

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

## INOVACE UNIFORM MARKER FIELDS PRO VĚTŠÍ VOLNOST MĚŘÍTKA ZOBRAZENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR STUDENÝ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

# INOVACE UNIFORM MARKER FIELDS PRO VĚTŠÍ VOLNOST MĚŘÍTKA ZOBRAZENÍ

INNOVATION OF UNIFORM MARKER FIELDS FOR ALLOWING BETTER SCALE FREEDOM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR STUDENÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ADAM HEROUT, Ph.D.

BRNO 2013

## Abstrakt

Tato práce se zabývá inovací Uniformního Pole Markerů, které pokrývá rozsáhlou oblast a skládá se ze vzájemně překrývajících se dílčích markerů. Cílem je umožnit detekci z mnoha různých vzdáleností kamery od pole markerů a zvýšit tím svobodu pohybu kamery. Práce byla řešena experimentálně a bylo vytvořeno několik návrhů, které byly podrobeny testům detekčních vlastností. Je představen nový způsob, jak konstruovat pole markerů s dobrými detekčními vlastnostmi. Pro tento způsob konstrukce je navržen a implementován algoritmus pro syntézu pole markerů a jsou navrženy změny detekčního algoritmu Uniformních Polí Markerů, které je potřeba provést pro detekci nově navržených polí markerů.

## Abstract

This work introduces innovations to the Uniform Marker Fields which cover a large-scale planar area and are composed of mutually overlapping partial markers. The goal of this work is to enable marker field detection from various camera distances, thus increasing the camera movement freedom. Several marker field designs were experimentally created and their detection properties were tested. A new solution to marker field design is introduced. For this solution a synthesis algorithm of the marker field is described and implemented. Changes to an existing Uniform Marker Field detection algorithm are proposed, so that the detection algorithm can be used with the marker fields introduced in this work.

## Klíčová slova

Umělé naváděcí markery, Překrývající se markery, Rekurzivní markery, Více-měřítkové markery, Pole markerů, Rozšířená realita.

## Keywords

Fiduciary Markers, Overlapping Markers, Recursive Markers, Multiscale Markers, Marker Fields, Augmented reality.

## Citace

Petr Studený: Inovace Uniform Marker Fields pro větší volnost měřítka zobrazení, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

# Inovace Uniform Marker Fields pro větší volnost měřítka zobrazení

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Adama Herouta Ph.D. Další informace mi poskytl Ing. István Szentandrás. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Petr Studený  
15. května 2013

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Adamu Heroutovi za možnost vypracovat zajímavou bakalářskou práci, jeho odborné rady a vedení. Dále bych rád poděkoval Ing. Istvánovi Szentandrásimu za poskytnuté rady na konzultacích.

© Petr Studený, 2013.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Pole markerů</b>	<b>3</b>
2.1	Uniformní Pole Markerů . . . . .	3
2.1.1	Syntéza Uniformního pole markerů . . . . .	4
2.2	Fraktální Pole Markerů . . . . .	5
2.2.1	Konstrukce Fraktálních Polí Markerů . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Experimentální tvorba více-měřítkových polí markerů</b>	<b>7</b>
3.1	Vkládaná okna do dlaždic . . . . .	7
3.2	Vkládaná okna na hrany . . . . .	9
3.3	Pletivo . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Konstrukce Fraktálních Uniformních Polí Markerů</b>	<b>11</b>
4.1	Experimentálně zjištěné požadavky . . . . .	11
4.2	Vkládané značky . . . . .	11
4.3	Aplikace pro vytváření nových návrhů . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Testování vlastností jednotlivých návrhů</b>	<b>15</b>
5.1	Testování detektorem hran . . . . .	15
5.2	Testování detektorem Uniformních Polí Markerů . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Syntéza Fraktálních Uniformních polí markerů</b>	<b>17</b>
6.1	Implementační detaily algoritmu . . . . .	17
6.2	Extrakce oken a rozřazení do kategorií . . . . .	18
6.3	Genetický algoritmus pro syntézu unikátních oken . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Návrh algoritmu pro detekci Fraktálních uniformních polí markerů</b>	<b>22</b>
7.1	Algoritmus pro detekci Uniformních Polí Markerů . . . . .	22
7.1.1	Detekce hranových elementů . . . . .	22
7.1.2	Stanovení nulových bodů . . . . .	23
7.1.3	Nalezení mřížky šachovnice . . . . .	23
7.2	Úpravy algoritmu . . . . .	24
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>25</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Jedním z ikonických prvků vědeckofantastického žánru (sci-fi) za posledních několik desítek let je to, čemu se dnes odborně říká *rozšířená realita*. Mezi populární příklady by se daly zařadit například: navigační systémy v brýlích, hologramy promítané do prostoru nebo třeba futuristická hledí vojáků budoucnosti. Pokrokem v oblasti počítačové grafiky a multimédií jsme se přiblížili k praktické realizaci některých z těchto prvků. Dnes například dokážeme v reálném čase zakomponovat do záběru kamery počítačem vykreslené předměty, nebo při záběru na restauraci vyobrazit polední menu. Rozšířená realita je tedy zanesení syntetických (počítačem zpracovaných) prvků do obrazu reálného světa (například do záběru kamery v mobilním telefonu) [1].

Stěžejní záležitostí pro systémy rozšířené reality je lokalizace kamery. Lokalizaci kamery v těchto systémech lze rozdělit na dva různé přístupy: s použitím *naváděcích markerů* nebo bez nich. Přestože bezmarkerové systémy nabývají velké popularity, markery stále nabízejí výhody jako vysoká přesnost, jednoduchá detekce, nízká výpočetní náročnost a spolehlivost detekce [3].

Naváděcí markery jsou typicky dvoudimenzionální rovinné černobílé obrázky umístěné ve scéně. Pokud jsou celé, nebo alespoň většinou, zachycené kamerou, tak je možné přesně dopočítat polohu a vzdálenost kamery od markerů. Standardně naváděcí markery obsahují dvě komponenty: geometrické prvky pro detekci a lokalizaci markeru a prvky, které obsahují data pro identifikaci (například polohu) daného markeru. Toto umožňuje umístění několika markerů do scény a jejich následnou detekci. Každý snímek kamery musí obsahovat minimálně jeden marker a ten musí být dostatečně velký, aby s jeho pomocí bylo možné přesně spočítat polohu kamery. Jakmile je určena přesná poloha kamery, je k dispozici dostatek informací, nutných k rozšíření daného snímku o umělý předmět.

V této práci se využívají markery, které jsou rozmístěny v ploše takovým způsobem, že je dosaženo vysokého stupně překrytí a jejím cílem je vytvořit systém, založený na již používaném Uniformním Poli Markerů (popsané v kapitole 2), který by dovozoval detekci z více různých vzdáleností kamery. Toto vedlo k sérii experimentů, které jsou popsány v kapitole 3. Na základě testování (kapitola 5) experimentálních návrhů jsou v kapitole 2 shrnuty požadavky na vzhled a navržen jeden konkrétní způsob konstrukce takovýchto více-měřítkových polí. Pro tento způsob konstrukce je v kapitole 6 představen algoritmus pro syntézu konečného pole markerů. Kapitola 7 je věnována způsobu, jakým se taková pole dají detekovat.

## Kapitola 2

# Pole markerů

*Pole markerů* je rovinná struktura, jejíž výskyt může být detekován z kamerového obrazu a přesná poloha může být rozpoznána na základě podploch o definované minimální velikosti. Na každou takovou podplochu se dá dívat jako na samostatný marker. Avšak, markery nejsou disjunktní, ale ve velkém stupni se překrývají, aby umožňovaly identifikaci z krátkých i z velkých vzdáleností kamery.

V této kapitole jsou představeny dva projekty polí markerů pro systémy rozšířené reality: Uniformní Pole Markerů [10] a Fraktální Pole Markerů [5]. Uvedené pole markerů jsou teoretickým základem pro tuto práci. Práce je zaměřena na možnosti zanesení do Uniformního Pole Markerů, které již samo o sobě nabízí velkou svobodu pohybu kamery, vlastnost větší volnosti měřítka zobrazení podobně jako je tomu u Fraktálních Polí Markerů. Cílem je tedy vytvořit pole markerů, které bude detekovatelné z různých vzdáleností kamery a současně bude využívat výhod, nabízených Uniformním Polem Markerů.

### 2.1 Uniformní Pole Markerů

*Uniformní pole markerů* (Uniform Marker Fields, UMF) je takové pole markerů, které nerozlišuje mezi prvky pro detekci a lokalizaci a prvky, sloužící pro identifikaci. Oba tyto prvky jsou rovnoměrně rozprostřené po celé ploše pole markerů. Uniformní pole markerů zvyšuje svobodu pohybu kamery, zvláště když jsou ve scéně přítomny rušivé objekty. Detekční algoritmus je efektivní a detekce polí markerů je snadno možná i na mobilních zařízeních s malým výkonem.

Uniformní pole markerů představené v [10] je neperiodické pole  $n^2$ , složené z matic  $A = (a_{ij} \in \{0, 1\})$ , kde se každé čtvercové pod-okno  $A_{rc}$  o rozměru  $n \times n$  vyskytuje pouze jednou, včetně všech čtyřech možných otočení. Pokud se jakékoli okno vyskytuje na poli více než jednou, jedná se o *konflikt*. Konflikty se vyskytují ve dvou případech. V prvním případě vzniká konflikt mezi dvěma okny, které jsou (po možném otočení) identické. Druhá možnost konfliktu vzniká v případě, že některé okno je po otočení stále stejné, takové okno se nazývá samo-konfliktní.

Rozšířením černobílého Uniformního pole markerů bylo představeno v [5]. Černobílé moduly šachovnice byly nahrazeny moduly ve více stupních šedi. Vytvořené  $k$ -nární 2D pole markerů ( $a_{ij} \in \{0, \dots, k-1\}$ ) vyvábí více přechodů mezi moduly. Ovšem v porovnání s binární variantou Uniformního pole markerů nelze jednoznačně rozpoznat hodnotu modulů, kvůli různým podmínkám nasvětlení a parametrům kamery. Z tohoto důvodu se používání přechodů mezi moduly šachovnice pro lokalizaci v rámci pole markerů. Horizontální

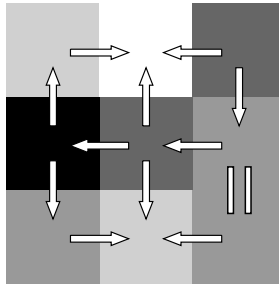
a vertikální přechody mezi moduly jsou definovány jako :

$$e_{ij}^{\rightarrow} = a_{i,j+1} - a_{ij}$$

$$e_{ij}^{\downarrow} = a_{i+1,j} - a_{ij}$$

Rozpoznání absolutní hodnoty přechodu mezi moduly je také náročné a proto je pro rozpoznání použit jenom základní charakter hrany:  $e_{ij}^* \in \{-1, 0, +1\}$  Okno  $n^2$  použité pro lokalizaci v rámci pole markerů je tedy:

$$E_{rc} = (e_{rc}^{\rightarrow}, \dots, e_{r+n-1,c+n-2}^{\rightarrow}, e_{rc}^{\downarrow}, \dots, e_{r+n-2,c+n-1}^{\downarrow})$$



Obrázek 2.1:  $3^2$  okno v pěti stupních šedi. Šipky značí charakter přechodu hrany

### 2.1.1 Syntéza Uniformního pole markerů

Uniformní pole markerů jsou generována pomocí genetického algoritmu, který pracuje s mapami obsahující konflikty a zlepšuje jejich vlastnosti pomocí mutací, které vedou ke snížení počtu konfliktů. Genetický algoritmus pro syntézu polí markerů s černobílými moduly může být obecně definován těmito pojmy:

- Pro prvotní nastavení jsou použity zkopírované pole nebo náhodně vygenerované pole.
- Funkce vhodnosti je založená na počtu konfliktů ve vygenerovaném poli  $f(A) \frac{1}{c(A)+1}$ .
- Hranice vhodnosti, kde je algoritmus zastaven, je nastavena na 1 (algoritmus hledá bezkonfliktní mapy).
- Mutace je definována jako zaměnění obsahu okna náhodným obsahem. Okna jsou vybíraná náhodně. Konfliktní okna mají vyšší pravděpodobnost výběru pro nahrazení obsahu.

Za účelem zlepšení konvergence algoritmu je ve výše zmíněném obecném algoritmu zavedených několik změn. V kroku mutace jsou z náhodného výběru vyřazena okna, která by mohla způsobit více konfliktů. Další úpravy algoritmu jsou provedeny za účelem dalšího zlepšení konvergence algoritmu v klient-server aplikaci.

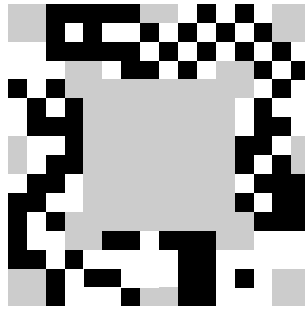
Ve variantě Uniformního pole markerů s moduly ve více stupních šedi je algoritmus pro syntézu podobný, pouze je navíc do funkce vhodnosti zanesena kvalita přechodů mezi moduly – hrany s vyšší absolutní hodnotou  $|e_{ij}|$  jsou preferovány.



## 2.2 Fraktální Pole Markerů

*Fraktální pole markerů* (Fractal Marker Fields, FMF) je struktura markerů podobných maticovým kódům jako jsou QR Code nebo DataMatrix. Fraktální pole markerů umožňuje vkládání markerů v prakticky nekonečném počtu měřítek. Zároveň pro každé z těchto měřítek garantuje konstantní hustotu markerů v daném měřítku po celé ploše pole markerů. Koncept fraktálních polí markerů nabízí bezprecedentní svobodu pohybu kamery v systémech rozšířené reality založených na planárních markerech.

Fraktální pole markerů se skládá z jednotlivých markerů o různých měřítkách a pozicích. Každý jednotlivý marker, jež se dá ohraničit čtvercem o rozměru  $16 \times 16$  modulů, se skládá z černých a bílých modulů. Velká část markeru je průhledná (šedé moduly v obrázku 2.2) a umožňuje vkládání markeru v menším měřítku.



Obrázek 2.2: Samotný marker o velikosti  $16 \times 16$ , skládající se z černých a bílých modulů, šedé moduly nejsou součástí markeru a jsou průhledné.

Každý jednotlivý marker obsahuje informace pro svoji identifikaci v 64 bitech:

- unikátní identifikátor pole markerů (16 bitů)
- úroveň  $n$  markeru v poli (8 bitů)
- pozice  $u, v$  v rámci úrovně (16+16 bitů)

Těchto 64 bitů je rozšířeno Reed-Solomonovým kódem pro detekci a opravu chyb na 112 bitů, které jsou obsaženy v černobílých modulech markeru. Ostatní moduly slouží pro určení orientace při lokalizaci, či jako metadata o způsobu uložení dat pro identifikaci.

### 2.2.1 Konstrukce Fraktálních Polí Markerů

Každá jednotlivá instance markeru (obrázek 2.2) je značena jako  $M_n(u, v)$ , kde  $n \in \mathbb{N}_0$  značí úroveň, do které marker náleží a  $u, v$  indexy instance v dané úrovni. Parametry markeru  $n, u, v$  jsou zavedeny pouze pro ujasnění konstrukčních pravidel Fraktálních Polí Markerů. Samostatné markery jsou vkládány do pole podle následujících konstrukčních pravidel:

1. Středové markery  $M_n(0, 0)$  úrovně  $n$  v sobě obsahují marker  $M_{n+1}(0, 0)$ . Tyto dva markery jsou soustředné – jejich středy leží ve stejném bodě:

$$\mathbf{L}(M_{n+1}(0, 0)) = \mathbf{L}(M_n(0, 0)).$$

Velikost  $M_{n+1}$  (délka strany ohraničujícího čtverce) je  $\frac{1}{2} M_n$ :

$$\mathbf{S}(M_{n+1}) = \frac{1}{2} \mathbf{S}(M_n).$$

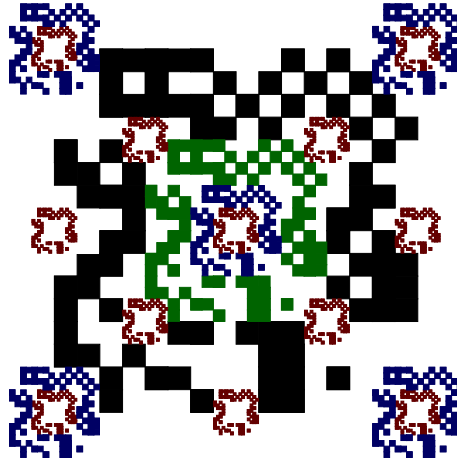
2. V každé úrovni  $n$  se markery  $M_n(u, v)$  pravidelně vyskytují v poli a jejich pozice je definována jako

$$\mathbf{L}(M_n(u, v)) = \mathbf{L}(M_n(0, 0)) + (2su, 2sv),$$

$$u + v = 2i, \text{ kde } i \in \mathbb{Z}$$

kde  $s = S(M_n)$  je velikost markeru v obrazových bodech.

3. Středový marker  $M_0(0, 0)$  je vložen do středu obrazu Fraktálního Pole Markerů a jeho velikost  $S(M_0(0, 0))$  je  $\frac{4}{5}$  délky strany obrazu. Toto dovoluje, aby byly L2 markery ( $M_2(1, 1)$ ,  $M_2(-1, 1)$ ,  $M_2(1, -1)$ ,  $M_2(-1, -1)$ ) zcela viditelné v rozích středového markeru  $M_0(0, 0)$



Obrázek 2.3: Ukázka Fraktálního pole markerů o čtyřech úrovních (L0 až L3). Černá: L0, Zelená: L1, Modrá: L2, Červená: L3

## Kapitola 3

# Experimentální tvorba více-měřítkových polí markerů

Uniformního pole markerů (aperiodické 4-orientované pole oken  $n^2$ ) je omezeno tím, že na vstupním obraze pro detektor musí být dobře viditelné okno  $n^2$ . Myšlenkou rozšíření Uniformního pole markerů je pokrýt standardní UMF menšími šachovnicemi, které by umožňovaly detekci i z menších vzdáleností. Toto vedlo k sérii experimentů se zanořováním zmenšených oken či celých šachovnic na různá místa v Uniformním poli markerů. V této kapitole jsou představeny návrhy, které jsou z důvodů nedostatků vyřazeny pro další zpracování. Návrhy, které jsou uznané za použitelné, jsou představeny v kapitole 4. Tyto neúspěšné experimenty jsou rozděleny do třech hlavních kategorií:

- Vkládaná okna do dlaždic
- Vkládaná okna na hrany
- Pletivo

### 3.1 Vkládaná okna do dlaždic

Základem tohoto návrhu je 4-orientované pole oken  $4^2$  o rozměru  $n \times m$  dlaždic, tvořící první (nejvyšší) úroveň. Každá dlaždice  $T_1(x, y)$ ;  $x, y \in \mathbb{N}_0$  má rozměry  $w \times h$ . Konstrukční pravidla pro vkládání druhé úrovně:

1. Pro každou dlaždici  $T_1(x, y)$  první úrovně je vytvořeno  $4^2$  okno  $W_2(u, v)$ , kde  $u, v$  definuje souřadnici středu okna.

$$u = xw + \frac{w}{2}, v = yh + \frac{h}{2}, \text{ kde } x, y \in \mathbb{N}_0; x < n; y < m$$

2. Velikost okna  $W_{i+1}$  (délka strany ohraničujícího čtverce) je  $\frac{1}{2}$  nadřazené dlaždice  $T_i$ .

$$S(W_{i+1}) = \frac{1}{2}S(T_i)$$

$$S(T_i) = \frac{1}{4}S(W_i)$$

3. Každé okno druhé úrovně je po vložení otočeno kolem svého středu o úhel  $\alpha$ .

Konstrukční pravidla pro vkládání  $j$ -té úrovně,  $j > 2$ :

1. Pro každou dlaždici  $T_i(x, y)$  každého okna  $W_i(u_i, v_i)$  je vytvořeno  $4^2$  okno  $W_{i+1}(u_{i+1}, v_{i+1})$ ,

$$u_{i+1} = u_i + \left( (x-2)S(T_i) + \frac{1}{2}S(T_i) \right) \sin((i-1)\alpha)$$

$$v_{i+1} = v_i + \left( (y-2)S(T_i) + \frac{1}{2}S(T_i) \right) \cos((i-1)\alpha)$$

$$x, y \in \langle 0; 3 \rangle$$

2. Pro zvýšení hustoty oken nižších úrovní jsou vkládána okna  $W_{i+1}$ , ležící mimo okno  $W_i$ ,  $i \geq 2$ , obdobně jako u pravidla 1., ale  $x, y \in \mathbb{Z} \setminus \langle 0; 3 \rangle$ . Vložené okno  $W_{i+1}$  musí celou svojí plochou ležet uvnitř  $T_{i-1}$ . Žádná okna ležící vně  $T_{i-1}$  či na hraně  $T_{i-1}$  nejsou vkládána.

3. Všechna okna  $W_i$ , kde  $i > 2$ , jsou otočena kolem svého středu o úhel  $(i-1)\alpha$

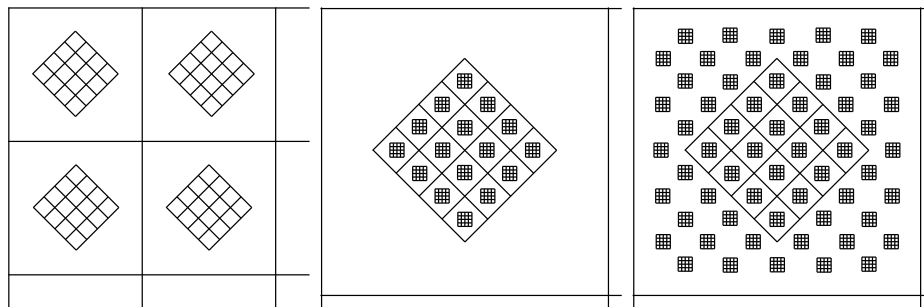
V tomto návrhu je zajištěno, aby okna nižších úrovní nezasahovaly do hran vyšších úrovní. Díky tomu jsou hrany čistší a je jednodušší při detekci stanovit orientaci hrany. Nabízená možnost otočení umožňuje odlišit dvě dominantní hrany mezi jednotlivými úrovněmi, ovšem při detekci velké množství hran nižších úrovní zastíňuje hrany vyšší úrovně. Velkým problémem je poměr velikostí mezi úrovněmi, okna pod-úrovní jsou plochou běžně i  $64 \times$  menší. Při určitých vzdálenostech kamery od pole markerů to může znamenat nečitelnost jakékoli úrovně.

Výhody:

- Otočení mezi úrovněmi
- Okna nižších úrovní nenarušují hrany oken vyšší úrovně

Nevýhody:

- Poměr velikosti mezi úrovněmi



Obrázek 3.1: Vkládaná okna do dlaždic: (vlevo) Vkládání oken 2. úrovně; (uprostřed) Vkládání oken 3. úrovně do dlaždic 2. úrovně; (vpravo) Vkládání oken 3. úrovně mimo dlaždice 2. úrovně.

## 3.2 Vkládaná okna na hrany

Tento experiment zakládá na podpoře hran vyšších úrovní vkládáním menších oken přímo na hrany. V tomto návrhu je potlačena možnost otočení mezi úrovněmi, díky tomu vznikají v poli markerů pouze dvě dominantní orientace hran. Tento fakt se po řadě testů ukázal jako velice výhodný při detekci viz. kapitola 4. Konstrukční pravidla pro tento návrh:

1. Pro každý průnik hran (o souřadnicích  $u, v$ )  $i$ -té úrovně je vloženo okno  $W_{i+1}(u, v)$ , kde  $u, v$  definuje souřadnice středu okna.
2. Velikost okna  $W_{i+1}$  (délka strany ohraničujícího čtverce) je  $\frac{2}{3}$  dlaždice  $T_i$  nadřazeného okna.

$$S(W_{i+1}) = \frac{2}{3}S(T_i)$$

$$S(T_i) = \frac{1}{4}S(W_i)$$

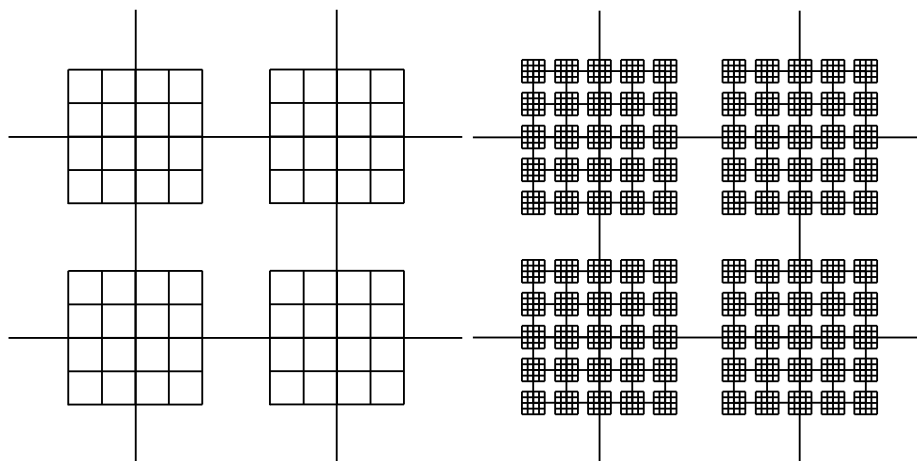
U tohoto návrhu je zachován stejný problém jako u 3.1. Poměr velikostí mezi úrovněmi je stále příliš velký, okna pod-úrovní jsou plochou  $36\times$  menší, a může způsobovat problémy při detekci. Po sestrojení mapy, obsahující tři a více úrovní, jsou pouhým okem těžce rozpoznatelná okna vyšších úrovní.

Výhody:

- Okna nižších úrovní podporují hrany v oknech vyšších úrovní

Nevýhody:

- Poměr velikosti mezi úrovněmi
- Hrany okna vyšších úrovní jsou prakticky nedetekovatelné



Obrázek 3.2: Vkládaná okna na hran: (vlevo) Vkládání oken 2. úrovně na hrany 1. úrovně;(vpravo) Vkládání oken 3. úrovně na hrany 2. úrovně.

### 3.3 Pletivo

Uniformní pole markerů obsahuje veškerou informaci na přechodech mezi čtvercovými moduly šachovnice. Velká část plochy každého čtverce může být považována za neúčinnou. Motivací tohoto experimentu je vypustit tuto nadbytečnou část čtverců a nahradit ji další šachovnicí v menším měřítku. Každá takto vnořená šachovnice bude mít opět vypuštěnou nadbytečnou plochu ve svých modulech a je vložena takovým způsobem, aby byly dobře viditelné minimálně  $4^2$  okna.

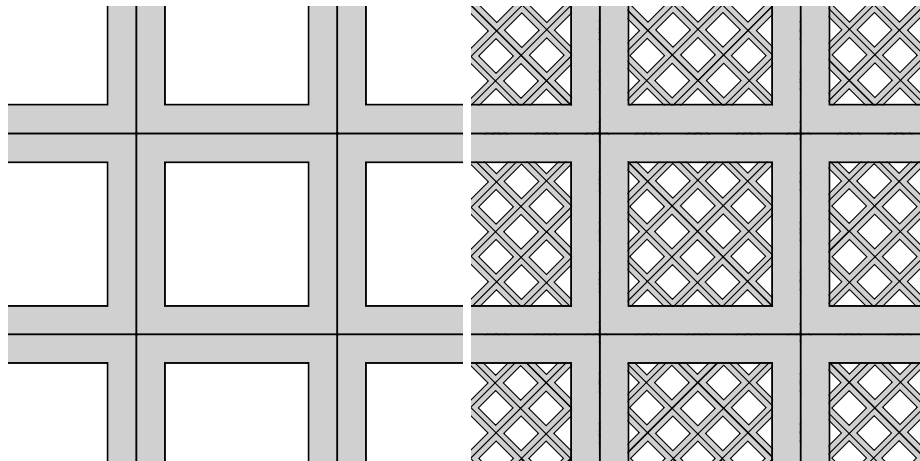
Tento návrh umožňuje otočení mezi jednotlivými úrovněmi, které může v různých fázích detekce přinášet výhody i nevýhody. Návrh byl vyřazen z dalšího zpracování po testech na detektoru. Přechody mezi jednotlivými moduly nejsou dostatečně výrazné a poměr velikostí oken mezi různými měřítky je příliš velký.

Výhody:

- Otočení mezi úrovněmi
- Nenarušuje hranu vyšší úrovně

Nevýhody:

- Poměr velikosti mezi úrovněmi
- Efektivita



Obrázek 3.3: Pletivo

## Kapitola 4

# Konstrukce Fraktálních Uniformních Polí Markerů

Experimenty s různými způsoby vytváření více-měřítkových polí markerů v předchozí kapitole vedly ke zjištění parametrů, které by takové pole vyžadovalo. V této kapitole je popsán způsob, jakým se dají pole, splňující tyto parametry, zkonstruovat. Je zaveden název *Fraktální Uniformní Pole Markerů*. Je to pole markerů, které nerozlišuje mezi geometrickými prvky pro detekci a prvky pro identifikaci markeru, nejmenším prvkem, který musí být pro lokalizaci rozpoznán je  $n \times n$  okno, v poli jsou vkládána okna ve více měřítkách a zároveň je zajištěna dostatečná hustota oken pro každé měřítko v celém poli.

### 4.1 Experimentálně zjištěné požadavky

Některé návrhy v kapitole 3 nabízely otočení mezi jednotlivými úrovněmi, které umožňuje jednoznačně odlišit dvojice dominantních směrů hran v jednotlivých úrovních, ale zároveň způsobuje problém při detekci. Problém je způsoben v případě, že na snímku, ve kterém je dobře viditelné okno (okna) vyšší úrovně, se nachází obrovské množství hran nižší úrovně, které zastíní hrany vyšších úrovní. Otočení mezi jednotlivými úrovněmi se tedy nabízí, ale není v konečné podobě pole markerů použito pro svoje nevýhody.

Skutečně největším problémem, který se vyskytoval u předchozích návrhů, byl poměr velikostí modulů mezi úrovněmi. Nejlepších vlastností dosahují návrhy, u kterých byly na každém snímku kamery dobře viditelné (a detekovatelné) minimálně 3 úrovně. Z toho vyplývá, že výsledné pole markerů by mělo mít co nejmenší rozdíly mezi velikostí oken, náležících do dvou, za sebou následujících úrovní. Pokusy bylo zjištěno, že hrany modulů oken vyšší úrovně by měly být maximálně 4krát delší. Při větších poměrech ubývá počet současně detekovatelných úrovní.

### 4.2 Vkládané značky

Koncept vkládaných značek spočívá ve vkládání složitějších útvarů, než je jen okno o rozměrech  $n \times n$ . Tento útvar, nazvaný *značka* je tvořen mřížkou modulů (šachovnicí) o rozměrech  $j \times k$ , nejčastěji  $j = k$ , kde nejsou všechny moduly platné. Neplatné moduly jsou transparentní a nemají žádnou další funkci. Všechny platné moduly jsou určeny k pokrytí okny o rozměru  $n \times n$ ,  $n \in \{3, 4, 5, \dots\}$ . Vytvoření takové značky dovoluje vložit menší značku (stejněho vzhledu) právě do transparentních míst značky. Při správném rozvržení

platných a neplatných modulů je možné vytvořit pole markerů o několika úrovních tak, aby žádné značky spolu nekolidovaly – nedocházelo k překrývání značek o různých úrovních.

Konstrukce těchto polí vychází z konstrukčních pravidel Fraktálních Polí Markerů (kapitola 2.2.1). Každá jednotlivá instance značky je značena jako  $Z_n(u, v)$ , kde  $n \in \mathbb{N}_0$  značí úroveň, do které značka náleží a  $u, v$  indexy instance v dané úrovni. Parametry značky  $n, u, v$  jsou zavedeny pouze pro ujasnění konstrukčních pravidel. Značky jsou vkládané do pole podle následujících konstrukčních pravidel:

1. Středové značky  $Z_n(0, 0)$  úrovně  $n$  v sobě obsahují značku  $Z_{n+1}(0, 0)$ :

$$\mathbf{L}(Z_{n+1}(0, 0)) = \mathbf{L}(Z_n(0, 0)).$$

Zde se nabízí více možností, na jaké přesné místo bude značka  $Z_{n+1}(0, 0)$  vložena:

- $\mathbf{L}(Z_n(u, v))$  značí polohu levého horního rohu značky – levé horní rohy středových značek leží ve stejném bodě. Značka svým rozvržením platných a neplatných modulů připomíná tvar zrcadlově otočeného písmene **L**.
- $\mathbf{L}(Z_n(u, v))$  značí polohu středu značky – středové značky jsou soustředné, jejich středy leží ve stejném bodě. Značka svým rozvržením platných a neplatných modulů připomíná tvar **O**.

Velikost  $Z_{n+1}$  (délka strany ohraničujícího čtverce) je  $v$ -násobkem velikosti  $Z_n$ ,  $v < 1$ :

$$\mathbf{S}(Z_{n+1}) = v\mathbf{S}(Z_n).$$

2. V každé úrovni  $n$  se značky  $Z_n(u, v)$  pravidelně vyskytují v poli a jejich pozice je definována jako

$$\mathbf{L}(Z_n(u, v)) = \mathbf{L}(Z_n(0, 0)) + (psu, psv),$$

$$u + v = 2i, \text{ kde } i \in \mathbb{Z}$$

kde  $s = S(Z_n)$  je velikost značky v obrazových bodech a  $p > 1$  značí periodicitu – vzdálenost, po které se značky v úrovni opakují.

Parametry  $p, v$  jsou voleny podle konkrétního návrhu v závislosti na velikosti značky  $j, k$  a rozvržení využitých a nevyužitých modulu. V obrázcích 4.1 a 4.2 jsou ukázky zkonstruovaných polí o čtyřech úrovních (L0 až L3) s parametry  $p = 2$  a  $v = \frac{1}{2}$ . Pro pole s těmito parametry byl navržen a implementován algoritmus pro syntézu (kapitola 6).

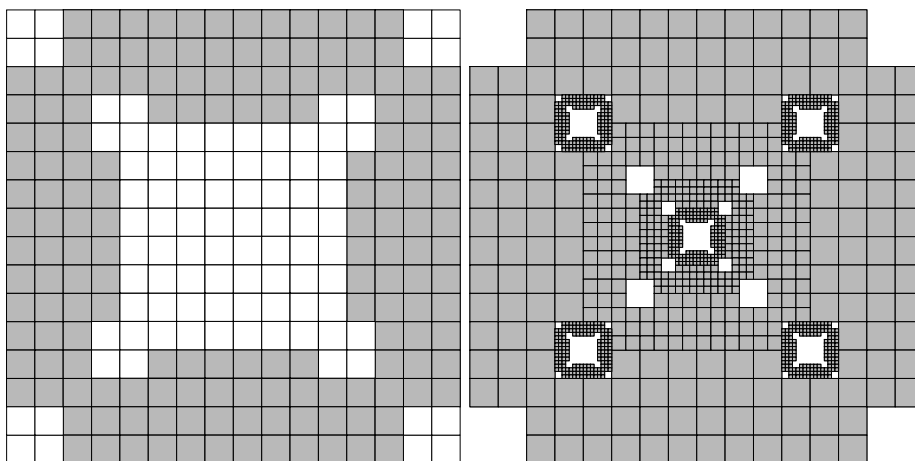
Výhody:

- Poměr velikosti mezi úrovněmi
- Variabilita

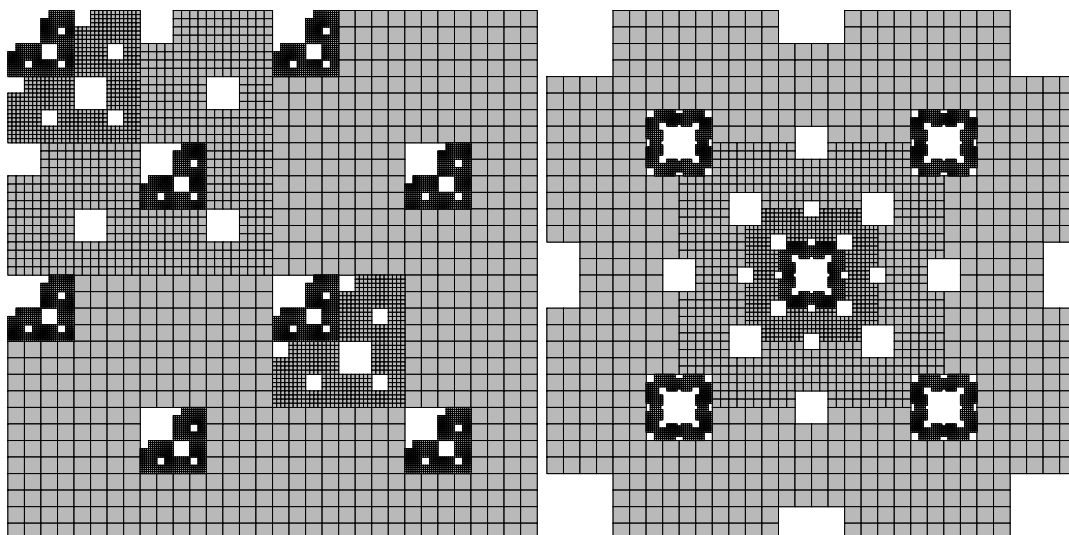
Nevýhody:

- Nenabízí možnost otočení (zanedbatelná nevýhoda)





Obrázek 4.1: Konstrukce pole ze značek o velikosti  $16 \times 16$ , pokrytelných okny  $n \times n$ ,  $n \in \{3\}$ : (vlevo) rozvržení platných (šedé) a neplatných (bílé) modulů ve značce; (vpravo) zkonstruované pole o čtyřech úrovních.



Obrázek 4.2: Ukázka zkonstruovaných polí o čtyřech úrovních s větším rozměrem značky ( $32 \times 32$ ): (vlevo)  $\mathbf{L}(Z_n(u, v))$  značí polohu levého horního rohu značky, značky pokrytelné okny  $n \times n$ ,  $n \in \{3, 4\}$ ; (vlevo)  $\mathbf{L}(Z_n(u, v))$  značí polohu středu značky, značky pokrytelné okny  $n \times n$ ,  $n \in \{3, 4, 5\}$ .

### 4.3 Aplikace pro vytváření nových návrhů

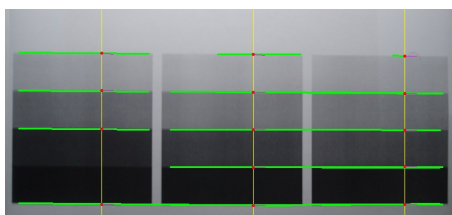
Protože tento způsob vytváření více měřítek v Uniformním Poli Markerů nabízí velkou variabilitu konečného vzhledu pole markerů, byla pro tento účel vytvořena aplikace s jednoduchým grafickým uživatelským rozhraním. Aplikace slouží pouze pro zobrazení pole markerů, nesyntetizuje pole s unikátními kombinacemi oken. Aplikace pro syntézu byla z důvodu možné výpočetní náročnosti oddělena (viz. kapitola 6). Jednotlivé návrhy jsou značeny těmito parametry: způsob vkládání počáteční značky, rozměry  $L_0$  značky ( $m \times n$ ), poměr velikostí mezi jednotlivými úrovněmi, periodičita a rozvržení využitých a nevyužitých modulů. Výstupy aplikace: náhodně obarvený (pěti úrovněmi šedé) návrh pole mar-

kerů, návrh pole markerů s barevně odlišnými úrovněmi, fraktální uniformní pole markerů s unikátními  $4 \times 4$  okny (získané z aplikace pro syntézu fraktálních uniformních polí markerů), konfigurační soubor pro aplikaci pro syntézu. Aplikace je implementována v jazyce C++ s využitím knihovny Qt pro vytvoření grafického uživatelského rozhraní a export do formátů PDF a SVG [2].

Každý vytvořený návrh byl vytištěn a podroben několika testům (kapitola 5). V této fázi byl zjištěn *problém tmavých barev*. Barvy modulů se již od pouhého pohledu jeví o dost tmavší než tomu je v aplikaci. Mezi některými tmavými moduly po takovém ztmavení tiskárnou nejsou přechody vidět skoro ani pouhým okem. Ztmavení vytištěných barev je způsobeno mnoha faktory: použitý papír a jeho savost, kvalita tiskové barvy, tisková technologie a další [9]. Z těchto důvodů jsou v aplikaci dvě možné konfigurace šedých odstínů: světlá konfigurace a tmavá konfigurace (popis je v tabulce 4.1). V tabulce je navíc zanesena konfigurace rovnoměrná, která v aplikaci není z důvodu nepoužitelnosti.

	Rovnoměrná konfigurace	Tmavá konfigurace	Světlá konfigurace
bílá	$255_{10}(FF_{16})$	$255_{10}(FF_{16})$	$255_{10}(FF_{16})$
světle šedá	$192_{10}(C0_{16})$	$200_{10}(C8_{16})$	$205_{10}(CD_{16})$
šedá	$128_{10}(80_{16})$	$145_{10}(91_{16})$	$155_{10}(9B_{16})$
tmavě šedá	$64_{10}(40_{16})$	$90_{10}(5A_{16})$	$105_{10}(69_{16})$
černá	$0_{10}(00_{16})$	$0_{10}(00_{16})$	$0_{10}(00_{16})$

Tabulka 4.1: Konfigurace pěti odstínů šedé – 8-bitové hodnoty dekadicky a hexadecimálně



Obrázek 4.3: Problém tmavých barev vytištěných návrhu (zleva: rovnoměrná, tmavá a světlá konfigurace): některé přechody nejsou testovacím nástrojem detekovatelné

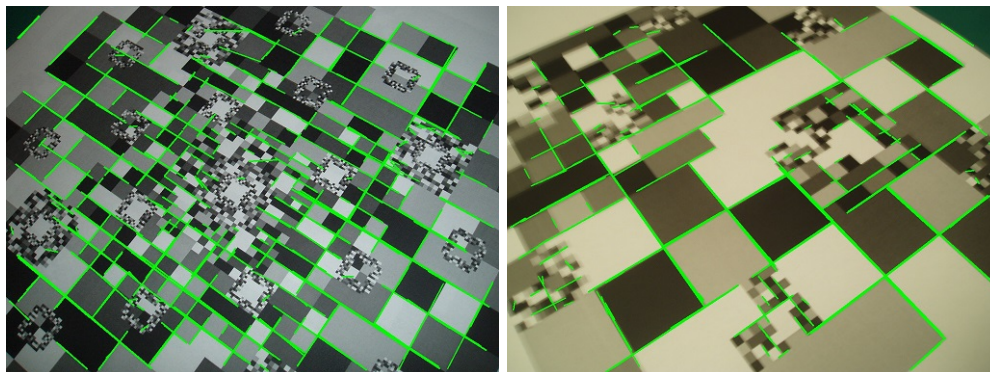
## Kapitola 5

# Testování vlastností jednotlivých návrhů

Všechny v předchozích kapitolách zmíněné způsoby vytváření Uniformního Pole Markerů, které by dovolovalo větší volnost měřítka zobrazení byly podrobeny testům, zjišťující detekční vlastnosti daného návrhu. Protože se jedná o markery, je nutné aby detekce takových polí byla jednoduchá. Složitě způsoby detekce a identifikace markeru by nepřinášely žádné výhody oproti existujícím systémům, které lokalizují polohu kamery bez přítomnosti umělých naváděcích markerů.

### 5.1 Testování detektorem hran

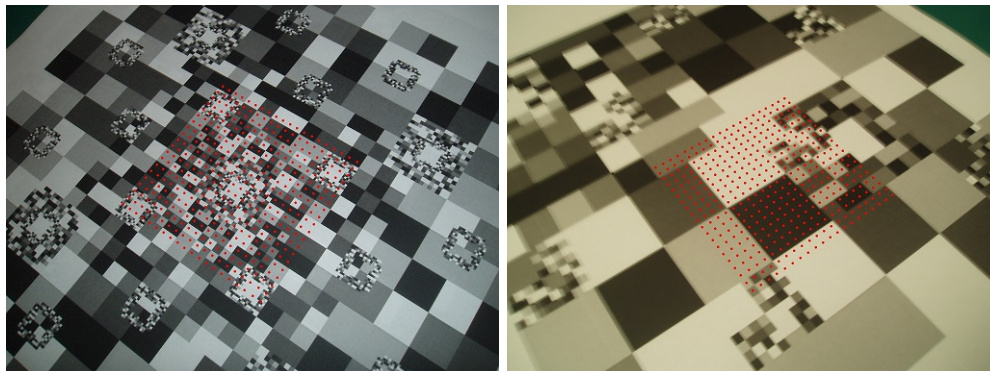
Pro účely testování vlastností byla vytvořena aplikace, vycházející z detektoru Uniformních Polí Markerů (kapitole 7). Vstupem aplikace jsou fotografie a videa, obsahující testované pole, nebo záběr z připojené webové kamery. Tato jednoduchá aplikace hledá ve vstupních snímcích dlouhé hrany na přechodech mezi moduly (první krok algoritmu pro detekci Uniformních Polí Markerů) a jejím výstupem jsou snímky s vykreslenými nalezenými hranami (vlevo na obrázku 5.1). Detekce neprobíhá ve všech obrazových bodech vstupního obrazu, ale pouze na několika horizontálních a vertikálních rozkladových řádcích. Tato vlastnost zaručuje vysokou rychlost detekce, protože je navštívena pouze malá část obrazových bodů (přibližně 5% v závislosti na počtu rozkladových řádků). Aplikace je implementována v jazyce C++ s využitím funkcí pro manipulaci s obrazem z knihovny `OpenCV` [7].



Obrázek 5.1: Výstup testovacího detektoru, zelené čáry značí nalezené spolehlivé hrany.

## 5.2 Testování detektorem Uniformních Polí Markerů

Dalším nástrojem, pomocí kterého byly určovány vlastnosti navržených polí, byl standardní (pro tento účel neupravený) detektor Uniformních Polí Markerů. Výstupem tohoto detektoru, který provádí pouze detekci šachovnice (neidentifikuje markery), je seznam bodů, značící střed modulů v teoretické globální šachovnici. Ukázka výstupu tohoto testovacího nástroje je k nalezení vpravo na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Výstupy testů detekčních vlastností: výstup standardního, neupraveného detektoru UMF, červené body značí předpokládané moduly šachovnice.

Detektor Uniformních Polí Markerů detekuje nejmenší rozpoznatelné moduly – není uzpůsoben pro detekci více různých rozměrů modulů. Případy, jako je na obrázku 5.2, kdy detektor správně našel moduly L2 úrovně i přes dobrou detekovatelnost modulů větších rozměrů (L1, L0) znamenají, že pole umožňuje současnou detekci více úrovní – pozitivní vlastnost pole markerů.

## Kapitola 6

# Syntéza Fraktálních Uniformních polí markerů

Nastavení odstínů modulů Fraktálního uniformního pole markerů je generováno pomocí genetického algoritmu. Důvodem použití genetického algoritmu je dosavadní nenalezení exaktního řešení problému syntézy takových polí, jako je Uniformní Pole Markerů. Postup je obdobný jako u algoritmu pro generování Uniformního pole markerů. Pracuje s mapami obsahující konflikty a *nebezpečné kombinace* (popsané dále v sekci 6.3) a zlepšuje jejich vlastnosti pomocí mutací, které vedou ke zlepšování vlastností pole. Oproti běžným genetickým algoritmům[8] Mutace jsou jediný operátor, který je v algoritmu využit. Lepší vlastnosti pole znamenají snižování počtu konfliktů a nebezpečných kombinací. Tento genetický algoritmus může být obecně definován těmito pojmy:

- Prvotní nastavení odstínů modulů je náhodné.
- Funkce vhodnosti je založena na součtu konfliktů a nebezpečných kombinací.
- V případě, že je mapa bezkonfliktní a neobsahuje žádné nebezpečné kombinace, je algoritmus zastaven.
- Mutace je definována jako zaměnění obsahu okna náhodným obsahem. Zaměňuje se obsah oken, která byla označena za konfliktní nebo obsahují nebezpečnou kombinaci.

### 6.1 Implementační detaily algoritmu

Vstupem algoritmu je *šablona značky* a seznam vložených značek. Šablona je definována jako matice o rozměru  $m_p \times n_p$ , kde prvky matice nabývají hodnot z  $\{0, 1\}$  a značí využití a nevyužití moduly ve značkách. Seznam vložených značek je posloupnost dvojic: souřadnice značky a měřítko (násobek velikosti oproti nejmenší značce v poli). Značky v nejnižší úrovni v poli mají měřítko 1, značky v nejvyšší úrovni mají měřítko  $s_g$ .

Páteř algoritmu tvoří *matice všech modulů* o rozměru  $s_g m_p \times s_g n_p$ , kde prvky matice jsou moduly reprezentované čtveřicí:

- Barva, nabývající hodnot z množiny  $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,  $n$  reprezentuje počet použitých šedých odstínů. Podle [4] je použito 5 odstínů.
- Měřítko, do kterého daný modul náleží.

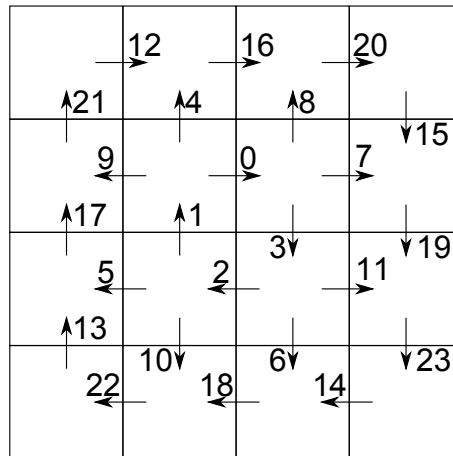
- Zámek pro ochranu proti přepisu barvy.
- Odkaz na modul menšího měřítka, který překrývá daný modul.

Měřítka a odkazy na moduly menších měřítek jsou do matice všech modulů namapovány ze vstupního seznamu vložených značek, barvy doplňuje genetický algoritmus detailně popsany v 6.3.

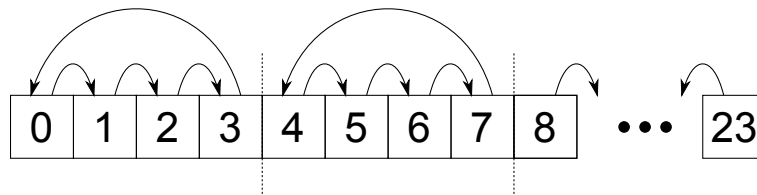
Výstupem algoritmu je seznam vložených značek, jejichž barvy jsou namapovány z matice všech modulů a seznam obarvených oken (včetně souřadnic), který je určen pro detektor.

## 6.2 Extrakce oken a rozřazení do kategorií

Uniformní Pole Markerů je celé pokryté  $n^2$  okny, kde  $n \in \{3, 4, 5, \dots\}$ . Fraktální uniformní pole markerů syntetizované tímto algoritmem jsou tvořena  $n \times n$  okny ve všech měřítkách, která jsou ve Fraktálním Uniformním Poli Markerů zahrnuta. Jako vyhovující velikost okna bylo zvoleno  $n = 4$ . Při menší velikosti okna ( $n = 3$ ) nemusí být k dispozici dostatečný počet kombinací hran k vytvoření unikátních oken v celé mapě. Větší okna ( $n > 4$ ) nejsou brána v úvahu, protože hlavní myšlenkou Fraktálních Uniformních Polí Markerů je vytvořit co nejmenší marker, který bude vždy dobře viditelný na snímku. Každé okno  $4 \times 4$  obsahuje 24 hran mezi moduly (viz. obrázek 6.1), které jsou reprezentovány jako posloupnost hodnot z množiny  $\{-1, 0, +1\}$ , reprezentující charakter hrany. Okna musí být v poli unikátní ve všech čtyřech otočeních, proto jsou otáčení prováděna jako rotace čtveřic v posloupnosti hran podle obrázku 6.2.



Obrázek 6.1: Očíslování hran v okně



Obrázek 6.2: Rotace okna

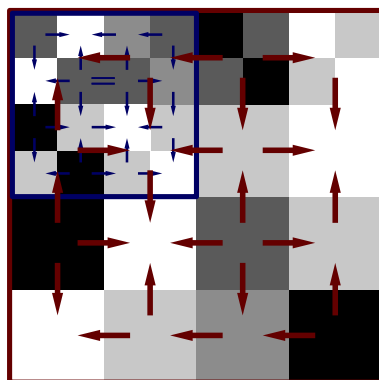
Pro každé měřítko  $n$  jsou nalezena všechna okna  $4 \times 4$ , tvořená z modulů v měřítku  $m$ , pokud  $m = n$  nebo  $m = \frac{1}{2}n$ . Okna, která obsahují moduly vyššího měřítka (tzn.  $m = 2n$ )

jsou zahrnuty pouze tehdy, pokud moduly vyššího měřítka pokrývají maximálně 7 z 16 modulů okna.

Fraktální Uniformní Pole Markerů je tedy tvořeno z oken, které obsahují moduly ze svého měřítka, z menšího měřítka i z vyššího měřítka. Tento způsob pokrytí zaručuje překrývání oken ve velkém stupni a to i v místech pole, kde sousedí moduly o různých velikostech.

Okna jsou na základě svého obsahu rozřazena do třech kategorií:

- *Prioritní okna*: všechna okna v měřítku  $m$ , která obsahují moduly v měřítku  $n$ , pokud  $n < m$
- *Prioritní pod-okna*: všechna okna, která jsou celou svojí plochou zastoupena v některém prioritním okně
- *Neprioritní okna*: všechna ostatní okna.



Obrázek 6.3: Ukázka přednostně zpracovaných oken: Prioritní okno (červené), Prioritní pod-okno(modré).

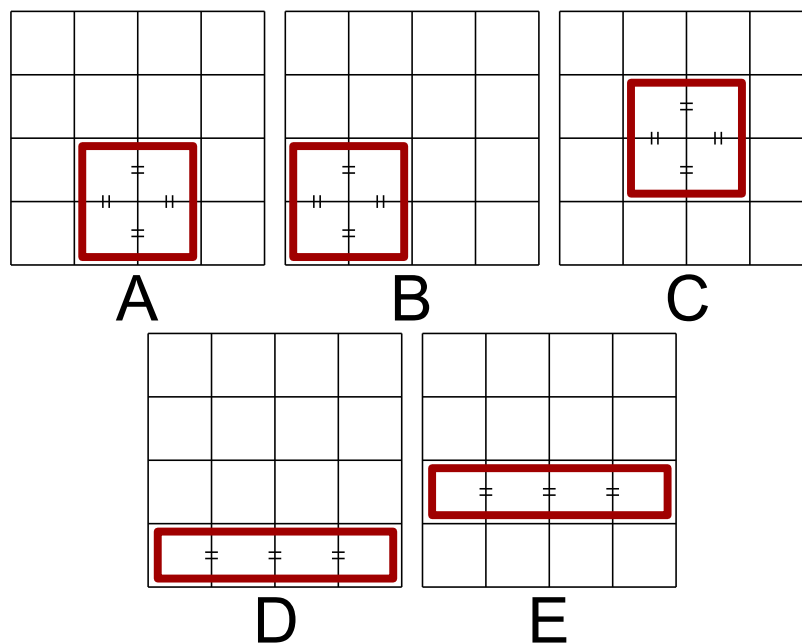
Rozřazení do kategorií je důležité pro způsob jakým se generují barvy pro moduly nižšího měřítka v prioritních oknech. Prioritní pod-okna se neúčastní mutací, jejich obsah je vždy vygenerován již při mutaci prioritních oken.

### 6.3 Genetický algoritmus pro syntézu unikátních oken

Po extrakci oken a jejich rozřazení je celá mapa zpracovávána genetickým algoritmem, který pomocí mutací zlepšuje její vlastnosti snižováním počtu *konfliktů* a *zakázaných kombinací*.

Konflikt se v poli nachází tehdy, pokud existují dvě okna, jejichž kombinace hran je (po možném otočení) totožná nebo pokud existuje okno, které je po otočení totožné samo se sebou.

Zakázané kombinace jsou kombinace hran v okně takové, které by mohly při detekci Fraktálního Uniformního Pole Markerů být zaměněny za okraj pole nebo za okna, která nejsou syntetizována jako unikátní (např. okno  $4 \times 4$ , které je celé pokryté pouze čtyřmi moduly dvojnásobného měřítka). Zakázané kombinace (obrázek 6.4) hran jsou považovány za stejnou chybu pole jako konflikt, proto algoritmus generuje pouze mapy bezkonfliktní a bez zakázaných kombinací.



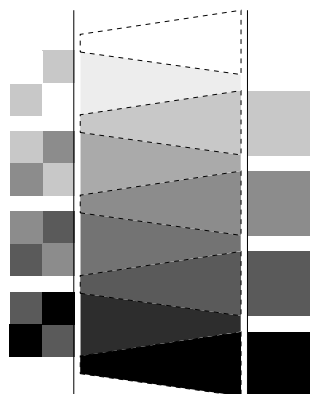
Obrázek 6.4: Zakázané kombinace

Celý algoritmus je rozdělen do dvou fází: prioritní a neprioritní fáze. Neprioritní fáze nastává až v případě, že se mezi prioritními okny a prioritními pod-okny nenachází žádný konflikt ani zakázaná kombinace. Popis algoritmu pro prioritní fázi:

- Prioritní okna a prioritní pod-okna jsou zkontrolovány, zda kombinace jejich hran jsou unikátní a zda neobsahují zakázanou kombinaci ve všech čtyřech otočeních.
- Pokud mapa neobsahuje žádné konflikty ani zakázané kombinace, přechází algoritmus do druhé fáze.
- Moduly oken v konfliktu nebo se zakázanou kombinací jsou odemčeny pro zápis barvy.
- Mutace je aplikována na všechna prioritní okna.
- Mutace je definována jako zaměnění barev všech modulů náhodným obsahem a zamčeny pro zápis, pouze odemčené moduly jsou zaměněny.

Okna jsou v prioritní fázi zpracovávána postupně od největších měřítek k nejmenším. Moduly nižšího měřítko v prioritních oknech jsou barveny vždy dvojicí šedých odstínů (viz. obrázek 6.5). Tento způsob obarvení umožňuje u modulů snadno určit charakter přechodu hrany k okolním modulům.

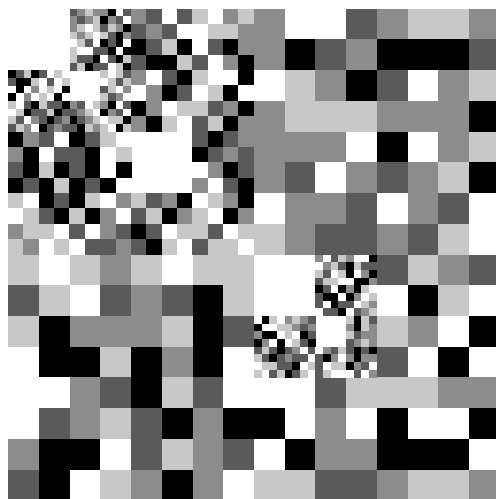




Obrázek 6.5: Paleta šedých odstínů v prioritních oknech: (vpravo) pro moduly ve vlastním měřítku, (vlevo) pro moduly v menším měřítku.

Popis algoritmu pro druhou (neprioritní) fázi:

- Všechna okna jsou kontrolována na výskyt konfliktu nebo nebezpečné kombinace (ve všech čtyřech otočeních).
- Pokud mapa neobsahuje žádné konflikty ani zakázané kombinace, algoritmus končí.
- Mutace je aplikována na neprioritní okna, která jsou označena za konfliktní nebo obsahují nebezpečnou kombinaci.
- Mutace je definována jako zaměnění barev všech modulů náhodným obsahem.



Obrázek 6.6: Fraktální Uniformní pole markerů

## Kapitola 7

# Návrh algoritmu pro detekci Fraktálních uniformních polí markerů

V této kapitole je představen návrh algoritmu pro detekci Fraktálních uniformních polí markerů, který s drobnými změnami vychází z algoritmu pro detekci standardních Uniformních polí markerů.

### 7.1 Algoritmus pro detekci Uniformních Polí Markerů

Konvenční detektory polí markerů se typicky spoléhají na detekci hranic markeru nalezením obrysů v prahovaném obrázku a výběru tvarů skládajících se ze čtyř přímkových obrysů. Uniformní pole markerů nerozlišuje mezi prvky pro detekci markeru a prvky pro samotné rozpoznání. Moduly šachovnice slouží současně pro detekci i identifikaci. Motivací k tomuto přístupu je lepší využití plochy: prvky pro lokalizaci jsou v poli hustší, zatímco identifikační prvky zůstávají zachovány. Algoritmus pro detekci se skládá ze čtyř hlavních kroků:

- Detekce hran
- Stanovení nulových bodů
- Nalezení mřížky šachovnice
- Extrakce modulů šachovnice

které jsou detailně popsány v následujících sekcích.

Algoritmus nenavštěvuje každý bod vstupního obrazu, ale detekce probíhá na několika vertikálních a horizontálních rozkladových řádcích.

#### 7.1.1 Detekce hranových elementů

V této fázi jsou detekovány *hranové elementy* na vertikálních a horizontálních rozkladových řádcích. Každý hranový element (*edgel*) je definován souřadnicemi bodu a orientací, nebo souřadnicemi dvou koncových bodů [6].

Na každý nalezený bod je aplikován Sobelův operátor pro zjištění hrubého odhadu sklonu řádku šachovnice. Pro zajištění vyšší přesnosti sklonu je hledáno více okolních bodů

v obou směrech.

$$p_{i+1} = p_0 + iw\hat{s}_i$$

kde  $\hat{s}_i$  je normalizovaný vektor  $s_i$ . Pokud je nalezena další hrana je sklon aktualizován dle nového koncového bodu.

$$s_{i+1} = p_{i+1} - p_0$$

Stejný postup je opakován pro zvyšující se  $i$  a také pro opačný směr. Pouze spolehlivé hrany jsou uchovány pro další zpracování. Pokud nejsou body  $p_i$  kolineární v dostatečné toleranci, nebo jich není nalezen dostatečný počet, je daný hranový element zahozen. Další kroky algoritmu nevyžadují příliš velký počet nalezených hran, pokud jsou hrany spolehlivé. Experimenty ukázaly, že přibližně 10 rozkladových řádků v horizontálním a vertikálním směru jsou vyhovující pro nalezení dostatečného počtu hranových elementů.

### 7.1.2 Stanovení nulových bodů

Při užití homogenních souřadnic pro nulový bod  $v$  a svazek čar  $l_i$  by měly být všechny čáry souběžné s nulovým bodem.

$$\forall i : v \cdot l_i = 0$$

Souřadnice čar v reálné projektivní rovině tvoří třírozměrný vektorový prostor bez počátku (s relací ekvivalence). Body reálné projekční roviny korespondují k nadrovinám, které prochází počátkem tak, že je možné najít nulový bod proložením nadroviny přes všechny čáry (prodloužené hranové elementy), které se nacházejí ve svazku. Čárové vektory  $l_i$  jsou škálovány tak, aby váha každé čáry korespondovala k délce hranového elementu. Tímto způsobem jsou upřednostněny delší a spolehlivější hranové elementy. Normála nadroviny je nalezena jako směrnice nejmenší odchylky rozkladem na vlastní čísla korelační matice

$$C = (l_0 \dots l_N)(l_0 \dots l_N)^T$$

Jelikož  $C$  je symetrická matice  $3 \times 3$ , výpočet rozkladu na vlastní čísla je velice efektivní.

### 7.1.3 Nalezení mřížky šachovnice

Nalezení mřížky hran pole markerů jako dvou skupin svazků pravidelně opakovaných čar souběžných s každým nulovým bodem. Dva nulové body  $v_1, v_2$  definují hranici ( $h = v_1 \times v_2$ ). Hrany markerů jednoho směru mohou být vypočteny pomocí hranice jako (*mathrm{x}* značí normalizovaný vektor)

$$l_i = \hat{l}_{base} + (ki + q)\hat{h}$$

, kde  $\hat{l}_{base}$  je libovolně zvolená základní čára přes nulový bod různá od hranice. Parametr  $k$  ovládá hustotu čar a  $q$  určuje pozici první čáry. Vhodnou a jednoduchou volbou pro  $l_{base}$  je čára přes střed obrázku (a přes nulový bod). Za účelem nalezení  $k$  a  $q$  je hodnota  $(ki + q)$  počítaná pro každou čáru (prodloužený hranový element) vstupní skupiny. Tyto hodnoty jsou shlukovány, každému shluku je přiřazeno  $i$  a pak obecně optimální  $k$  a  $q$  jsou nalezeny lineární interpolací. Pro jednoduchost popisu algoritmu předpokládá, že značná část vstupního obrázku je pokryta polem markerů. Avšak kroky 2 a 3 algoritmu jsou podmíněně aplikovány na obdélníkové části obrázku (čtvrtiny, devítiny); pro obrázky s vyšším rozlišením je pole markerů nalezeno i v případě, že pokrývá libovolný zlomek vstupního obrazu z kamery.

## 7.2 Úpravy algoritmu

Algoritmus pro detekci Uniformních Polí Markerů nedokáže rozlišovat mezi více úrovněmi – není připraven na výskyt modulů o více různých měřítkách. Každý samostatný marker (okno  $n \times n$ ) je identifikován podle kombinace základních charakterů hran. Výstupem algoritmu pro syntézu Fraktálních Uniformních Polí Markerů (kapitola 6) je seznam všech oken, které se v poli markerů nacházejí. Pokud by byla detektorem jakákoli kombinace hran v okně detekována, bylo by možné určit polohu okna podle tohoto seznamu. Detektor musí stanovit více mřížek (dle testů by odhadem 3 měl být dostatečný počet) hran modulů, přičemž všechny mřížky by měly společné oba body, ve kterých se čáry sbíhají, lišily by se pouze rozestupem čar mřížky. Například pro pole, které je znázorněno v obrázku 6.6 by rozestupy čar byly dvojnásobné pro každou nižší úroveň. Protože je syntézou dosaženo vysokého stupně překrytí oken na přechodech z větších modulů (úroveň  $L_n$ ) do menších (úroveň  $L_{n+1}$ ), je vhodné preferovat mřížky s větším rozestupem čar, ve kterých se budou přednostně hledat okna  $n \times n$ .

## Kapitola 8

### Závěr

Tato práce inovuje Uniformní Pole Markerů tak, aby umožňovaly větší volnost měřítka zobrazení. Uniformní Pole Markerů (aperiodické 4-orientované pole oken  $n^2$ ) je omezeno tím, že na každém vstupním snímku pro detektor musí být dobře viditelné minimálně okno  $n \times n$ . Myšlenkou tohoto rozšíření je pokrýt standardní Uniformní Pole Markerů menšími vnořenými poli markerů, které by umožňovaly detekci i z menších vzdáleností. Toto vedlo k sérii experimentů s vkládáním zmenšených oken či celých polí markerů na různá místa v Uniformním Poli Markerů. Několik experimentů je představeno a na základě testování jsou porovnány jejich detekční vlastnosti (především jednoduchost detekce a hustota dobře viditelných markerů).

Je navržen jeden konkrétní způsob konstrukce těchto rozšířených Uniformních Polí Markerů, inspirovaný z Fraktálních Polí Markerů. Výstupem je pole markerů, nazvané *Fraktální Uniformní Pole Markerů*. Fraktální Uniformní Pole Markerů přináší vysokou hustotu markerů pro každé měřítko v celém poli. Aby bylo navržené pole prakticky použitelné, musí být každé okno  $n \times n$  v poli unikátní a to ve všech čtyřech možných otočeních. Pro tyto účely je navržen a implementován genetický algoritmus pro syntézu Fraktálních Uniformních Polí Markerů. Způsob syntézy zajišťuje možnost detekce oken i na hranicích vnořených polí markerů různých úrovní.

Tento návrh ovšem nenabízí možnost vkládání markerů v prakticky nekonečném počtu měřítek (v porovnání s Fraktálními Poli Markerů) a proto se nabízí možnost navrhnout jiný způsob vkládání, který by umožňoval úplnou volnost pohybu kamery. Zmíněná možnost detekce oken i na hranicích vnořených úrovní je ovšem omezena pouze na hranice za sebou následujících úrovní, například hranice první a druhé úrovně, nebo druhé a třetí (ne však první a třetí). Proto další možné zdokonalení by mohlo znamenat odstranění tohoto omezení – možnost detekce oken na hranicích libovolných úrovní.

# Literatura

- [1] Bimber, O.; Raskar, R.: *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd., 2005, ISBN 1568812302.
- [2] Digia: Qt Project: Doc [online]. 2013 [cit. 2013-05-03].  
URL <http://qt-project.org/doc/>
- [3] Fiala, M.: Designing Highly Reliable Fiducial Markers. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, ročník 32, č. 7, 2010: s. 1317–1324, ISSN 0162-8828, doi:10.1109/TPAMI.2009.146.
- [4] Herout, A.; Szentandrás, I.; Zachariáš, M.; aj.: Five Shades of Grey for Fast and Reliable Camera Pose Estimation.
- [5] Herout, A.; Zachariáš, M.; Dubská, M.; aj.: Fractal Marker Fields: No More Scale Limitations for Fiduciary Markers. 2012.
- [6] Hirzer, M.: Marker Detection for Augmented Reality Applications. Technická zpráva, Inst. for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, Austria, 2008.
- [7] Itseez: OpenCV [online]. 2013 [cit. 2013-05-10].  
URL <http://opencv.org/>
- [8] Mitchell, M.: *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1998, ISBN 0262631857.
- [9] Printing.cz: Printing: Tisk, pre-press a knihařské zpracování [online]. 2013 [cit. 2013-05-11].  
URL <http://www.printing.cz/>
- [10] Szentandrás, I.; Zachariáš, M.; Havel, J.; aj.: Uniform Marker Fields: Camera Localization By Orientable De Bruijn Tori. 2012.