

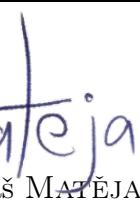
VYSOKÁ ŠKOLA UMĚLECKOPRŮMYSLOVÁ  
v PRAZE

STÁTNÍ DOKTORSKÁ ZKOUŠKA

---

# Metody rozptylování obecné množiny prvků v prostoru

---

*Autor*   
MgA. Lukáš MATĚJA

*Školitel*  
M.A. Ivan DLABAČ

 *Kozultant*  
Mgr. Pavla PAUNKNEROVÁ PhD

1. října 2019

## Abstrakt

Princip dithering je již několik desetiletí v hojně míře používán zejména při kvantizaci analogových (spojitých) dat do digitálních (diskrétních) dat, jako například zpracování audio signálu či obrazu do digitální podoby. Tato práce se zabývá historií ditheringu, vybranými metodami obrazového ditheringu, jeho omezeními a možnostmi. Na jejich základě jsou následně navrženy metody použitelné v oblasti prostorového designu. Jednotlivé metody jsou následně porovnávány podle různých aspektů, jako je výpočetní náročnost, paralelizovatelnost či celkový dojem.

*The principle of dithering has been used extensively for several decades, especially in the quantization of analogue (continuous) data into digital (discrete) data, such as the processing of audio signal or images into digital form. This paper deals with the history of dithering, selected methods of image dithering, its limitations and possibilities. On the basis of these are suggested methods applicable in the area of 3D design. Individual methods are then compared according to various aspects such as, computational demands, parallelization or general impression.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Historie ditheringu</b>	<b>4</b>
2.1	Náhodný dithering . . . . .	4
2.2	Floyd-Steinbergův dithering . . . . .	5
2.3	Jarvis, Judice a Ninkeho dithering . . . . .	5
2.4	Další metody distribuce kvantizační chyby . . . . .	6
2.5	Řízený dithering . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Estetika ditheringu</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Dithering obecných bodů v prostoru</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Mnou navržené metody</b>	<b>11</b>
5.1	Náhodný dithering . . . . .	11
5.2	Matějův vzdáleností řízený dithering . . . . .	12
5.2.1	Pořadí prvků . . . . .	15
5.3	Vzdáleností řízený dithering s přidaným šumem . . . . .	16
5.4	Nastavení parametrů . . . . .	16
5.4.1	Vzdálenost / počet sousedních bodů . . . . .	16
5.4.2	Míra přidaného šumu . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Ukázka aplikace</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>24</b>

# 1. Úvod

Ve své designérské praxi se často setkávám s požadavkem na „měkké či náhodné“ vytrácení či prolnutí prvků v prostoru, a to tak, aby přechod působil co nejvíce „přirozeně“ a nevznikaly nežádoucí artefakty jako klastry, opakující se vzory či linie. Jediná, obecněji použitelná, existující metoda náhodného ditheringu (viz kapitola 5.1 str. 11) vytváří neuspokojivé výsledky, které nedosahují kvality ručního zpracování. Proto jsem se rozhodl pokusit se navrhnout takovou metodu, která by vytvářela esteticky příjemnější přechod (viz kapitola 3 str. 9) mezi oblastmi bez přítomnosti prvků až po oblast plného pokrytí (bez vynechání prvků).

Mnou navržená metoda (viz kapitola 5.2 str. 12) se inspiruje existujícími metodami obrazového ditheringu, jejichž stručná historie je rovněž součástí této práce (viz kapitola 2 str. 4). Oproti těmto metodám umožňuje pracovat nad nesetříděnou množinou prvků v n-rozměrném prostoru (viz kapitola 4 str. 10).

V závěru této práce (kapitola 6 str. 19) jsou uvedené jednoduché příklady použití mnou navržené metody na takových datech, na kterých by popsané metody obrazového ditheringu byly nepoužitelné a na kterých by náhodný dithering (kapitola 5.1 str. 11) zdaleka nevytvořil takto kvalitní výsledky.

## 2. Historie ditheringu

S pojmem „dither“ jako první přichází roku 1944 William C. Farmer, který si všiml, že mechanické počítače na palubách letadel určené pro výpočet navigace a trajektorie bomb fungují přesněji za letu než při simulacích na zemi, a že jsou schopné za letu reagovat na mnohem jemnější změny signálu [Farmer, 1944, str. 357]. Tento fakt přisoudil drobným a nepravidelným otřesům (v angličtině: *didderen*), které nazval uvdither [Pohlmann, 2005].

### 2.1. Náhodný dithering

V šedesátých letech dvacátého století se přímým užitím principu ditheringu zabývá americký vědec Lawrence G. Roberts, který jej poprvé cíleně používá jako metodu pro zmírnění kvantizačních vzorců [Roberts, 1962]. Roberts navrhuje první algoritmus ditheringu, dnes běžně nazývaný jako "náhodný dithering", pomocí něhož řeší problémy s nízkou kvalitou tehdejších zobrazovacích jednotek (2-4 bitová hloubka) [Hiroaki Kotera, 1999, str. 1] a datových nároků na převod analogového signálu do digitální podoby při zachování pocitu větší datové hloubky (jemnosti přechodů).

Náhodný dithering funguje na principu přidání šumu do signálu (dat) před jejich samotným kvantováním [Hiroaki Kotera, 1999, str. 1]. Roberts používá bílého šumu, který má v celém spektru konstantní hustotu<sup>1</sup>. Díky tomu při kvantování nevzniká ostrá hranice, jaká by vznikla při prahování, ale statisticky plynulejší rozptylování, které se v makro-měřítku více blíží originálním datům.

---

<sup>1</sup>Zastoupení jednotlivých odstínů je rovnoměrné.

$$\begin{bmatrix} * & \frac{7}{16} \\ \frac{3}{16} & \frac{5}{16} & \frac{1}{16} \end{bmatrix}$$

Obrázek 2.1: Matice pro Floyd-Steinbergův dithering

## 2.2. Floyd-Steinbergův dithering

V 70. letech Robert W. Floyd a Louis Steinberg přicházejí s vlastním algoritmem [R.W. Floyd, 1976, str. 75 - 77] pojmenovaným Floyd–Steinbergův dithering, který místo přimíchaní náhodného šumu požívá matici, pomocí které rozprostírá chybu vzniklou při kvantování do okolí<sup>2</sup>. Tímto způsobem se celková kvantizační chyba blíží nule<sup>3</sup>. Aby se matice dala snadno zpracovávat na počítacích pracujících s binární logikou, jsou veškeré váhy v matici násobky 1/16, a tudíž lze použít bitového posunu, který výrazně snižuje výpočetní nároky.

V porovnání s náhodným ditheringem tato metoda dosahuje mnohem čitelnějších výsledků (viz Obrázek 2.2) při zachování stále poměrně nízkých výpočteních nároků. Nevýhodou je, že ve specifických oblastech může docházet ke vzniku artefaktů: míst s nepřijemnými opakujícími se vzory.

## 2.3. Jarvis, Judice a Ninkeho dithering

Princip distribuce kvantizační chyby je dále rozvíjen a je navrženo velké množství obdobných algoritmů. Jarvis, Judice a Ninkeho dithering pracuje místo  $3 \times 2$  maticí s  $5 \times 3$  maticí. z tohoto důvodu dosahuje výrazně jemnějších výsledků s menším počtem artefaktů, ale výpočetně je výrazně náročnější [Helland, 2016]. a to také pak z důvodu, že základní zlomek je 1/48 a nelze již použít bitového posunu jako v případě Floyd-Steinbergova ditheringu. Výhodou pak může být jen to, že v matici se nachází pouze 4 různé zlomky<sup>4</sup>,

<sup>2</sup>Vždy jen ve směru ještě nezpracovaných dat, aby stačil na zpracování pouze jediný průchod.

<sup>3</sup>V místech, kde nelze část kvantizační chyby předat dále, musí být zahozena. To se ale zpravidla děje jen na okrajích obrázku a nemá to velký vliv na celkový efekt.

<sup>4</sup>pouze 1/48, 3/48, 5/48, 7/48



Obrázek 2.2: Původní obrázek; Prahování; Náhodný dithering; Floyd-Steinbergův dithering

$$\begin{bmatrix} * & \frac{7}{48} & \frac{5}{48} \\ \frac{3}{48} & \frac{5}{48} & \frac{7}{48} & \frac{5}{48} & \frac{3}{48} \\ \frac{1}{48} & \frac{3}{48} & \frac{5}{48} & \frac{3}{48} & \frac{1}{48} \end{bmatrix}$$

Obrázek 2.3: Matice pro JJN dithering

které lze opakovaně použít při přerozdělování chyby a není je třeba přepočítávat.

## 2.4. Další metody distribuce kvantizační chyby

Pět let po JJN ditheringu přichází Peter Stucki se svou verzí (nazvanou Stuckiho dithering). Princip distribuce kvantizační chyby zůstává stejný. Svojí verzí matice dosahuje obdobných výsledků a nižší výpočetní náročnosti [Helland, 2016]. Další obdobnou metodou je Burkesův dithering používající matici  $5 \times 2$  a veškeré výpočty (z důvodu vah dělitelných dvěma) je možné dělat pomocí bitového posuvu. Za zmínu stojí také Atkinsonův dithering, který na rozdíl od výše zmiňovaných metod nerozděluje celou kvantizační chybu ale pouze její část<sup>5</sup>. v kvantizační matici potom používá váhu  $1/8$ , pomocí které chybu přenáší na

---

<sup>5</sup>Rozděluje pouze  $3/4$  a jednu čtvrtinu zahazuje.

$$\begin{bmatrix} * & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{8} & \end{bmatrix}$$

Obrázek 2.4: Matice pro Atkinsonův dithering

$$\begin{bmatrix} 0 & 8 & 2 & 10 \\ 12 & 4 & 14 & 5 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 15 & 7 & 13 & 5 \end{bmatrix}$$

Obrázek 2.5:  $4 \times 4$  Matice pro řízený dithering

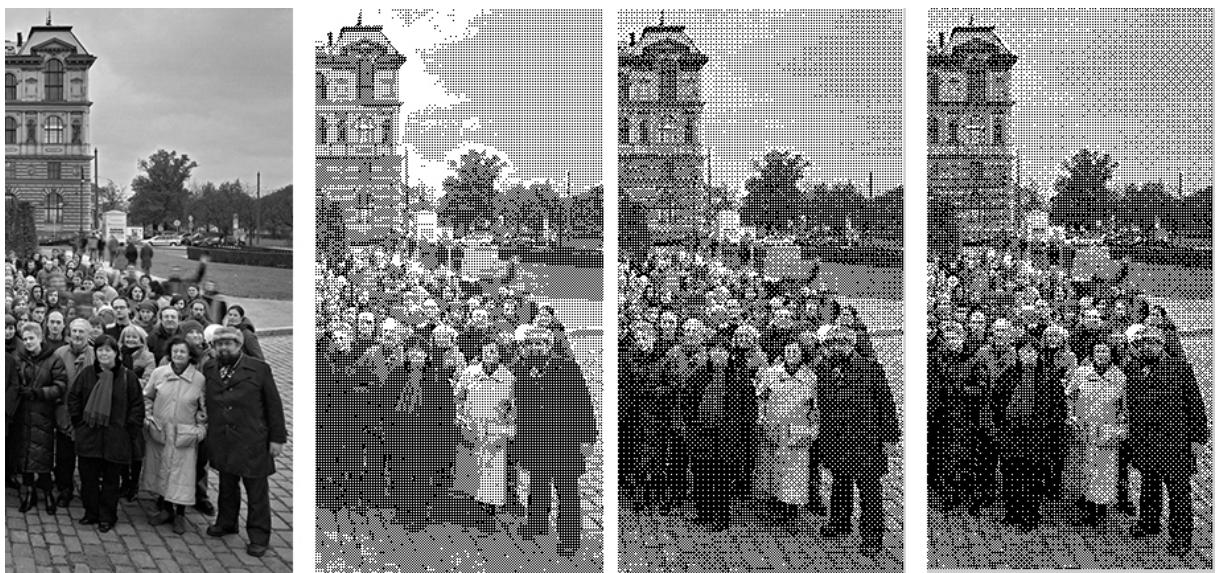
6 různých míst. Pouze částečné rozdělení kvantizační chyby má ale za následek „přepálení“ obrazu v nejsvětlejších odstínech a naopak ztmavnutí ve velmi tmavých částech.

## 2.5. Řízený dithering

s odlišným přístupem od zmínovaných metod přerozdělování kvantizační chyby přichází roku 1973 Americký vědec Bryce E. Bayer. Navrhuje metodu řízeného ditheringu, kde pomocí takzvaných matic prahových hodnot<sup>6</sup> kvantizuje vstupní data. Tato mapa se po blocích opakováně aplikuje na vstupní obraz a následně je v každém bodě provedeno prahování podle příslušné hodnoty z matice. [Plec, 2014, str. 28]. Tato metoda je poměrně rychlá, ale z důvodu pravidelného opakování matice prahových hodnot má sklon k vytváření pravidelných artefaktů a zejména u  $2 \times 2$  matice dochází stále k tvorbě nepřijemných prahů (viz Obrázek 2.6).

---

<sup>6</sup>Anglicky: threshold maps.



Obrázek 2.6: Původní obrázek; Řízený dithering s maticí  $2 \times 2$ ; Řízený dithering s maticí  $4 \times 4$ ; Řízený dithering s maticí  $8 \times 8$

### 3. Estetika ditheringu

Z principu ditheringu vyplývá, že po jeho aplikaci mohou v rozložení vznikat rozličné artefakty, které můžou být v určitém měřítku poměrně rušivé. Nejlépe na člověka působí takové rozložení bodů, které se blíží charakteristice modrého šumu. Právě porovnání spektrogramu daného rozložení s modrým šumem se používá při hodnocení samplovacích metod v prostoru. Bohužel v případě ditheringu jsou pozice bodů pevně vázány na původní mřížku a spíše než vyhodnocování vzdáleností mezi body je důležitější eliminace pravidelných linií a shluků. Ideální metoda by měla poskytovat takové výsledky, kde se tyto artefakty vyskytují v co nejmenší míře. Nalézt a vytvořit metodu na hodnocení těchto parametrů je nad rámec této práce, a proto se pouze odkážu na dvě subjektivní srovnání, které provedli v roce 2012 Pavel Štefaník [Štefaník, 2012, str. 28 - 34] a v roce 2014 Lukáš Plec [Plec, 2014, str. 41 - 57]. V jejich srovnání jasně vedou metody distribuce kvantizační chyby na náhodném a řízeném ditheringem. Zcela nejhůř podle očekávání dopadá prahování. Rozdíly mezi jednotlivými metodami distribuce kvantizační chyby se ukázaly být malé a pro různá data se osvědčily různé metody. Proto z tohoto subjektivního průzkumu nelze jednoznačně určit nejlepší metodu.

## 4. Dithering obecných bodů v prostoru

Plynulé rozptylování prvků je žádaný přístup i při návrhu rozmístění prvků v oblasti prostorového designu<sup>1</sup>. V mnoha aplikacích je třeba pracovat s diskrétní množinou stavů<sup>2</sup> a dosáhnout esteticky příjemného přechodu, který bude v makro měřítku působit plynulým dojmem. Zároveň je třeba zamezit vzniku nežádoucích artefaktů.

Přímé aplikaci existujících algoritmů distribuce kvantizační chyby či řízeného ditheringu ale brání několik odlišností. Původní algoritmy vychází z předpokladu, že prvky se nacházejí na pravidelné čtvercové mřížce s konstantním počtem řádků i sloupců a jednotnou vzdáleností mezi nimi. Což je ale v naprosté většině požadovaných aplikací nedosažitelné. Hledaný algoritmus by měl dovolovat pracovat i s prvky v jiném, pravidelném i zcela nepravidelném, uspořádání. Neměl by vyžadovat konstantní počet řádků a sloupců. a měl by pracovat nad jednorozměrnou nesetříděnou množinou prvků<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup>Klidně bych napsal jen průmyslový design, ale týká se to i architektury, atp.

<sup>2</sup>Prvek buď na dané pozici bude či nebude.

<sup>3</sup>Neseřazených do vícerozměrného pole podle příslušnosti k řádku a sloupci.

# 5. Mnou navržené metody

## 5.1. Náhodný dithering

S minimální obměnou od principu popsaném u obrazového ditheringu lze použít metodu náhodného ditheringu. Na rozdíl od metod distribuce kvantizační chyby jsou jednotlivé prvky vyhodnocovány zcela oddeleně a jejich vzájemný vztah či poloha nejsou pro výpočet důležité. Tato metoda je založena na předpokladu, že použitý generátor (pseudo) náhodných čísel je dostatečně korektní<sup>1</sup> a má homogenní rozložení pravděpodobnosti<sup>2</sup>. Za tohoto předpokladu je možné místo přidání náhodného bílého šumu (popsaného výše) porovnávat náhodně generovaná čísla s váhami v jednotlivých bodech, a dosáhnout tak stejného efektu.

Koncept vah je odlišný od původního konceptu náhodného ditheringu, kde váha byla ekvivalentem odstínu daného pixelu. V těchto metodách probíhá výpočet váhy v jednotlivých elementech pomocí externího výpočtu. Zpravidla se jedná o vztah prvků k dané řídící geometrii s možností provázání s rastrovou mapou pro větší volnost kontroly<sup>3</sup>.

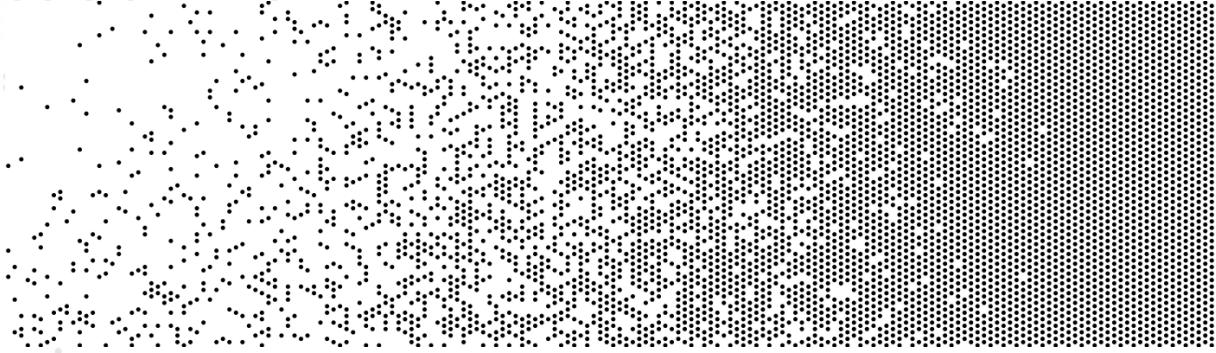
```
1 PVector[] randomDithering(PVector[] points, float[] weights){  
2     int count = points.length;  
3     PVector[] results = new PVector[count];  
4     for (int i = 0; i < count; i++){  
5         float rnd = random(1);  
6         if (rnd < weights[i]){  
7             results[i] = points[i];  
8         } else {  
9             results[i] = null;
```

---

<sup>1</sup>Jakékoli číslo ve zvoleném rozsahu má šanci být vybráno.

<sup>2</sup>Pravděpodobnost, že číslo je součástí libovolné podmnožiny je rovno poměru podmnožiny k celkové množině.

<sup>3</sup>Samozřejmě bitmapu lze aplikovat na 2,5D geometrii. Pro plně tří a vícerozměrné prostory by bylo třeba pracovat s odpovídajícím rastrovým ekvivalentem ve více dimenzích, například voxely.



Obrázek 5.1: Náhodný dithering

```
10     }
11 }
12 return results;
13 }
```

Listing 5.1: Algoritmus náhodného ditheringu v processingu

Stejně jako v případě již popsaného vzoru je výhodu této metody její jednoduchost a velmi nízká výpočetní náročnost, kterou lze navíc díky velmi snadné paralelizaci ještě zlepšit<sup>4</sup>. Jako hlavní nedostatek této metody je již zmíněná vlastnost, že každý prvek je zpracováván samostatně bez vztahu k okolí, a tudíž nemůže dojít k rozprostření kvantizační chyby do okolí (jako u většiny metod distribuce kvantizační chyby). To má ale za následek optickou nerovnoměrnost výsledného výběru, ve kterém lze poměrně často nalézt tzv. ostrovů a jezera<sup>5</sup> či rušivé linie. Těm vzhledem k oddělenému řešení každého elementu nelze zabránit.

## 5.2. Matějův vzdáleností řízený dithering

Protože právě předávání zaokrouhlovací chyby na sousední prvky je nutným předpokladem pro dosažení lepších výsledků s nižším výskytem ostrovů a jezer, je třeba nalézt takovou metodu, která vytvoří vztah mezi jednotlivými body, na jehož základě dojde k přerozdělení

<sup>4</sup>Množiny bodů je možné zpracovávat paralelně na více jádrech, protože se navzájem nijak neovlivňují.

<sup>5</sup>Přesnější by bylo označit daný jev jako klastrování, ale označení jako „jezera a ostrovů“ dobře vystihuje podstatu daného problému, viz obrázek 5.1.

kvantizační chyby. Ve zmíněných obrazových ditheringových metodách pracujících nad rastrovou grafikou je tento vztah dán čtvercovým rastrem jednotlivých pixelů, kde lze podle polohy pixelu v rastru jasně definovat vzdálenost k libovolnému jinému pixelu a tento vztah je stejný pro libovolný bod obrázku. Distribuční matice je tak vždy stejná. V požadované aplikaci tomu takto není, a tudíž je potřeba pro každý jednotlivý bod vypočítat distribuční poměry zvlášť. To bohužel vede k značnému zvýšení výpočetních nároků.

V prvním kroku je třeba z množiny všech prvků  $M$  nalézt takovou podmnožinu  $M_i$  obsahující  $n$  takových prvků, které jsou dostatečně blízko k právě zpracovávanému prvku  $P_i$  (pro zjednodušení budeme pracovat vždy s body reprezentujícími jednotlivé prvky). Jejich výčet je možné omezit maximální vzdáleností či maximálním počtem. Oba přístupy dosahují obdobných výsledků a jejich aplikace je tak zejména závislá na výpočetní náročnosti obou výpočtů (více níže).

Následně jednotlivým sousedním bodům přidělíme distribuční poměr  $R_{ij}$ , který je nepřímo úměrný vzdálenosti od bodu  $P_i$ , a zároveň poměry  $R_{ij}$  v absolutním součtu všech vybraných sousedních bodů dávají 1. Tímto způsobem bude celá kvantizační chyba rozdělena do okolí.

### Matematický vzorec

$$r_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$$

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=0}^n r_{ij}}$$

Vzniklá kvantizační chyba  $e_i$  při prahování v bodě  $P_i$  je potom pomocí těchto poměrů rozdělována do vah v okolních prvcích. Stejně jako v případě metod distribuce kvantizační chyby je žádoucí, abychom nemuseli polem všech bodů procházet vícekrát, a proto je třeba z přerozdělování kvantizační chyby vyřadit ty body, které byly již zpracovány dříve<sup>6</sup>. Nejsnazší způsob je tedy pracovat vždy pouze s body, které se v množině  $M$  nachází za bodem  $P_i$ . Základní verze algoritmu potom může vypadat následovně:

---

<sup>6</sup>A to ideálně již v kroku nastavování distribučních poměrů.

```

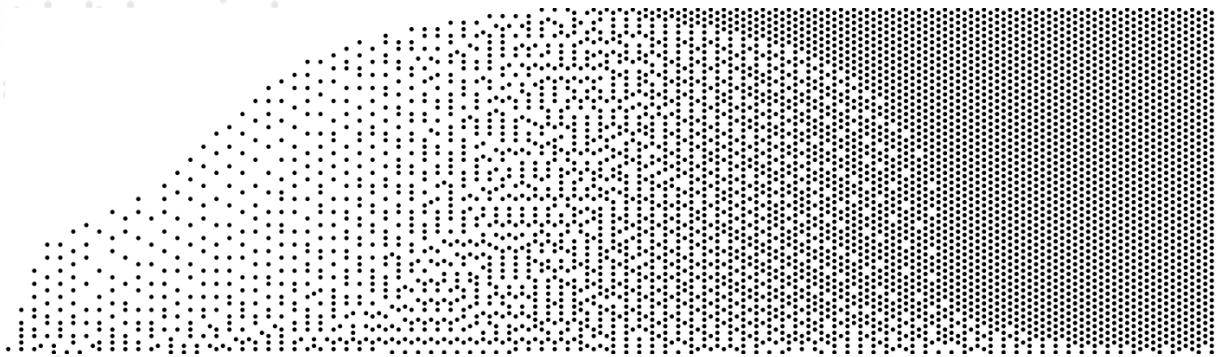
1 PVector[] dwDithering(PVector[] points, float[] weights, float distLimit){
2     int count = points.length;
3     PVector[] results = new PVector[count];
4     for (int i = 0; i < count; i++){
5         float error = 0;
6         if (weights[i] > 0.5){
7             results[i] = points[i];
8             error = - 1 + weights[i];
9         } else {
10             results[i] = null;
11             error = weights[i];
12         }
13         float distMass = 0;
14         float weightSum = 0;
15         ArrayList<Integer> neighbours = new ArrayList<Integer>();
16         for (int j = i+1; j < count; j++){
17             if (i != j){
18                 float distance = dist(points[i].x,points[i].y,points[j].x,points[j].y);
19                 if (distance <= distLimit){
20                     distMass += distance;
21                     weightSum += 1/distance;
22                     neighbours.add(j);
23                 }
24             }
25         }
26         for(int index : neighbours){
27             PVector p = points[index];
28             float distance = dist(points[i].x,points[i].y,p.x,p.y);
29             float weight = 1/distance;
30             float ratio = weight / weightSum;
31             float errorAddition = error * ratio;
32             weights[index] += errorAddition;
33         }
34     }
35     return results;
36 }
```

Listing 5.2: Algoritmus Matějova ditheringu v Processingu

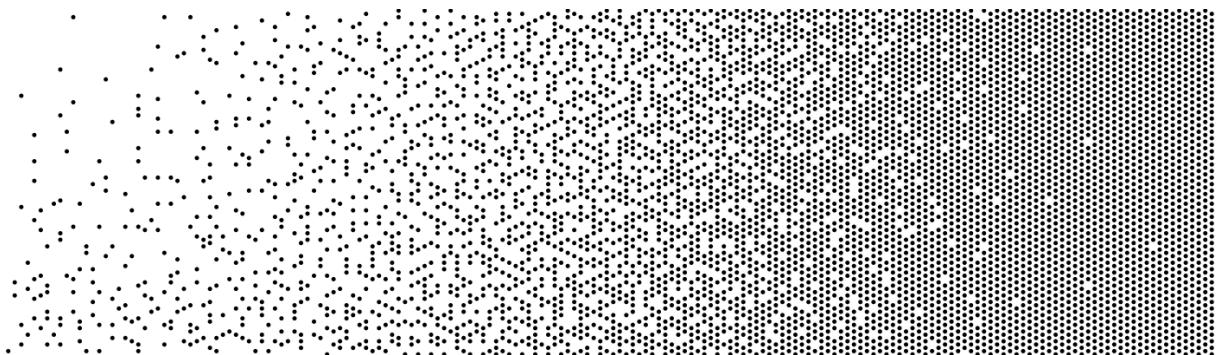
Jak z této metody vyplývá, zejména u bodů zpracovaných na konci nemusí být kam kvantizační chybu přerozdělit, protože všechny okolní body byly již zpracovány<sup>7</sup>. To vede k zahození této chyby a teoretické nepřesnosti. Vliv na celkový výsledek je ale

---

<sup>7</sup>Nebo se v okolí nenachází žádný nezpracovaný bod. Podle toho, zda při výběru nejbližších bodů pracujeme již pouze s ještě nezpracovanými body.



Obrázek 5.2: Matějův dithering, základní verze bez promíchání.



Obrázek 5.3: Matějův dithering s promícháním.

zanedbatelný a metody distribuce kvantizační chyby v obrazovém ditheringu rovněž pracují s tímto nedostatkem.

### 5.2.1. Pořadí prvků

Výsledný výběr prvků může mít sklon k vytváření pravidelných mřížek (viz Obrázek 5.2), čehož se lze snadno zbavit, nejsou-li prvky seřazeny do pole podle své polohy, ale jejich pořadí pro zpracování je předem promícháno (viz Obrázek 5.3).

Jak je zřejmé z obrázků, touto metodou lze dosáhnout mnohem „kvalitnějších“ výsledků s výrazně lepším rozložením bodů než v případě náhodného ditheringu. Výpočetní náročnost je ale mnohem vyšší<sup>8</sup> a tuto metodu nelze snadno paralelizovat. Značné zrychlení může

---

<sup>8</sup>Roste kvadraticky s počtem prvků.

přinést implementace quadtree třídění<sup>9</sup>, ale vzhledem k nutnosti dopočítávání distribučních poměrů v každém bodě a jejich formátu v podobě čísel s plovoucí desetinou čárkou je výpočet v každém případě řádově náročnější.

### 5.3. Vzdáleností řízený dithering s přidaným šumem

U navrhovaného Matějova vzdáleností řízeného ditheringu je oblast okolo 50% stále problematická. Kombinací této metody s náhodným ditheringem lze tento efekt částečně eliminovat. Stačí tedy před samotným ditheringem přidat náhodný šum do vah jednotlivých bodů. Stejně jako v případě náhodného ditheringu se ale s přidáním šumu začne ztrácet míra detailů v celé oblasti a začnou se opět projevovat artefakty příznačné pro náhodný dithering. Proto je třeba nastavit míru tohoto šumu velmi obezřetně.

## 5.4. Nastavení parametrů

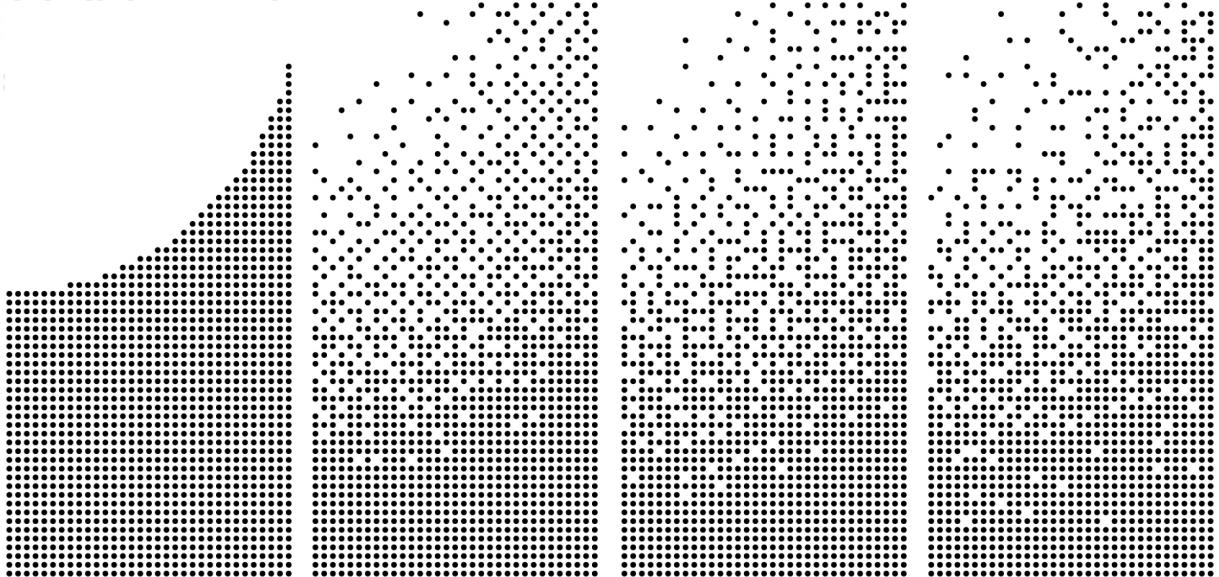
Metoda Matějova vzdáleností řízeného ditheringu (s přidaným šumem) obsahuje řadu proměnných jejichž nastavení výrazně ovlivňuje dosažený výsledek. Jejich pochopení a přizpůsobení konkrétní aplikaci je klíčové pro dosažení požadovaných výsledků.

### 5.4.1. Vzdálenost / počet sousedních bodů

Čím větší je oblast pro rozprostření kvantizační chyby, tím lepších výsledků lze dosáhnout. Zároveň s rostoucím počtem bodů značně narůstá výpočetní náročnost. Proto nedoporučuji zahrnout více jak druhou řadu nejbližších bodů.

---

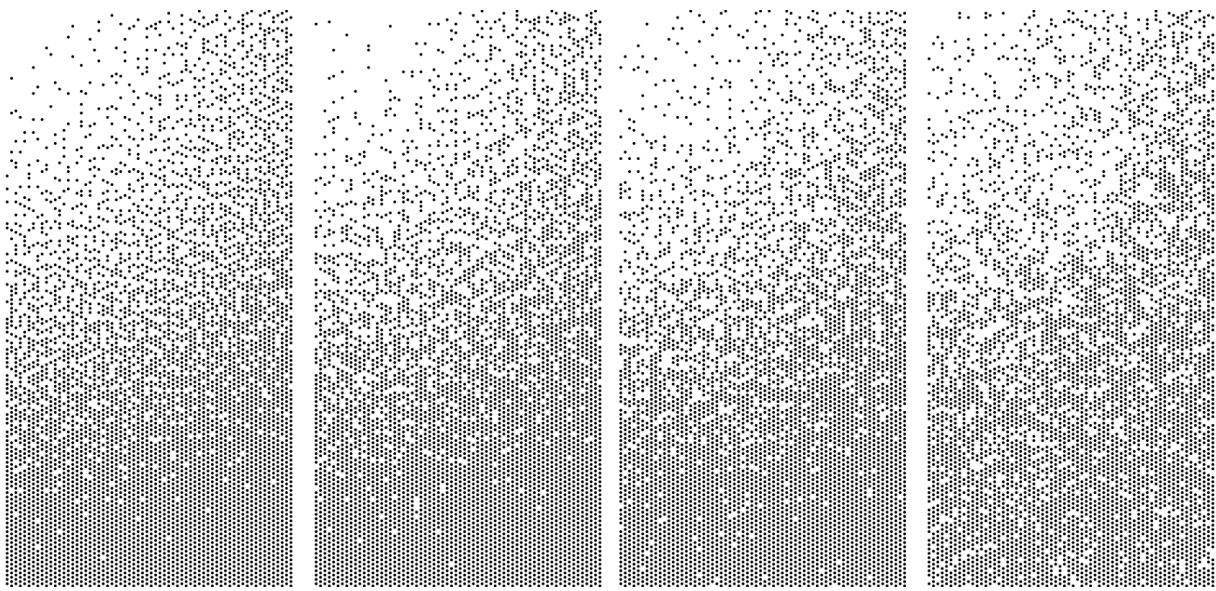
<sup>9</sup>Quadtree funguje nad 2D prostorem, 3D ekvivalent se nazývá octtree. A pro obecný vyšší počet dimenzí se používá označení k-d tree.



Obrázek 5.4: Vzdálenost nižší než rozteč rastru; Vzdálenost rovná rozteči rastru; Vzdálenost rovna úhlopříčce rastru; Vzdálenost výrazně vyšší než rozteč rastru

#### 5.4.2. Míra přidaného šumu

Přidání šumu do vah pomáhá odstranit nežádoucí artefakty Matějova vzdáleností řízeného ditheringu a zároveň zanáší ty, které vznikají při náhodném ditheringu, který je na přimíchání šumu založený. Jako ideální se jeví hodnoty okolo 10 - 20%. Vyšší hodnoty již výrazně ovlivňují veškeré pozitivní vlastnosti ditheringu a šum pod 10% nemá dostatečný vliv na odstranění artefaktů.



Obrázek 5.5: Přidaný šum: 0%; 25%; 50%; 100%

## 6. Ukázka aplikace

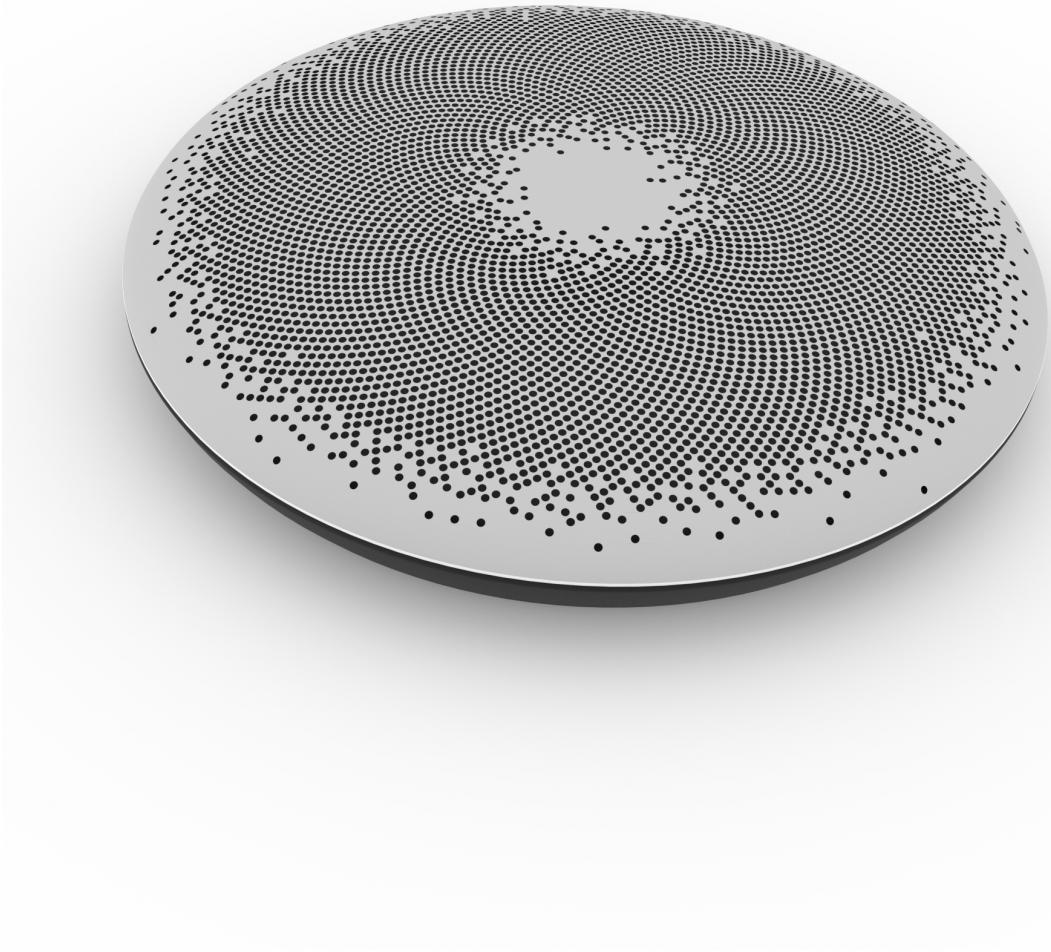
Jak bylo předesláno v předchozích kapitolách navržená metoda Matějova vzdáleností řízeného ditheringu má pro svoji univerzálnost široké spektrum použití.

Jednou z možných aplikací je jemné vytrácení perforace, kde otvory je možné dělat pouze limitně malé (obrázek 6.1). Díky své obecnosti a vytváření vazeb mezi sousedními prvky až uvnitř algoritmu lze dosáhnout požadovaného efektu i na takových tvarech a uspořádáních, které by standardní metody nebyly schopné zpracovat.

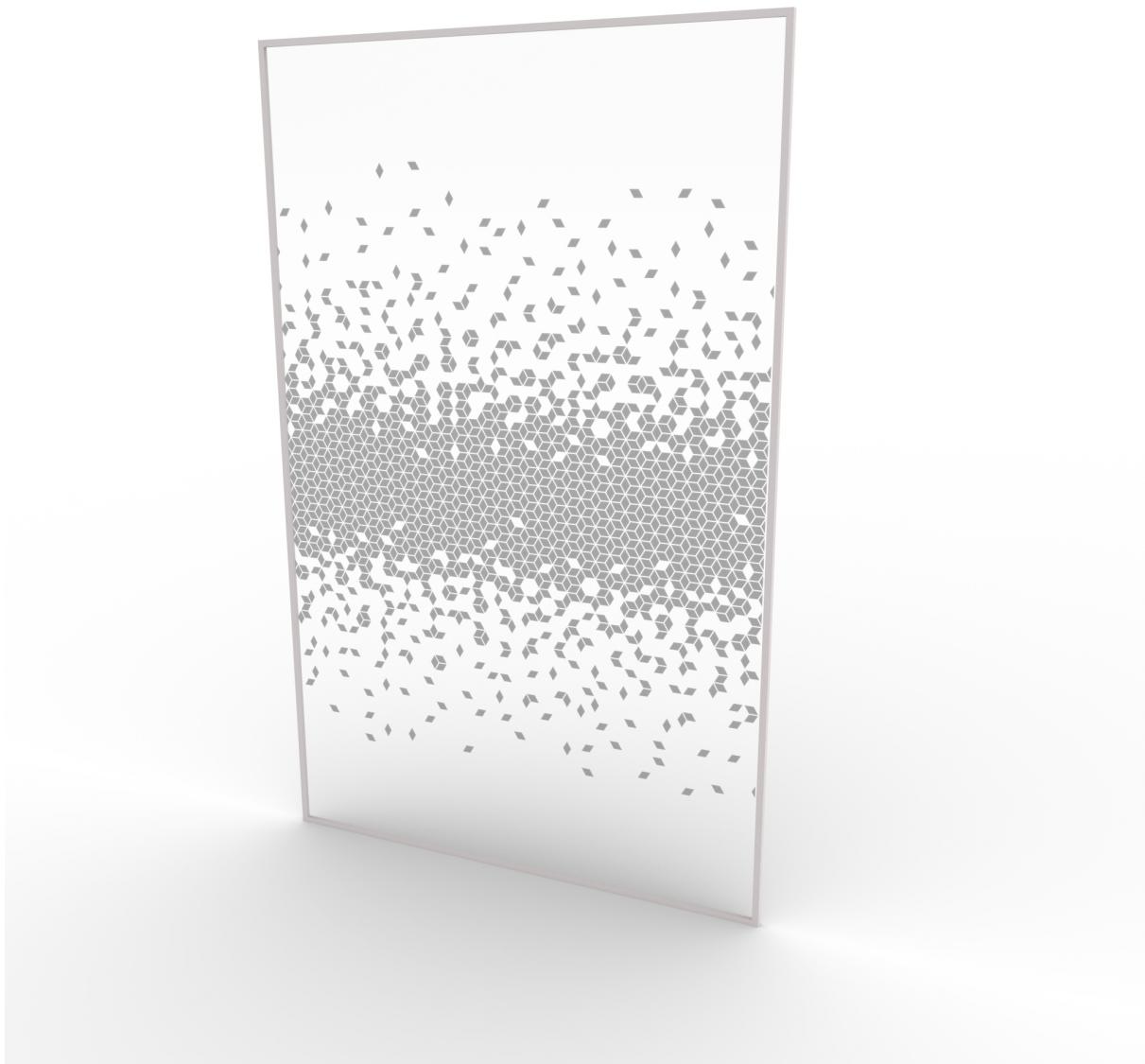
Na další ukázce je metoda použita na vytrácení geometrického vzoru na skleněné příčce (obrázek 6.2). Protože se středy prvků nenachází na čtvercové mřížce, není rovněž možné použít metod obrazového ditheringu.

Na obrázku 6.3 je ukázána univerzálnost užití metody nad prvky s proměnou velikostí, tvarem a počtem sousedních prvků. Jak je vidět i zde navržená metoda dosahuje velmi dobrých výsledků.

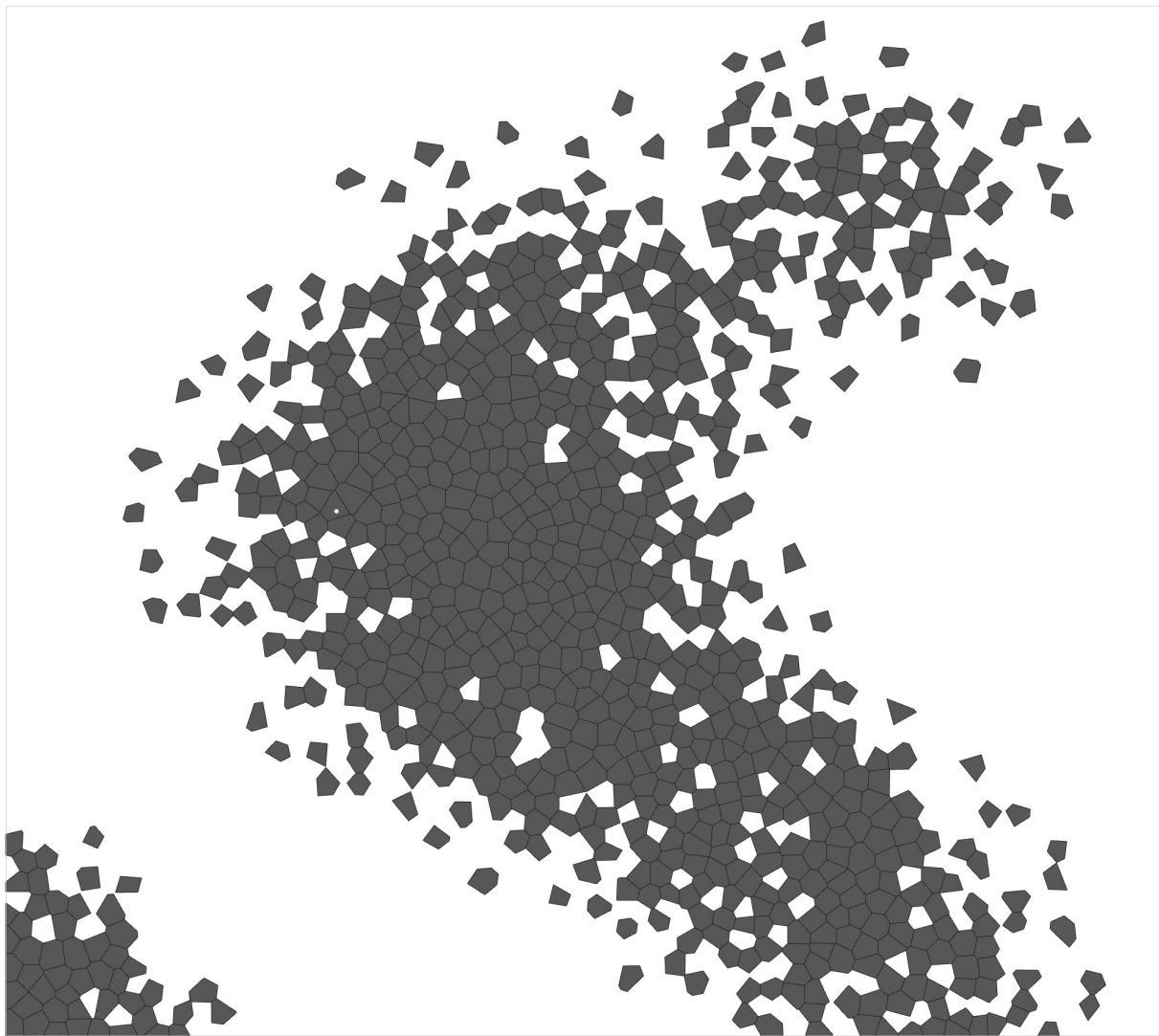
Poslední ukázka (Obrázek 6.4) je potom ukázka schopnosti algoritmu pracovat s více jak dvěma stavami a dosáhnout tak plynulého přecházení mezi třemi barvami elementů. A to takovým způsobem aby byl zachován dojem plynulého přechodu.



Obrázek 6.1: Ukázka použití Matějova ditheringu na perforaci nad reproduktorem.



Obrázek 6.2: Ukázka použití Matějova ditheringu na dekoraci na skleněné příčce.



Obrázek 6.3: Ukázka použití Matějova ditheringu na Voronoiových buňkách.



Obrázek 6.4: Ukázka použití Matějova ditheringu na jemném prolnutí 3 různých skleněných elementů.

## 7. Závěr

Navržená metoda Matějova vzdáleností řízeného ditheringu splňuje nastavené požadavky na vytrácení či přechod mezi diskrétním množinou stavů. Díky své obecnosti má skvělé předpoklady k univerzálnímu užití v mnoha oblastech. A při správném nastavení parametrů může tato metoda dosahovat výsledků, které již není nutné ručně opravovat.

Jako největší nevýhodu považuji velmi vysoké výpočetní nároky, které exponenciálně narůstají s počtem prvků. Jak bylo uvedeno, je v budoucnu možné výpočetní náročnost výrazně snížit použitím „předtřídění“ vstupních prvků. Ale je třeba říci, že tato metoda nebude nikdy dosahovat podobné rychlosti jako například náhodný dithering.

Pro zvažované užití v oblasti prostorového designu, ale není rychlosť výpočtu stěžejním parametrem a dosažené výpočetní časy v rádu milisekund či sekund, nejsou pro většinu užití překážkou.

# Literatura

- William C Farmer. *Ordnance Field Guide*. Military service publishing Company, 1944. URL <https://archive.org/details/OrdnanceFieldGuideV2>.
- Tanner Helland. Image dithering, 2016. URL <http://www.tannerhelland.com/4660/dithering-eleven-algorithms-source-code/>.
- Teruo Fumoto Hiroaki Kotera, Hideto Motomura. Color dithering back to the roberts' modulation. 1999. URL <http://www.imaging.org/site/PDFS/Papers/1999/RP-0-93/1758.pdf>.
- Bc. Lukáš Plec. *Metody ditheringu obrazu*. Vysoké Učení Technické v Brně, 2014. URL [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=86954](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86954).
- Ken Pohlmann. *Principles of Digital Audio*. McGraw-Hill/TAB Electronics, apr 2005. ISBN 978-0-07-144156-8. URL <https://www.xarg.org/ref/a/0071441565/>.
- Lawrence Gilman Roberts. Picture coding using pseudo-random noise. únor 1962. doi: 10.1109/TIT.1962.1057702. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/1057702/>.
- L. Steinberg R.W. Floyd. *An adaptive algorithm for spatial grey scale*. 1976.
- Pavel Štefaník. *Dithering obrazu*. Vysoké Učení Technické v Brně, 2012. URL <https://core.ac.uk/download/pdf/30281791.pdf>.