farba otláča na papier.	13
5.1	Obrázok znázorňuje priečny pohľad na platňu pri pridaní farby. Sivý priestor znázorňuje miesta, kde je výška farby automaticky pridaná.	16
5.2	Obrázok znázorňuje handričku vyznačenú čiarkovaným okrajom, ktorá zasahuje do výšky farby a odsáva ju, pričom sa snaží prispôbiť výške platne, aby nebrala z priestorov, kde nedosiahne.	17
5.3	Nerovnomerná štruktúra papiera.	17
5.4	Obrázok znázorňuje, ako papier nasáva farbu. Povrch papiera je nerovnomerný a jeho celá výška je označená h . Výška farby nanesenej na povrch papiera je označená premennou g a výška absorbovanej farby do papiera je označená a	18
6.1	Mexický klobúk v 3D priestore.	20
6.2	Funkcia označená M je mexický klobúk vytvorený odčítaním funkcie S od C	22
6.3	Mexický klobúk obrátený tak, aby vyzeral ako zárez do platne.	23
6.4	Vzorka pre povrch platne po využití mexického klobúka. Obrázok znázorňuje ľavý horný roh platne, kde svetlejší tón šedej znamená vyššiu výšku platne.	24
6.5	Využitie otočeného mexického klobúka ako štetca.	25
6.6	Obrázok znázorňuje pohľad zboku na hlavice nástrojov. Zľava na hlavicu v tvare kocky, štyroch špicov, ostrého a tupého špica.	27

6.7	Proces medenej platne po lokálnom leštení. Vľavo hore je pôvodná platňa. Na pravo od nej je platňa po vytvorení rýh. Vľavo dole je platňa po procese brúsenia a vedľa nej po leštení.	31
6.8	Prvý obrázok znázorňuje päť pružiniek ovplyvňujúcich bod $C_{i,j}$ a jeho štyri okolité body, ktoré tlačí nižšie. Druhý obrázok znázorňuje pohľad zboku na pružinky.	34
7.1	Prvý obrázok znázorňuje 8-bitový obrázok vytvorenej platne umelcom a nami jemne upravenej nástrojmi na škrabanie. Druhý obrázok znázorňuje vizualizáciu bez použitia UV mappingu a tretí obrázok s použitím UV mappingu.	45
7.2	Ľavý a pravý panel z používateľského rozhrania.	48
8.1	Nástroj na vytváranie vzorky po povrchu platne. Lokálna a globálna vzorka funguje rovnako, preto pri rovnakom parametri škálovania sú výsledky identické.	50
8.2	Tvar hlavice nástroja pre škrabanie a jeho použitie na platni s najmenším a najväčším škálovacím parametrom.	50
8.3	Obrázky znázorňujú upravený povrch platne dvomi nástrojmi, na ktorý sme použili nástroj na leštenie. Zmenu po použití leštenia je vidieť na pravo od originálneho ťahu vybraným nástrojom.	51
8.4	Nástroj na brúsenie s použitým najmenším a najväčším škálovacím parametrom.	51
8.5	Nástroje na zdrsňovanie povrchu, obrázky ukazujú profily hlavíc nástrojov a ich použitie na platni s najmenším a najväčším škálovacím parametrom.	52

8.6	Zľava je využitá handra s pomerom medzi k_4 a k_0 50:1, druhá handra má pomer 15:1 a tretia 1:1.	53
8.7	Prvý ťah oproti druhému trval 6-krát kratšie na vykreslenie a to približne 1 sekundu.	54
8.8	Obrázky zľava znázorňujú lokálnu časť opracovanej platne a výsledky po aplikovaní farby a jej otlačení na papier pri použití rôznych počtov prahov. Obrázky sú vytvorené bez simulácie difúzie a zasychania farby. Spodný obrázok znázorňuje približnú časť obrázka nad ním.	55
8.9	Obrázky znázorňujú papier s nasatou farbou po simulovaní difúzie a zasychania farby s rôznym τ . Časový krok je pri všetkých obrázkoch použitý rovnaký $\delta t = 0.1$	56
8.10	Obrázky znázorňujú papier s nasatou farbou po simulovaní difúzie a zasychania farby s rôznym δt . Parameter schnutia je pri všetkých obrázkoch použitý rovnaký $\tau = 1$	56
8.11	Na ľavom obrázku je znázornená platňa zoškrabnutým a zbrúseným povrchom. Na pravom obrázku je platňa s nánosom farby, ktorú sme v oblasti nerovnomernosti povrchu platne čistili handrou od farby. Farba sa z miesta, ktoré bolo brúsené a priehlbitina mala veľký rozmer, ľahko odstránila. Z priestoru, kde rez do platne bol veľmi úzky a malý, sa farba nedala odstrániť, pretože sa tam handrička nevedela dostať.	57
8.12	Obrázky znázorňujú rôzne odsatie farby s použitím handry. . .	58
8.13	Obrázky znázorňujú výsledný otlačok a vrstvu farby pri rôznom odsatí farby s použitím handry.	59

8.14 Porovnanie virtuálneho modelu k skutočnému výsledku. Pou- žitý obrázok platne bol jemne viac osvietený v oblasti vlasov a bol deformovaný uhlom fotenia, preto črty tváre úplne ne- zodpovedajú originálu.	60
--	----