VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

ANALÝZA A IDENTIFIKACE ŠUMU FOTOAPARÁTU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE BENJAMIN KRÁL
AUTHOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

ANALÝZA A IDENTIFIKACE ŠUMU FOTOAPARÁTU

SENSOR PATTERN NOISE ANALYSIS AND IDENTIFICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE BENJAMIN KRÁL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE ING. PAVEL OČENÁŠEK, PH.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Abstrakt

Tato práce pojednává o extrakci referenčního šumu fotoaparátu, což je aditivní šum vyskytující se v každé digitální fotografii a je unikátní pro každý fotoaparát. V práci jsou diskutovány metody extrakce šumu a metody k porovnání získaných šumů s cílem zjistit fotoaparát, jímž byla fotografie pořízena. Dále je implementována aplikace, která využívá nejvhodnější z těchto metod. Práce obsahuje řadu experimentů zjišťující různé parametry běhu aplikace v závislosti na vstupních fotografiích a jejich parametrech.

Abstract

This work is about extraction of sensor pattern noise of digital camera which is additive noise that is present in every digital photograph and which is unique for every camera. Suitable sensor pattern noise extraction methods are discussed for noise extraction and comparation with aim to find out with which camera the digital picture was taken. Best method is implemented as an application. The work describes few experiments that are reviewing the application performance based on many different photographs given to the application.

Klíčová slova

Referenční šum fotoaparátu, šum fotografie, určení původu fotografie, šum, metoda osmiokolí, bezpečnost, otisk fotoaparátu, digitální otisk, digitální fotografie

Keywords

Sensor pattern noise, camera noise, find origin of photograph, noise, information forensics, camera fingerprint, digital fingerprint, digital photograph

Citace

Král Benjamin: Analýza a identifikace šumu fotoaparátu, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2015

Analýza a identifikace šumu fotoaparátu

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Očenáška, Ph.D.
Další informace mi poskytl Oliver Sampson MSc.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

……
Benjamin Král
Datum 20.5.2015

Poděkování

Děkuji Ing. Pavlu Očenáškovi za pomoc a rady při tvorbě této práce, také bych chtěl poděkovat Oliveru Sampsonovi za představení nástroje KNIME a rady, které mi usnadnily vývoj modulu pro nástroj KNIME.

© Král Benjamin, 2015

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

Obsah 1
1 Úvod 2
2 Alternativní metody a historie 2
3 Šum fotoaparátu 2
3.1 Definice a popis 2
3.2 Extrakce šumu z fotografie 3
4 Metody extrakce šumu 4
4.1 Metoda průměrováním snímků 4
4.2 Metoda maximální pravděpodobnosti 5
4.3 Metoda PCE 6
4.4 Metoda Fázového spektra a CCN 7
4.5 Metoda osmiokolí 7
4.6 Výběr nejvhodnější metody 9
5 Filtry k získání šumu 10
5.1 Filtr nahrazení střední hodnotou 10
5.2 Filtr nahrazení průměrem 10
5.3 Gaussovský filtr 10
5.4 Filtr založený na Wienerově vlnkovém filtru 11
5.5 Filtr 3D transformace pásma 12
6 Implementace 12
6.1 Implementace metod 13
6.2 Implementace konzolové aplikace 14
6.3 Implementace v nástroji KNIME 15
7 Testy a experimenty 16
7.1 Analýza šumu fotoaparátu 16
7.2 Výběr nejvhodnějšího filtru 17
7.3 Spolehlivost podle velikosti fotografií 18
7.4 Zmenšená či zdeformovaná fotografie 20
7.5 Rekonstrukce scenérie 21
8 Možná rozšíření 22
9 Závěr 23

1 Úvod

Pořizování digitálních fotografií se řadí mezi dnes nejběžnější technologie, takřka každý vlastní fotoaparát, nebo mobilní telefon fotoaparátem vybavený. Digitální fotografie již skoro úplně nahradily analogové fotografie a otevřel se tím prostor k výzkumu technologií s jimi spjatými.

Každá digitální fotografie je unikátní, nikdy není možné vyfotit 2 stejné snímky, a stejně tak každý digitální fotoaparát je jedinečný. [5] Tato práce se zabývá metodami k získání šumu fotoaparátu ze snímků pořízených tímto fotoaparátem a jeho následnou analýzou. Cílem této práce je popsat nejvhodnější metodu k získání šumu fotoaparátu a na základě této metody vytvořit nástroj, který z databází digitálních fotografií fotoaparátů dokáže určit, který fotoaparát pořídil jednu další fotografii, která nebyla obsahem databáze.

Tyto postupy by bylo možné využít například v oblasti kriminalistiky k určení původu fotografie, nebo naopak přiřazení fotoaparátu fotografii. Další možné využití by bylo umožnění užití digitální fotografie jako soudního důkazu, protože na základě šumu ve fotografii by se dalo s jistotou říci, že daná fotografie je nezměněný originál. [3] [2]

2 Alternativní metody a historie

Krom metod popisovaných v této práci se již dříve vyskytovaly různé jiné metody a postupy, jejichž cílem bylo jednoznačně přiřadit digitální fotografii k fotoaparátu, kterým byla pořízena. Tyto postupy nebyly příliš rozšířené a dnes se s nimi již takřka nesetkáme zejména kvůli tomu, že byly buďto příliš nepřesné, nebo byly závislé na implementaci fotoaparátu, takže nebyly k dispozici ve všech fotoaparátech a všech digitálních snímcích. [2]

Nejčastější alternativní metodou s velmi vysokou přesností je vybavení fotoaparátu mechanismem, který na každé fotografii zanechá neviditelný vodoznak. Tento vodoznak mohl být využit nejen k uchování informací o fotoaparátu, jímž byla fotografie pořízena, ale mohl obsahovat i časové razítko, nebo jiné údaje známé při pořizování fotografie. Tato metoda však není použitelná u všech fotografií, ale pouze u těch, které byly pořízeny speciálním fotoaparátem, který je vybaven funkcí, která toto implementuje. Její využití je tedy velmi omezené a je vhodné pouze pro zabezpečení fotografie před úpravami, nikoliv však k určení původu fotografie. [2]

3 Šum fotoaparátu

3.1 Definice a popis

Každý digitální fotoaparát je složen z několika elektronických součástek, jejichž účelem je převod analogové informace přenášené fotony na informaci digitální a poté případná komprese obrazových dat na vhodný formát (nejčastěji JPEG). Hlavní částí procesu je získání obrazu, který má fotoaparát zachytit. Fotony dopadající na obrazový snímač fotoaparátu nesou informaci, která je převáděna na analogový signál, který je následně pomocí analogově číslicového převodníku převáděna na signál digitální. Přitom pro každou barevnou složku je zde samostatný bod snímače, který zjišťuje intenzitu pouze dané barevné složky. Každý obrazový bod výsledného snímku se tedy skládá kompozicí

takových tří bodů snímače. Následně prochází snímek dalšími zpracovávacími procesy, jako například korekce barev, nebo vyvážení kontrastu. Nakonec je zkomprimován do požadovaného formátu. [2]

Všechny tyto procesy mohou zanechat na snímku určitou stopu. Pro metody probírané v této práci je nejdůležitější šum vznikající na jednotlivých bodech obrazového snímače. Každý takový bod je vyroben s malou nepřesností, která způsobuje rozdílnou citlivost na světlo daného bodu. Tato rozdílná citlivost se zanese do snímku fotoaparátu jako neviditelný šum, který je na všech snímcích daného fotoaparátu stejný, ale který je rozdílný mezi jednotlivými fotoaparáty.

Metody popisované v této práci pracují s šumem jako celkem, který na každé digitální fotografii vzniká při zachycování snímku a který je shodný na všech snímcích pořízených digitálním fotoaparátem a který nezávisí na obsahu obrazu digitální fotografie.

Protože je digitální fotoaparát obvod složený z elektrických součástek, které ovlivňuje jejich teplota, tak i na snímcích fotoaparátu se poznamenají okolní podmínky, jako například teplota. S klesající teplotou součástek ve fotoaparátu klesá jejich odpor a tím by tento jev mohl ovlivnit šum ve fotografiích. Je proto třeba při získávání šumu použít více snímků daného fotoaparátu a jejich šum získat průměrem šumů těchto snímků, aby se zamezilo ovlivnění analýzy šumu snímku těmito jevy. [2] [3]

3.2 Extrakce šumu z fotografie

Protože šum není uložen jako zvláštní složka digitální fotografie odděleně od složky obrazové, ale je obsažen přímo v obraze digitální fotografie, je třeba jej získat extrakcí z obrazu. Šum fotoaparátu však nelze nijak jednoduše ze snímku získat, protože by byl velmi zkreslen obsahem snímku a to především v oblasti kde se na snímku v obraze vyskytují hrany. Je proto třeba vyfiltrovat obrazová data ze šumu na snímku. Ve většině metod se tohoto dosáhne postupem opačným – tedy získání snímku bez šumu a následným rozdílem fotografického snímku s šumem a snímku vyfiltrovaného od šumu. Avšak nikdy nebude filtrace stoprocentní a vždy v šumu zůstanou nějaké zbytky obrazu, nebo se projeví jiné nízkofrekvenční šumy, jako například prach na objektivu fotoaparátu apod., které nejsou šumem snímače fotoaparátu a jsou proměnlivé povahy v závislosti na podmínkách při pořizování fotografie. Abychom toto potlačili, pracujeme při extrakci šumu s více snímky stejného fotoaparátu, kde každý snímek zachycuje různé obrazy v různých prostředích. Zjištěním průměru jednotlivých bodů šumu snímku se efektivně získá průměrný šum fotoaparátu, který bude jen minimálně ovlivněn obsahem snímků a vysokofrekvenčním náhodným proměnlivým šumem. Tento proces mají všechny popisované metody v této práci společný. Dále bude každá metoda extrakce šumu popisována samostatně a poté budou jednotlivé metody porovnány a bude vybrána vhodná metoda, která bude implementována. [3]

4 Metody extrakce šumu

4.1 Metoda průměrováním snímků

4.1.1 Popis metody

Abychom mohli přiřadit snímek k digitálnímu fotoaparátu, jímž byl pořízen, musíme nejdříve získat šum, který je ve snímcích toho fotoaparátu přítomen. Tento získáme pomocí průměrování N_p počtu snímků. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.2, šum ve fotografii může být značně pozměněn obrazem scény ve snímku, čemuž tato metoda předchází průměrováním snímků, čímž efektivně potlačí vliv scény na šum fotoaparátu. Tento efekt ještě umocní odstranění scény ze snímku předtím, než je snímek průměrován. Tohoto se dosáhne použitím filtru k odstranění šumu, v práci Jana Lukáše [2] použili po mnoha experimenty s různými filtry vlnkový filtr, který se experimentálně ukázal jako nejvhodnější.

Výhodou této metody ostatním dřívějším metodám je především aplikovatelnost na libovolný fotoaparát, protože není třeba tuto metodu nijak implementovat na straně fotoaparátu. Také není třeba mít přístup k fotoaparátu samotnému, protože tato metoda pracuje pouze se snímky již pořízenými nezávisle na implementaci nebo nastavení fotoaparátu. [2]

Šum fotoaparátu $n^{(k)}$, kde $k = 1 \dots N_p$, je získán rovnicí (1), kde $p^{(k)}$ jsou snímky pořízené fotoaparátem a $F(p^{(k)})$ je obraz scény získaný vlnkovým filtrem F.

$$n^{(k)} = p^{(k)} - F(p^k) \tag{1}$$

Poté co je získán referenční šum fotoaparátu $n^{(k)}$, je možné zjistit, zda snímek p byl pořízen kamerou C s výstupem $n^{(k)}$. K určení využijeme korelace ρ_C mezi $P_C = n^{(k)}$ a $n = p - F(p)$ podle vzorce (2), kde P_C je šum fotoaparátu vypočítaný rovnicí (1). [2]

$$\rho_C = corr(n, P_C) = \frac{(n - \bar{n}) \cdot (P_C - \bar{P}_C)}{\|n - \bar{n}\| \|P_C - \bar{P}_C\|} \tag{2}$$

Nyní je možné experimentálně určit $\rho_C(q)$ snímků q pořízených kamerou C a $\rho_C(q')$ snímků q' nepořízených kamerou C, následně pomocí Neyman-Pearsonova lemma určíme práh T mezi oběma skupinami. Pro snímek r u kterého není známo, jestli byl či nebyl pořízen kamerou C, zjistíme $\rho_C(r)$ a porovnáme s prahem T. [2]

4.1.2 Závěr

Metoda průměrováním snímků je nejjednodušší z navrhovaných metod. Šum fotoaparátu je získán pouhým potlačením scény z dostatečně velkého množství fotografií pořízených fotoaparátem a následným zprůměrováním výsledných obrazů. K potlačení scény z obrazu fotografie se používá vlnkový filtr popisovaný v kapitole 5.4. Nad takto získanou množinou vzorků šumů provedeme operaci průměr a tím získáme referenční šum. K přiřazení fotografie k fotoaparátu je pak použita korelační funkce (2), jejíž výsledek je porovnán s předem určeným prahem, který určuje hranici příslušnosti fotografie k fotoaparátu. [2]

Tato metoda jako první z navrhovaných metod byla viděna jako potenciálně použitelná pro přiřazení snímků fotoaparátům a analýze šumu ve fotografiích, protože jako první dosahovala stabilně vysokých výsledků přiřazování snímku fotoaparátu a je použitelná nezávisle na fotoaparátu a přístupu k fotoaparátu. [2]

4.2 Metoda maximální pravděpodobnosti

4.2.1 Popis metody

Tato metoda představená v [5] je založená na metodě představené v kapitole 4.1. Stejně jako v metodě průměrováním snímků se šum ze vzorku fotografií získá pomocí Wienerova filtru popsaném v kapitole 5.4 a rozdílu fotografií se šumem a fotografií bez šumu. Na rozdíl od popisované metody však v této metodě nezískáme referenční šum fotoaparátu jako jednoduchý průměr všech šumů fotografií pořízených konkrétním fotoaparátem. [5]

Zpracovávaný snímek nyní předpokládejme jako bezbarvý snímek ve stupních šedi, nebo jako snímek obsahující jediný barevný kanál. Barevná fotografie lze rozdělit na 3 snímky, kde každý bude mít pouze jeden barevný kanál a na každý z nich bude samostatně aplikována tato metoda. [5]

Snímek $I[i,j], i = 1..m, j = 1..n$ je matice $m \times n$ obrazových bodů reprezentovaných celočíselnou hodnotu vyjadřující intenzitu jednotlivých pixelů majících hodnotu $I[i,j] \in (0, 255)$. Za použití Wienerova filtru F k odstranění šumu ze snímku I získáme šum snímku $W = I - F(I)$. Šum snímku W můžeme rozdělit podle (3) na všechny náhodné vysokofrekvenční šumy Ξ a hledaný statický šum fotoaparátu IK. Tento je váhově závislý na barevné intenzitě pixelu, která je vyjádřena g, čímž se dosáhne vyváženosti bílé barvy při zpracování barevných snímků. [5]

$$W = g \cdot IK + \Xi \tag{3}$$

Abychom získali nejpravděpodobnější šum fotoaparátu $\widehat{K}$ (odsud jméno této metody – hledáme nejpravděpodobnější šum, ne pouze průměr šumů) z množiny snímků $I_1 \dots I_N$ jediného fotoaparátu C, použijeme (4), kde W_k vypočteme zvlášť jako $W_k = I_k - F(I_k)$. [5]

$$\widehat{K} = \frac{\sum_{K=1}^{N} W_k I_k}{\sum_{K=1}^{N} (I_k)^2} \tag{4}$$

Přiřazení fotografie fotoaparátu je již podobně jako u 4.1 zajištěna korelační funkcí referenčního šumu a šumu získaného ze snímku fotoaparátu a následným porovnáním výsledku korelační funkce s předem určenou hranicí příslušnosti snímku k fotoaparátu. [5]

4.2.2 Závěr

Tato metoda jako první na rozdíl od dříve představených zohledňuje ve výpočtu referenčního šumu fotoaparátu i jiné složky než jen hodnoty bodů nezávisle na okolních bodech. Zohledňuje intenzitu barevných složek při výpočtu šumu fotoaparátu a intenzitu pixelů ve snímku – v jasnějších pixelech je ve vzorci (4) výraznější referenční šum fotoaparátu, proto je vhodné při použití této metody jako referenční snímky k získání referenčního šumu fotoaparátu používat snímky bez textury a s vysokou svítivostí (například snímky čistého nebe, rovnoměrně nasvíceného papíru apod.).

Značnou nevýhodou je z tohoto vyplývající nedostatky – u velmi členěných fotografií či v podsvícených fotografiích bude hůře získatelný referenční šum. Tato metoda se kvůli těmto nedostatkům ukázala jako nestabilní a nevhodná k reálnému nasazení. [5]

4.3 Metoda PCE

4.3.1 Popis metody

Metoda Peak-to-Correlation Energy (zkráceně PCE) prezentovaná v [6] se soustředí na snížení nesprávné akceptace obrázků při přiřazení k fotoaparátu – tedy snížení počtu případů, kdy při rozhodování zda fotografie byla pořízena daným fotoaparátem je nesprávně určeno, že ano. Fotografie často obsahují různé periodické signály, které filtrační funkce určí jako součást šumu fotoaparátu. Tyto periodické signály mohou být například pruhy na snímku fotoaparátu a mohou vznikat například na obrazovém snímači fotoaparátu. Pokud by dva fotoaparáty měly stejný snímač, na obou se může projevit tento periodický signál jako velký podíl referenčního šumu fotoaparátu a fotografie z jednoho fotoaparátu mohou být nesprávně přiřazeny fotoaparátu druhému. Metoda PCE jako první z popisovaných metod nevyužívá k zjištění příslušnosti fotografie běžnou korelační funkci, ale využívá novou navrhovanou korelační funkci PCE, jejímž úkolem je právě přiřazení menší váhy periodickým signálům v šumu fotoaparátu. [6]

Vzorec na výpočet PCE využitelné místo korelační funkce využívané v předchozích metodách je popsán ve vzorci (5) kde $\mathcal{A}$ je malý čtvercový prostor okolo nuly a $|\mathcal{A}|$ je jeho obsah (obsah v pixelech). [6]

$$PCE(a,b) = \frac{c^2(0)}{\frac{1}{n-|\mathcal{A}|}\sum_{k,k\notin\mathcal{A}} c^2(k)} \tag{5}$$

Kde $c(m)$ je definováno v (6). N je počet pixelů v porovnávaných snímcích a $\oplus$ je operace přičtení modula N pravého operandu. Jinými slovy je snímek ve své ose y přetočen o parametr m, tedy k indexu y je přičteno m a přetékající pixely jsou přesunuty na nově uvolněné místo na začátku snímku (angl. se operace nazývá „shift“, je běžně známa například jako operace s binárním vektorem). Díky postupnému posunu se případný periodický signál v šumu fotoaparátu dostane do fáze a způsobí, že ve vzorci (5) se zvětší dělitel, tudíž korelační funkce bude mít nižší výsledek.

$$c(m) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x_i y_{i\oplus m} \tag{6}$$

4.3.2 Závěr

Tato metoda nahrazuje běžnou korelační funkci, použitou v předcházejících metodách, funkcí PCE, která snižuje nesprávnou akceptaci fotografie při přiřazení fotoaparátu způsobenou lineárními signály ve fotografii.

Tato metoda přinesla ještě větší přesnost, ale jak ukázaly další testy, kvůli druhé mocnině v čitateli je tato metoda velmi náchylná na chyby, které umocní právě jmenovanou druhou mocninou, takže výhody získané potlačením periodického signálu ze šumu fotoaparátu jsou znehodnoceny vzniklou chybou a ve výsledku nesprávná akceptace fotoaparátu je mírně vyšší než u předcházejících metod. [6]

4.4 Metoda Fázového spektra a CCN

4.4.1 Popis metody

Tato metoda přináší zlepšení hned na dvou místech v postupu extrakce šumu fotoaparátu a přiřazení fotoaparátu fotografii. První ze dvou vylepšení spočívá v průměrování pouze fázového spektra snímku a ne celého snímku, čímž jsou výrazně potlačeny obrazová data ze šumu fotoaparátu. Druhé zlepšení postupů touto metodou spočívá v odstranění nevýhod PCE. Tato metoda tedy taktéž navrhuje používat jinou korelační funkci, která však nemá nevýhody spojené s korelační funkcí PCE. [7]

První z vylepšení vychází ze základní metody průměrování snímků, ale oproti jmenované metodě neprůměruje celé snímky, ale nejdříve ze snímků pomocí vlnkového Wienerova filtru odstraní obrazová data a následně získá pouze fázovou komponentu šumu fotoaparátu. Tímto postupem se odstraní i okem viditelné pozůstatky obrazových dat v šumu fotoaparátu, které v šumu vznikaly především v místech hran v obraze. Pro získání referenčního šumu fotoaparátu je poté získán průměrný šum několika takto získaných fázových spekter šumů fotografií. [7]

Druhé vylepšení vychází z korelační metody představené metodou PCE, tedy z rovnice (5). Na základě jmenované práce navrhují používat „correlation over circular cross-correlation norm“ [7] neboli CCN, která je definovaná v (7). [7]

$$CCN(a,b) = \frac{c(0)}{\sqrt{\frac{1}{n-|\mathcal{A}|}\sum_{k,k\notin\mathcal{A}} c^2(k)}} \tag{7}$$

4.4.2 Závěr

Tato metoda přináší značné zlepšení při nesprávné akceptaci fotoaparátu a zároveň zvedá správnou akceptaci fotoaparátu, a jak se ukázalo v experimentech, je tato metoda stabilní zlepšení ve všech směrech. [7]

4.5 Metoda osmiokolí

4.5.1 Popis metody

Metoda osmiokolí si klade za cíl snížit dopad obrazu fotografického snímku na šum fotoaparátu. Této metodě předcházela metoda čtyřokolí, která byla prezentována v dřívější práci od stejných autorů a metoda osmiokolí je přímým následníkem, je založená na stejném principu a pouze aplikuje principy na větší oblast v okolí každého pixelu, což vede k větší výkonnosti, proto metodu čtyřokolí neuvádím jako samostatnou metodu. [3]

Jak bylo řečeno, metoda osmiokolí se snaží potlačit vliv obrazu na šum fotoaparátu. Jak může název naznačovat, dosáhne toho pomocí zahrnutí 8 okolních obrazových bodů každého pixelu do výpočtu šumu fotoaparátu. Díky zahrnutí osmiokolí do výpočtu šumu dokáže tato metoda efektivně zjišťovat hrany v obraze a potlačit jejich vliv na šum získaný z fotografického snímku, a protože hrany v obraze způsobují velkou část zbytků obrazu v šumu fotoaparátu, značně se tím zvýší přesnost extrakce šumu ze snímku a s tím související úspěšnost přiřazení fotoaparátu. [3]

Metoda osmiokolí zavádí do procesu získání šumu fotografie novou operaci, která se provede nad zpracovávaným obrázkem ještě předtím, než je na snímek aplikován filtr k odstranění obrazových dat ze snímku, tedy tato nová operace se provede jako první. [3]

Pro každý bod $I[i,j], i = 1 \dots m,\ j = 1 \dots n$ snímku I o velikosti $m \times n$ pixelů je provedena predikce pixelu $\hat{p}$ v závislosti na okolních 8 bodech podle (8) kde t' je matice (9) okolních bodů pixelu $I[i,j]$ pojmenovaných podle světových stran (anglicky) vzhledem k středovému pixelu $\hat{p}$, který se snažíme předpovědět. [3]

$$\hat{p} = \begin{cases} střední\ hod.(t') & (\max(t') - \min(t') \leq 20) \\ (n+s)/2 & (|e-w| - |n-s| > 20) \\ (e+w)/2 & (|n-s| - |e-w| > 20) \\ (es+wn)/2 & (|en-ws| - |es-wn| > 20) \\ (en+ws)/2 & (|es-wn| - |en-ws| > 20) \\ median(t') & jinak \end{cases} \tag{8}$$

$$t' = \begin{bmatrix} wn & n & en \\ w & & e \\ ws & s & es \end{bmatrix} \tag{9}$$

V prvním kroku se tedy provede predikce každého pixelu snímku I, čímž získáme predikovaný obraz $CAI(I)$, kde operace $CAI(\,)$ je prováděna pro každý obrazový bod operandu podle (8). Následně se vypočítá rozdíl D originálního obrazu I a $CAI(I)$, jak je naznačeno v (10). [3]

$$D = I - CAI(I) \tag{10}$$

Dále se již pracuje s rozdílem D, na který je aplikován Wienerův filtr, jak je popsáno v kapitole 5.4. Referenční šum fotoaparátu je získán jako průměr šumů takto získaných. V dalším kroku jsou na získaný referenční šum fotoaparátu y' aplikovány dvě operace zajišťující minimalizování dopadu JPEG komprese a posílení referenčního šumu fotoaparátu jak je naznačeno v (11). [3]

$$y = WF(ZM(y')) \tag{11}$$

Operace $ZM(y')$ způsobí, že snímek šumu y' bude mít v každém řádku a sloupci střední hodnotu nula (přičtením konstanty ke všem členům každého řádku a sloupce, které nemají střední hodnotu nula), operace $WF(\,)$ zajistí, že operand této operace bude mít ploché spektrum frekvence, jak je řečeno v [3].

Přiřazení fotoaparátu je založeno na korelační funkci CCN představené v kapitole 4.4.

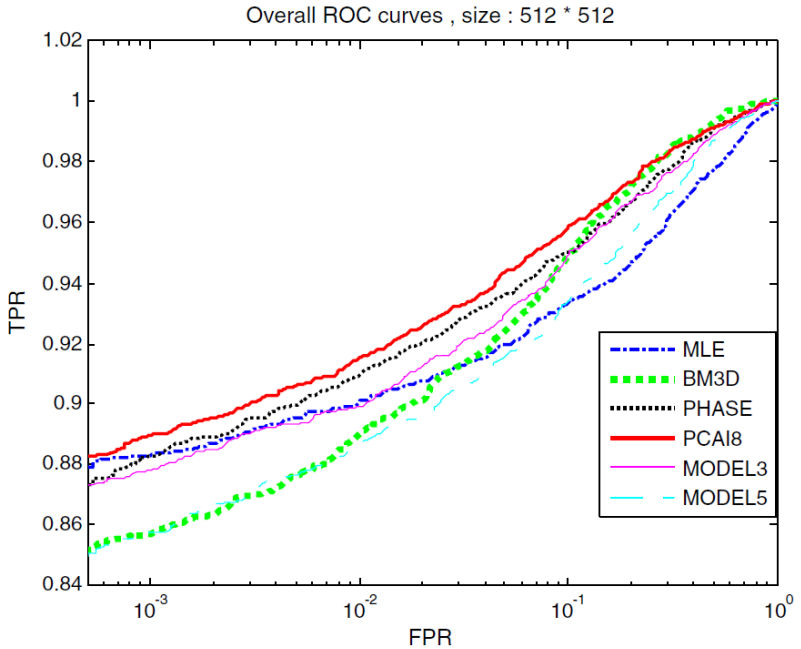
4.5.2 Závěr

Metoda osmiokolí zavádí nový krok do exktrace šumu ze snímků fotoaparátu a zároveň si bere to nejlepší z předcházejících metod. Nový krok přidaný do fáze extrakce šumu ze snímku je filtr, který je adaptivní vzhledem k obsahu fotografie a odstraní obrazová data ze snímku v závislosti na 8 okolních pixelech každého obrazového bodu.

Tato metoda je ze všech doposud představených metod nejefektivnější a má stabilně nejlepší výsledky. [3]

4.6 Výběr nejvhodnější metody

V práci [3] autoři provedli rozsáhlý test všech stávajících metod zmíněných v této práci. Autoři provedli několik experimentů jak s vlastní databází obrázků, tak i s veřejnou databází více než tří tisíc obrázků pořízených 17 různými fotoaparáty (výsledky tohoto experimentu jsou na Obr. 1). Provedli také experimenty s extrémními případy, jako například s různými velikostmi zpracovávaných snímků, nebo přiřazení fotoaparátů při práci s několika fotoaparáty stejného výrobce i modelu. Na tomto základě přijímám jejich experimenty jako dostatečně rozsáhlé ke zvolení nejvhodnější metody, kterou budu v rámci této práce implementovat.



Obr. 1 – Porovnání výkonu jednotlivých metod; Zdroj: [3, str. 8]

Na obrázku Obr. 1 je znázorněn výsledek experimentu s 3320 obrázky pořízenými 17 různými fotoaparáty. Tento experiment jsem vybral jako vzorový, protože je založen na experimentování s velkými částmi fotografických snímků ($512 \times 512\ px$) a zároveň se pracuje s velkým množstvím fotografií i fotoaparátů, takže jsou výsledky experimentu dostatečně podrobné a v adekvátním rozsahu.

Podle výsledků experimentu se jednoznačně nejlépe vede metodě osmokolí (v grafu nazvané PCAI8). Jen mírně horší výsledky v tomto experimentu podala metoda největší pravděpodobnosti (MLE), která však nedokazovala takto vysoké výsledky stabilně, proto jsem se rozhodl tuto metodu neimplementovat. Třetí nejlepší metoda, která stabilně dosahovala velmi dobré výsledky je metoda fázového spektra (PHASE), ale přestože její výsledky byly stabilně velmi dobré, byly také stabilně horší než u metody osmiokolí. Další metody si vedly podprůměrně, nebudu je tedy brát v potaz, protože metoda osmiokolí se ve všech případech vedla lépe, nebyl by důvod je zvolit.

Na základě tohoto i dalších experimentů provedených v [3] jsem se rozhodl, že budu v rámci této práce implementovat metodu osmiokolí popsanou v kapitole 4.5.

5 Filtry k získání šumu

Všechny metody pro extrakci šumu fotoaparátu jsou z velké části založeny na efektivním získání šumu ze snímků. Tohoto docílíme použitím vhodného filtru, který ze snímku fotoaparátu vyfiltruje obraz a ponechá pouze šum, nebo naopak vyfiltruje šum, který pak získáme rozdílem původního snímku a vyfiltrovaného snímku bez šumu.

5.1 Filtr nahrazení střední hodnotou

Tento filtr je velmi základní filtr k odstranění šumu ze snímku. Každý obrazový bod je nahrazen střední hodnotou bodů nacházejících se ve čtvercové oblasti $\mathcal{A}$ o velikosti strany m, kde nahrazovaný bod je středem této oblasti. [8]

100	84	107	76	99
82	111	131	128	97
141	96	132	109	136
75	89	103	104	140
123	120	85	87	150

(12)

Předpokládejme snímek (12), kde právě filtr nahrazuje bod $p(3,3)$, tedy středový bod snímku, parametr filtru velikost strany je $m = 3$. Filtr tedy získá hodnoty obrazových bodů v oblasti $\mathcal{A}$ a seřadí je dle jejich hodnoty do vektoru $v = \{89, 96, 103, 104, 109, 111, 128, 131, 132\}$, vybere jejich střední hodnotu $M = 109$ a nahradí hodnotu bodu p střední hodnotou M. Toto je postupně provedeno pro všechny body snímku. [8]

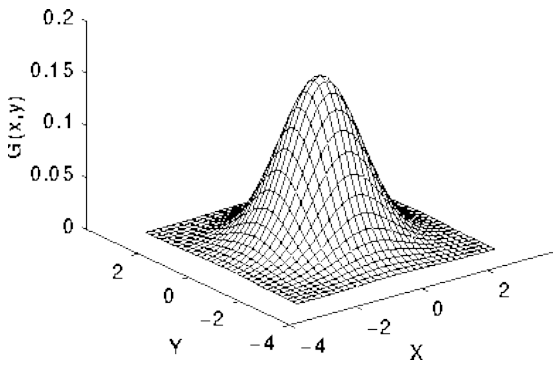
5.2 Filtr nahrazení průměrem

Tento filtr je podobný filtru nahrazení střední hodnotou, který je popsán v 5.1 s tím rozdílem, že každý obrazový bod je nahrazen průměrnou hodnotou bodů v oblasti $\mathcal{A}$ okolí obrazového bodu p, jako ve vzorci (13), kde $N = m * m$. [8]

$$\bar{p}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{p(i,j) \in \mathcal{A}} p(i, j) \tag{13}$$

5.3 Gaussovský filtr

Gaussovský filtr je založený na konvoluci obrazu se dvourozměrnou reprezentací výstupu Gaussovy funkce.



Obr. 2 – 2D Gaussova křivka, Zdroj: [1]

Protože fotografický snímek je uložen jako diskrétní signál a jeho průběh je v celočíselných hodnotách, v praxi se pracuje s maticí, která je založena na dvourozměrné Gaussově křivce, ale obsahuje celočíselné hodnoty. Okolí každého bodu $\mathcal{A}$ je tedy násobeno touto konvoluční maticí.

Pro ukázkový snímek (12) s velikostí konvoluční matice $m = 5$ je každý bod snímku nahrazen sumou hodnot bodů oblasti $\mathcal{A}$ násobenou maticí (14). [8]

$\frac{1}{273}$	$\frac{4}{273}$	$\frac{7}{273}$	$\frac{4}{273}$	$\frac{1}{273}$
$\frac{4}{273}$	$\frac{16}{273}$	$\frac{26}{273}$	$\frac{16}{273}$	$\frac{4}{273}$
$\frac{7}{273}$	$\frac{26}{273}$	$\frac{41}{273}$	$\frac{26}{273}$	$\frac{7}{273}$
$\frac{4}{273}$	$\frac{16}{273}$	$\frac{26}{273}$	$\frac{16}{273}$	$\frac{4}{273}$
$\frac{1}{273}$	$\frac{4}{273}$	$\frac{7}{273}$	$\frac{4}{273}$	$\frac{1}{273}$

(14)

5.4 Filtr založený na Wienerově vlnkovém filtru

Tento filtr je aplikován ve Fourierově pásmu. [3] Při použití tohoto filtru se předpokládá, že šum ve fotografii je stacionární bílý Gaussovský šum, který je přidán k obrazu fotografického snímku. Pomocí Wienerova filtru (15) a následně inverzní Fourierové transformace je získán snímek bez šumu. Rozdílem snímku bez šumu a snímku s šumem se získá šum ve snímku. [3] [2]

$$W(i,j) = D(i,j)\frac{\sigma_0^2}{\hat{\sigma}^2(i,j) + \sigma_0^2} \tag{15}$$

Při výpočtu však není znám parametr $\hat{\sigma}^2$, který představuje lokální odchylku signálu šumu. Na přesnosti tohoto parametru závisí výkonnost tohoto filtru, je proto třeba jej co nejpřesněji určit. Běžně se k odhadnutí tohoto parametru používá takzvaná maximální a posteriori pravděpodobnost (anglicky maximum a posteriori probability, nebo také zkráceně MAP) podle vzorce (16). [3] [2]

$$\hat{\sigma}^2(i,j) = \max\left(0, \frac{1}{m^2}\sum_{(p,q)\in N_m} D^2(p,q) - \sigma_0^2\right) \tag{16}$$

Ve vzorci (16) je m velikost okolí N_m bodu (i,j) a tato velikost je zpravidla napevno stanovena na $m = 3$, nebo se vypočtou $\hat{\sigma}^2(i,j)$ pro $m = \{3,5,7,9\}$ a poté se jako lokální odchylka přijme nejmenší z výsledků. [3] [2]

V obou rovnicích (15) a (16) je ještě parametr σ_0^2, pro který v [2] experimentálně určili, že jeho velikost nijak zvláště neovlivňuje výsledky, pokud je po celou dobu konstantní. Proto jej v práci [2] i v dalších pracích nahrazují konstantou o velikosti $\sigma_0^2 = 5$ (v práci [2]), nebo $\sigma_0^2 = 9$ (v práci [3]).

Velkou výhodou tohoto filtru je jeho rychlost a nenáročnost. Algoritmus tohoto filtru má lineární složitost v závislosti na počtu pixelů a barevných kanálů obrazu, což je také velmi výhodné vzhledem k době běhu programu založeném na tomto filtru. Jeho nenáročnost je obzvláště vhodná při použití v oblasti extrakce šumu ze snímků fotoaparátu, protože v dnešní době se pracuje s fotografickými snímky o velikosti až několika desítek megapixelů a při extrakci šumu i se stovkou snímků. [3] [2]

5.5 Filtr 3D transformace pásma

Tato nová metoda odstranění šumu z obrázků byla přijata několika metodami k extrakci šumu z fotografií. Tento filtr rozdělí 2D snímek do 3D pole částí snímku, kde každá položka 3D pole obsahuje části originálního snímku, které spolu obsahově souvisí. Následně nad těmito množinami se provede operace vlnkové transformace smrštění, čímž se potlačí šum. Jedná se o poměrně komplexní filtr, který pracuje v několika krocích.

V prvním kroku snímek rozdělí na malé skupiny, které jsou obsahové podobné. Přiřazení funguje na principu, kdy jedna část obrazu je brána jako referenční a v obraze jsou hledány podobné oblasti jako tato referenční. Každá takto podobající se oblast se přiřadí k referenční a zařadí se do 3D pole jako skupina podobných částí obrázku. [4]

V druhém kroku je na tyto skupiny aplikována vlnková transformace smrštění. Pro každou část obrázku v množině podobných obrázků jsou všechny ostatní přiřazené použity jako referenční a jsou také použity při smrštění vlnkového signálu. Proto se také tato metoda označuje jako skupinové filtrování (collaborative filtering). [4]

Ve třetím a posledním kroku se 3D pole podobných vzorků nyní již vyfiltrovaných znovu rozloží zpět do 2D snímku, čímž se efektivně poskládá vyfiltrovaný obrázek z jednotlivých částí. Většina částí 2D snímku byla v prvním kroku přiřazena hned do několika skupin, takže i při rozkladu se budou jednotlivé vyfiltrované vzorky překrývat, což vyřešíme vhodnou agregační funkcí, která těchto více vzorků spojí do jednoho. [4]

Implementační detaily této operace jsou popsány v [4] včetně iterativního algoritmu založeném na této metodě. I přes velmi positivní výsledky této filtrovací metody oproti ostatním filtrovacím metodám a i velmi positivní výsledky při použití při přiřazování fotografií k fotoaparátům, jimiž byly pořízeny, které jsou prezentovány v práci [1], není tato filtrovací metoda často používána ani v pozdějších metodách detekce šumu ve snímku kvůli její složitosti a náročnosti. [4]

6 Implementace

Cílem této práce je vytvořit aplikaci, které aplikuje poznatky popsané v dřívějších částech práce, tedy aplikaci, která dokáže získat referenční šum digitálního fotoaparátu z digitálních snímků pořízených tímto fotoaparátem a dále s ním nějak pracovat. Rozhodl jsem se vytvořit aplikaci, která z databáze obrázků fotoaparátů dokáže získat jejich referenční šumy a tyto šumy porovnat s referenčním šumem

[1] Performance comparison of denoising filters for source camera identification, A. Cortiana, V. Conotter, G. Boato, F. G. B. De Natale

dalšího testovaného snímku, jenž byl pořízen jedním z fotoaparátů z této databáze, a poté určitým způsobem zobrazí na výstupu pravděpodobnost původu tohoto snímku vůči fotoaparátům v databázi, tedy jasně určí, jakým fotoaparátem byla testovaná digitální fotografie pořízena.

Aplikaci jsem implementoval nejdříve jako konzolovou aplikaci, jejíž výhodou je především jednoduché použití, které plní svůj účel, tedy dokáže bez úprav zdrojového kódu spustit výpočty nad různými databázemi fotografií.

Poté jsem aplikaci implementoval jako modul do nástroje KNIME, který této aplikaci přidává vysokou flexibilitu a usnadňuje použití pro širokou veřejnost, poskytuje případnou distribuci, a v neposlední řadě umožňuje snadnou analýzu a manipulaci s výstupy a mezivýstupy aplikace. Více o nástroji KNIME a implementaci aplikace jako modulu se dočtete v kapitole 6.3.

6.1 Implementace metod

Jak je napsáno v kapitole 4.6, rozhodl jsem se implementovat metodu osmiokolí popsanou v kapitole 4.5, protože dosahuje v experimentálních testech oproti ostatním metodám nejlepší výsledky. Metodu jsem implementoval přesně podle postupů popsaných v kapitole 4.5 pouze s jediným rozdílem. Rozhodl jsem se, že místo Wienerova filtru použiju jiný filtr na extrakci šumu.

K tomuto jsem se rozhodl, protože implementační jazyk aplikace Java nepodporuje práci s komplexními čísly a neexistují kvalitní veřejné knihovny, které by toto přinášely spolu s podporou operací, které bych v oboru komplexních čísel potřeboval provádět. V jazyce Java nelze nijak snadno převést obrázek pomocí Fourierovy transformace do Fourierova pásma, aplikovat na obrázek Wienerův filtr a poté jej převést pomocí inverzní Fourierovy transformace zpět a neexistují ani veřejně licencované knihovny, které by toto umožňovaly. Rozsah implementace těchto knihoven je navíc příliš rozsáhlý, netroufal jsem si tedy tyto operace v komplexních číslech v rámci této práce implementovat, aniž bych nesnížil kvalitu ostatních hlavních částí práce a zachoval stejnou kvalitu i těchto metod (implementace komplexních čísel a Fourierových transformací by rozsahem přesahovaly implementaci hlavní funkční části této práce).

Dalším důležitým důvodem k tomuto rozhodnutí mě také vedl fakt, že metoda osmiokolí nestojí na použití Wienerova filtru, autoři této metody jej zvolili pouze proto, že při použití tohoto filtru dosahovali lepších výsledků oproti ostatním filtrům k odstranění šumu. Při mých experimentech se však ukázalo, že i bez použití jakéhokoliv filtru jsou výsledky přiřazení původu fotografie velmi uspokojující, proto by neměl být problém Wienerův filtr nahradit jiným filtrem k odstranění šumu.

Především tyto dva důvody mě vedly k rozhodnutí zaměnit Wienerův filtr za jiný filtr k odstranění šumu z obrázku.

Výběr náhradního filtru jsem založil na experimentech s databází fotoaparátů, kdy jsem nechal aplikaci postupně s různými filtry (popsanými v kapitole 5) a různými parametry filtrů porovnat referenční šumy jimi získané (pomocí metody osmiokolí, kde Wienerův filtr byl nahrazen daným filtrem) a nakonec jsem vybral filtr, s nímž jsem dosahoval při testech vždy pozitivních a nejlepších výsledků. Detaily experimentu naleznete v kapitole 7.22. Jako nejlepší filtr se během experimentů ukázal Gaussovský filtr, popisovaný v kapitole 5.3, s velikostí strany konvoluční matice $m = 5$. Při implementaci metody jsem tedy použil jej namísto Wienerova filtru v druhém kroku metody osmiokolí, tedy po aplikování predikce obrazu snímku.

6.2 Implementace konzolové aplikace

Aplikace je implementována v jazyce Java. Tento programovací jazyk jsem vybral, protože nástroj KNIME je napsaný v Javě a rozšíření pro něj by měly být také v Javě, již v počátku vývoje jsem věděl, že aplikace bude později integrována do KNIME jako rozšíření, naprogramoval jsem jej tedy v Javě, aby vývoj modulu do KNIME byl co nejvíce usnadněn. Výhodou tohoto programovacího jazyka je také jeho přenosnost a „multiplatformost“, tedy možnost provozu aplikace na mnoha rozličných operačních systémech a rozdílných architekturách. Dále mám s jazykem Java dobrou zkušenost a jeho syntaxe a vlastnosti přispěly k jeho zvolení. Jako menší nevýhodu je třeba zmínit pomalejší běh aplikace, protože jazyk Java je interpretovaný, tedy běží na virtuálním stroji, který vykonává posloupnost příkazů programu. Tento přístup způsobuje nižší rychlost běhu aplikace, od výběru tohoto jazyka mě to však neodradilo, protože výhody tohoto jazyka dle mého názoru převyšují nevýhody, především protože mírně nižší rychlost není v dnešní době rychlých počítačů velký problém.

Aplikace se skládá ze dvou balíků, první z nich se jmenuje `spn` a prakticky se jedná o knihovnu, které obsahuje všechny metody a postupy, tento balík je dále členěn následovně:

- `Spn` obsahuje třídu Method, která je mateřská třída všem filtračním a jiným výpočetním metodám.
- `Spn.correlations` obsahuje korelační metodu CCN, která je aplikací používána a poskytuje prostor pro budoucí rozšíření korelačních metod (obsahuje mateřskou třídu `CorrelationMethod`, která definuje vše potřebné, co by implementace případné další korelační metody měla mít).
- `Spn.filters` obsahuje všechny filtry k odstranění šumu resp. získání šumu fotoaparátu/fotografie.
- `Spn.methods` obsahuje definici metody osmiokolí, tedy definici příkazů, které je třeba provést, aby z databáze snímků byl získán referenční šum fotoaparátu.
- `Spn.support` obsahuje podpůrné třídy a metody potřebné k běhu aplikace, jako například definici třídy `LightImage`, která zapouzdřuje obrázky, s nimiž aplikace pracuje.

Všechny třídy filtrů, metod a postupů jsou potomky mateřských tříd, které definují jejich společné rozhraní a společné metody, aplikace je tedy naprogramována tak, aby bylo co nejvíce usnadněno přidání dalších filtrů, metod apod. v budoucnosti.

Druhý balík aplikace s názvem `ibp` obsahuje třídu `Application`, která je přístupovým bodem konzolové aplikace, definuje tedy třídu `main` a zajišťuje spuštění metod v balíku `spn`, vypsání výstupu do konzole, kontrolu parametrů programu a tak dále.

6.2.1 Optimalizace aplikace

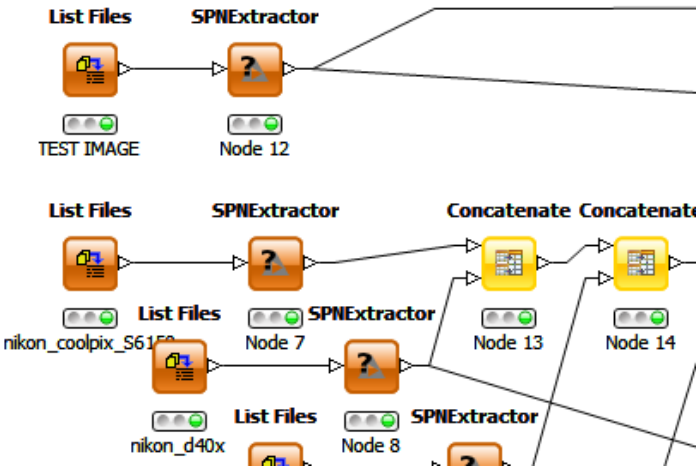
Jeden z hlavních měřitelných aspektů algoritmu je jeho rychlost, proto jsem se při vývoji aplikace soustředil na optimalizaci aplikace takovým způsobem, aby jeho běh byl pokud možno co nejrychlejší. Hlavního urychlení jsem dosáhl vytvořením vlastní třídy, která zapouzdřuje objekt obrázku, se kterým aplikace pracuje. Nejdříve jsem používal třídu `BufferedImage`, základní třídu dostupnou v knihovnách Java, ale operace nad touto třídou byly velmi pomalé. Proto jsem se rozhodl vytvořit vlastní třídu `LightImage`. Při implementaci třídy `LightImage` jsem kladl důraz na zachování jednoduchosti, implementoval jsem pouze metody, které jsem potřeboval a to tak, aby jejich použití umožňovalo co nejefektivnější a nejrychlejší manipulaci s daty obrázku. Díky nahrazení třídy `BufferedImage` třídou `LightImage` jsem dosáhl i stonásobného zrychlení v kritických částech aplikace (např. aplikování filtru na obrázek).

6.3 Implementace v nástroji KNIME

6.3.1 Nástroj KNIME

Nástroj KNIME, celým názvem Konstanz Information Miner, je Open Source nástroj založený na Eclipse. Tento nástroj slouží k dolování dat, jejich analýze, studování a následné manipulaci s poznatky. Hlavní výhodou KNIME je jeho uživatelsky přístupné rozhraní, které je navíc rozšiřitelné o moduly (kterých je k dispozici velký počet), čímž umožňuje snadnou integraci dalších postupů do tohoto nástroje. KNIME je používán vědci po celém světě kvůli jeho rychlosti a jednoduchosti, uživatelé nemusí umět programovat a dokáží vytvářet složitá analyzační schémata používající předvytvořené algoritmy.

Hlavním prostorem nástroje je plátno schématu, na které uživatelé umisťují tzv. uzly, které představují výpočetní body schématu. Každý uzel má určitý počet vstupů a výstupů, například uzel, který by řadil seznam výrazů podle abecedy, bude mít jeden vstup, na kterém bude očekávat vstupní seznam a jeden výstup, na kterém bude k dispozici seřazený seznam výrazů. Uživatel může propojovat tyto uzly, čímž vzniká schéma, které reprezentuje všechny výpočty, které se mají provést k dosažení požadovaného výsledku.



Obr. 3 – Náhled na uzly nástroje KNIME

Výhodou KNIME je nejen vysoká přístupnost uživatelům neznalým programování, ale i pro programátory je výhodné využívat KNIME, protože obstará např. paralelní výpočty a správu paměti u výpočtů, které pracují s velkými soubory dat.

6.3.2 Implementace aplikace jako modulu

Protože jsem konzolovou aplikaci již v základu rozdělil do dvou nezávislých balíků, kde jeden z nich obsahoval zapouzdření výpočetních metod a postupů do konzolové aplikace a druhý obsahoval samotné výpočetní metody, bylo pro mě snadnější vytvořit modul pro KNIME využitím tohoto balíku jako knihovny.

Protože běh aplikace lze logicky rozdělit na dvě části – extrakce šumu fotoaparátu a porovnání dvou získaných šumu korelační metodou – rozhodl jsem se implementovat mou aplikaci jako modul přidávající dva uzly do prostředí KNIME, kde každý z obou uzlů implementuje jednu z těchto logických částí.

6.3.3 Použití modulu

V příloze k aplikaci je přiložen projekt KNIME obsahující schéma využívající uzly vytvořené v rámci této práce. První uzel `SPNExtractor` očekává na vstupu seznam souborů jednoho fotoaparátu, ze kterých má získat referenční šum fotoaparátu. Tento seznam souborů lze získat například uzlem `List Files`, který je v KNIME k dipozici jako základní uzel. Výstupem uzlu `SPNExtractor` je PNG obrázek reprezentující referenční šum fotografií na vstupu uzlu. Tento šum může být předán na jeden ze dvou vstupů uzlu `SPNCorrelator`, kde první vstup tohoto uzlu očekává referenční šum testovaného obrázku a druhý vstup 1 a více referenčních šumů testovaných fotoaparátů. Referenční šumy získané uzlem `SPNExtractor` lze spojit dohromady použitím uzlu `Concatenate`, který je také výchozím uzlem dodávaným v rámci základních uzlů KNIME. Výstup uzlu `SPNCorrelator` je tabulka, kde každý řádek prezentuje korelační koeficienty každého referenčního šumu na druhém vstupu tohoto uzlu.

Protože výstupem uzlu `SPNExtractor` je PNG obrázek, lze se získaným šumem manipulovat i jinak, než mnou naprogramovanými uzly, například při instalaci rozšíření KNIME přidávající více uzlů pro práci s obrázky lze libovolným způsobem se šumem dále pracovat a analyzovat jej i bez použití uzlu `SPNCorrelator`, čímž se otevírají další možnosti zkoumání šumu fotoaparátu bez znalosti kódu mé aplikace a postupů, jakými je šum získán.

7 Testy a experimenty

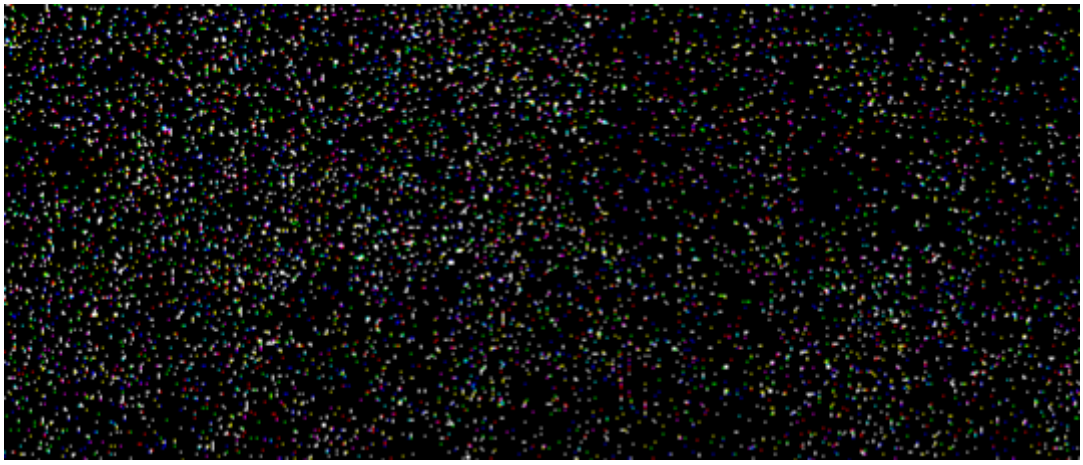
Pro testování byly použity fotografie z těchto pěti fotoaparátů:

- Nikon Coolpix S6150 – 60 fotografií.
- Nikon D40X – 70 fotografií, z toho 21 fotografií čistého modrého nebe.
- Olympus Pi Tough 8010 – 59 fotografií.
- Olympus VG-160 – 75 fotografií, z toho 22 fotografií čistého modrého nebe.
- Panasonic DMC-TZ25 – 59 fotografií.

Fotografie byly pořízeny ve stejný den ve stejných prostorech v rozsahu cca 1 hodiny, fotografie zachycují jak vnější prostory, tak i interiéry, některé fotografie jsou záměrně rozmazané, jiné záměrně přesvícené a celkově jsem se snažil při focení těchto fotografií udržovat co největší diverzitu fotografií, abych zastoupil při testování pokud možno co nejvíce případů různých fotografií a prostředí.

7.1 Analýza šumu fotoaparátu

V této kapitole krátce popíši zjištěné informace o referenčním šumu fotoaparátu. Za použití aplikace vytvořené v rámci této práce jsem získal referenční šum různých fotoaparátů. Na obrázku 4 můžete vidět příklad takového šumu, konkrétně se jedná o výřez ze šumu fotoaparátu Panasonic DMC-TZ25.



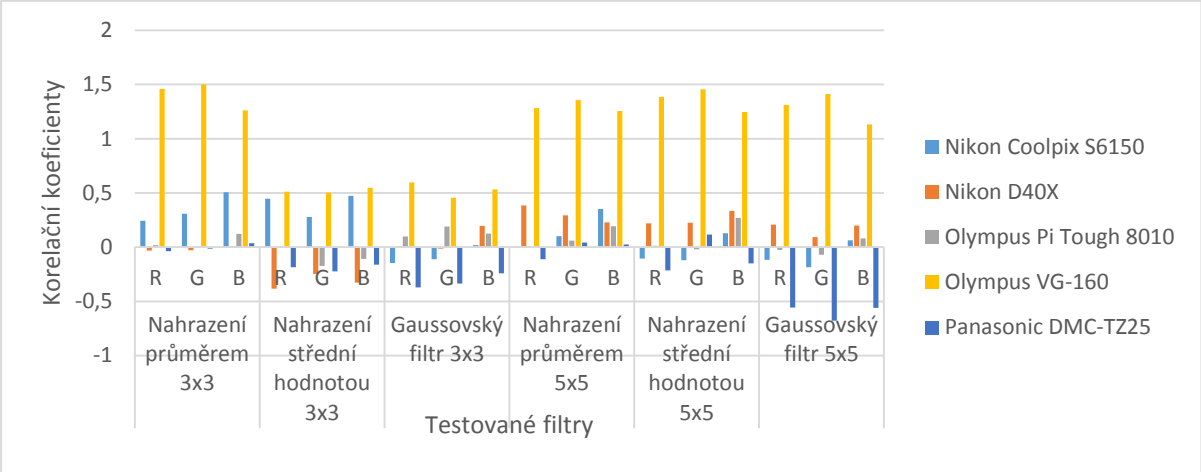
Obr. 4 – Výřez z referenčního šumu fotoaparátu Panasonic DMC-TZ25

Jak je možno vidět pouhým okem, většina obrazových bodů šumu je černá, což znamená, že má hodnotu nula. Světlé obrazové body jsou světlé proto, že na většině fotografií byly tyto obrazové body získány filtrem na získání šumu jako obrazové body šumu (s vysokou hodnotou přidaného šumu). Histogram šumu neuvádím, protože graf histogramu by obsahoval vysoké počty obrazových bodů okolo hodnot nula a 255 a byl by tedy nezajímavý a neměl by velkou informační hodnotu.

7.2 Výběr nejvhodnějšího filtru

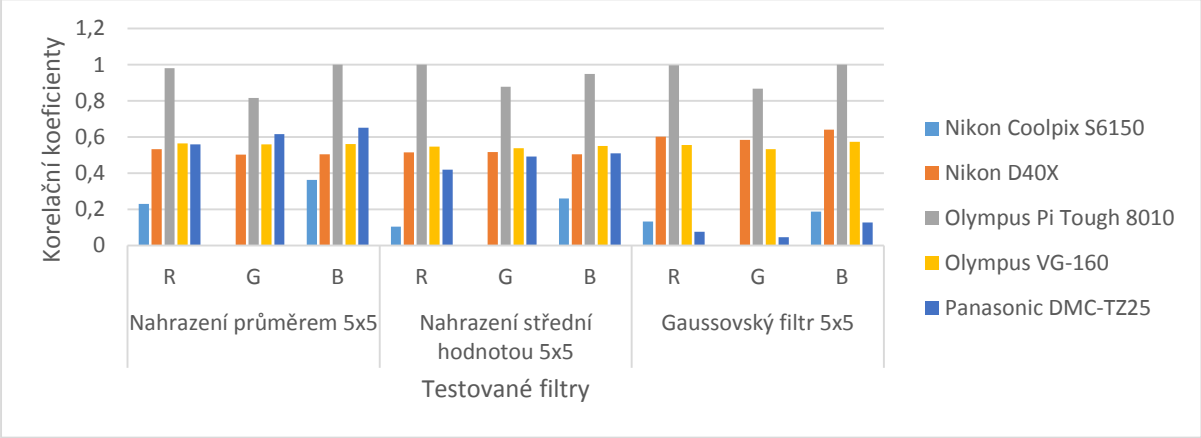
Jak je popsáno v kapitole 6.1, Wienerův filtr je v metodě osmiokolí, kterou aplikace používá, nahrazen Gaussovským filtrem. Tento filtr jsem vybral na základě testů, kdy jsem v metodě osmiokolí postupně vyměňoval Wienerův filtr za ostatní filtry k odstranění šumu (popsané v kapitole 5) a pro každou takto upravenou metodu jsem spustil výpočet referenčního šumu fotoaparátu a šumu testované fotografie a poté jsem výsledky porovnal korelační metodou CCN. Tento test jsem provedl celkem třikrát, kde každý z testů testoval fotografii pořízenou jiným fotoaparátem.

První z testů testoval původ fotografie pořízené fotoaparátem Olympus VG-160. Výsledky tohoto testu jsou zobrazeny v Grafu 1. Již na první pohled je jasné, že filtry nahrazení střední hodnotou a Gaussovský filtr o velikosti strany konvoluční matice $m = 3$ dosahují jednoznačně nejhorších výsledků. Ostatní filtry dosáhly poměrně stejně dobrých výsledků až na dvě menší výjimky – filtr nahrazení průměrem s délkou strany okolí $m = 3$ přiřadil kromě správně vybraného fotoaparátu Olympus VG-160 i vysoký koeficient fotoaparátu Nikon Coolpix S6150 zatímco ostatním fotoaparátům tato metoda přidělila jen velmi malé koeficienty. Největší dopad lze vidět v modrém barevném pásmu fotografie, kde fotoaparát Nikon získal skoro poloviční koeficient oproti Olympusu VG-160. Takto vysoký poměr koeficientů je nežádaný, obzvlášť když ostatní koeficienty zůstaly na velmi nízkých hodnotách, tento filtr jsem proto také zavrhl jako nevhodný. Druhá výjimka je u Gaussovského filtru o velikosti strany konvoluční matice $m = 5$, kde správně zvolený fotoaparát Olympus VG-160 dosahoval opravdu velmi dobrý výsledků oproti ostatním fotoaparátům a poměr koeficientů je opravdu velmi nízký – koeficienty ostatních fotoaparátů se pohybují velmi blízko nule či v záporných hodnotách.



Graf 1 – Test fotografie Olympusu VG-160 za použití různých filtrů k odstranění šumu

Tyto výsledky a mé úvahy na nich založené byly potvrzeny i v dalších dvou testech s jinými testovanými fotografiemi. V Grafu 2 můžete vidět výsledky testu, kde na svislé ose nejsou koeficienty, ale procentuální hodnota podílu koeficientu a nejvyššího koeficientu toho filtru, tedy normalizovaný výstup koeficientů v rozsahu $R \in (0; 1)$. Jak můžete vidět, všechny tři filtry si vedly poměrně dobře. Rozhodl jsem se pro Gaussovský filtr, protože koeficienty správně určeného fotoaparátu byly ve všech barevných kanálech vysoké a dostatečně vzdálené od ostatních koeficientů fotoaparátů, než například při použití filtru průměrem o délce strany okolí $m = 5$, kde například v zeleném barevném pásmu byl koeficient správného fotoaparátu velmi nízký a nebezpečně podobný ostatním koeficientům ostatních nesprávných fotoaparátů.



Graf 2 – Test fotografie Olympus Pi Tough 8010 různými filtry k odstranění šumu

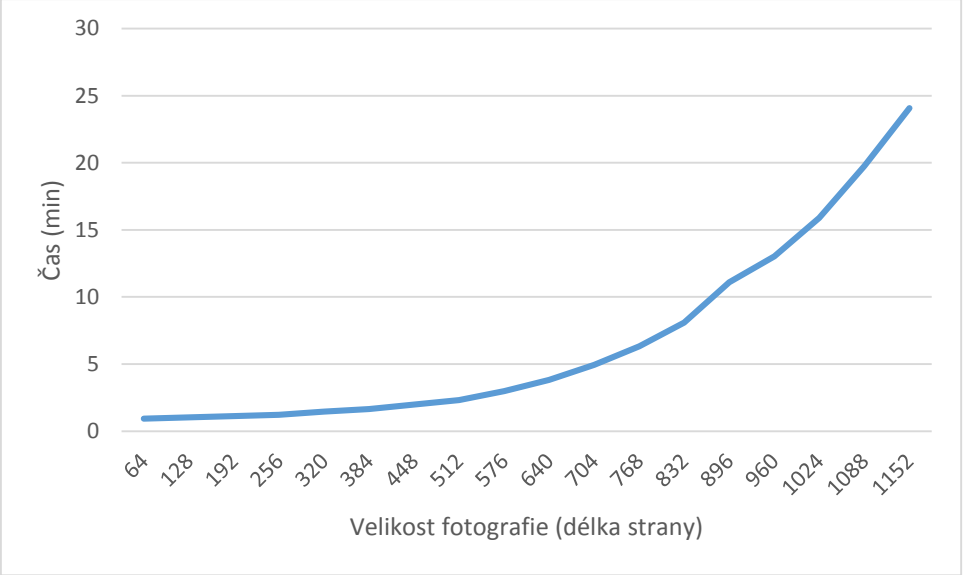
7.3 Spolehlivost podle velikosti fotografií

Cílem tohoto experimentu je zjistit rychlost a úspěšnost implementované v závislosti na velikosti porovnávaných fotografií. V rámci testu jsem testoval všech pět fotoaparátů, kdy u každého z nich jsem testoval jednu fotografii. Postupně jsem měnil velikost fotografií v databázi a zaznamenával průběh.

V grafu 3 můžete vidět výsledky experimentu pro rychlost běhu aplikace při zjištění původu fotografie kdy v databázi je 5 fotoaparátů, kde každý z nich má v databázi 59 až 75 fotografií s proměnlivou velikostí fotografie. Můžeme vidět, že závislost rychlosti na velikosti fotografií je exponenciální. Protože však není třeba extrahovat šum z celé fotografie, ale je možné fotografii rozdělit

na části, kde každá část bude zpracována samostatně, lze takto dosáhnout závislosti lineární při zachování stejné přesnosti. Šum částí fotografií pak lze buďto spojit zpět, čímž se efektivně získá šum celé fotografie, nebo se každá část šumu fotografie dá zpracovat samostatně a výsledné koeficienty poté agregovat do jediného koeficientu.

Při rozdělení fotografie na části, kdy každá část bude zpracována samostatně je však třeba vzít v úvahu, že jestli části fotografie budou menší než perioda případného periodického signálu ve fotografii, který může představovat například opakující se texturu v obrazových datech fotografie, nebo periodický signál vznikající při kompresi fotografie, korelační metoda CCN takový signál nevytěsní a výsledky budou tímto signálem zkreslené a mohou vést k nesprávnému určení původního fotoaparátu.

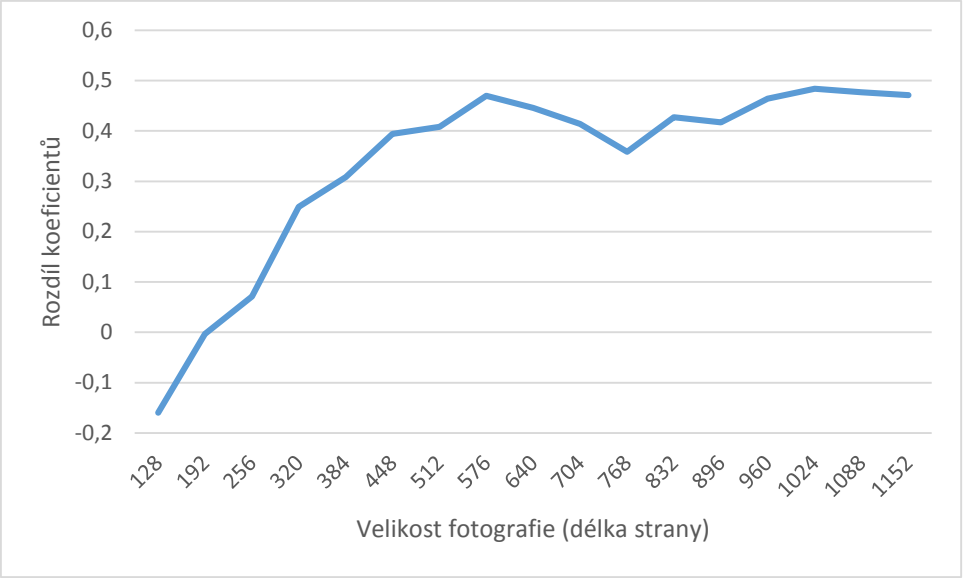


Graf 3 – Rychlost metody v závislosti na velikosti fotografií

V grafu 4 můžete vidět výsledky experimentu, kterým jsem prověřil spolehlivost aplikace při různých velikostech fotografie. Křivka v grafu představuje rozdíl nejnižšího koeficientu správné kamery napříč barevnými pásmy a nejvyššího koeficientu všech nesprávných kamer napříč barevnými pásmy. Protože tento experiment bere v potaz všechny koeficienty nezávisle na barevných pásmech fotografie, jedná se o nejhorší možný případ (protože koeficienty jsou vypočítány pro každé barevné pásmo zvlášť, je například koeficient modrého pásma u každé kamery nižší, než koeficient červeného pásma).

Z výsledků můžeme vyvodit, že aplikace není schopná rozlišit původ fotoaparátu pro fotografie s rozlišením 192x192 obrazových bodů a méně. Spolehlivost je pak velmi nízká až do rozlišení 448x448 obrazových bodů, odkud je spolehlivost poměrně stabilní na vysokých hodnotách. Je třeba brát v úvahu, že průměrně nejvyšší koeficienty jsou okolo hodnoty 1, takže pro rozdílové hodnoty 0,5 se jedná o velký rozdíl, díky kterému můžeme s jistotou říci, že fotografie opravdu byla pořízena tím daným fotoaparátem.

Na základě tohoto experimentu můžeme určit, že optimálním postupem vzhledem ke spolehlivosti a rychlosti aplikace může být zpracovávání fotografií po blocích 512x512 obrazových bodů, protože rychlost aplikace je při práci s touto velikostí fotografií v optimálním poměru ke spolehlivosti určení původu fotografie.



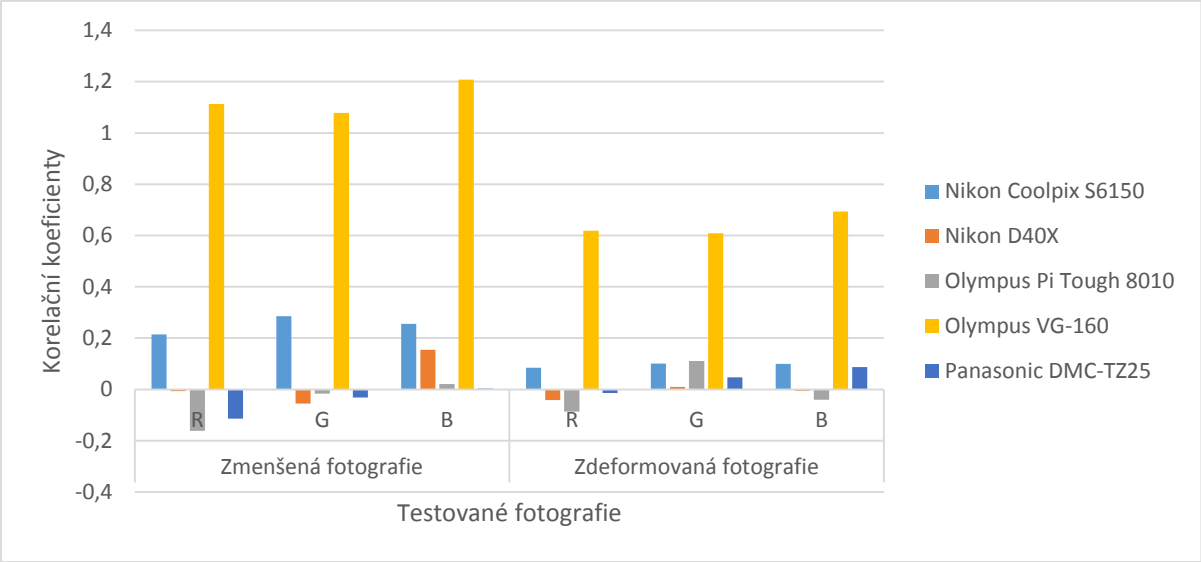
Graf 4 – Průměrný rozdíl nejnižšího správného a nejvyššího nesprávného koeficientu

7.4 Zmenšená či zdeformovaná fotografie

V dnešní době jsou značně rozšířeny mobilní aplikace a služby, které umožňují fotit fotografie, na které jsou ihned po vyfocení aplikovány různé filtry, které například způsobí, že fotografie vypadá vyfocená starým fotoaparátem. Mezi nejznámější službu tohoto typu patří například Instagram. Služba Instagram je sociální síť ke sdílení fotografií, ke které si uživatel může stáhnout aplikaci do mobilu, která automaticky upravuje fotky specifickým způsobem před umístěním do sociální sítě, konkrétně je fotografie ořezána na čtvercovou velikost, zmenšena a je na ni aplikován některý z filtrů, které způsobí rozdílný vzhled od původní fotografie.

Obr. 4 – Vlevo originální fotografie před aplikováním filtru; Vpravo fotografie zdeformovaná filtrem

Protože by mohlo být žádané ověřit původ takové fotografie příp. její pravost, rozhodl jsem se vyzkoušet, jestli taková fotografie bude správně přiřazena k fotoaparátu, kterým byla pořízena. Na obrázku 4 můžete vidět vlevo originální fotografii, pouze zmenšenou na rozlišení 1024 x 1024 obrazových bodů a vpravo stejnou fotografii, na kterou byl aplikován popisovaný filtr, čímž částečně zdeformoval fotografii. Cílem experimentu je zjistit, jestli bude správně přiřazena i zmenšená a poté i podobným filtrem zdeformovaná fotografie.



Graf 5 – Výsledky experimentu zmenšené a zdeformované fotografie

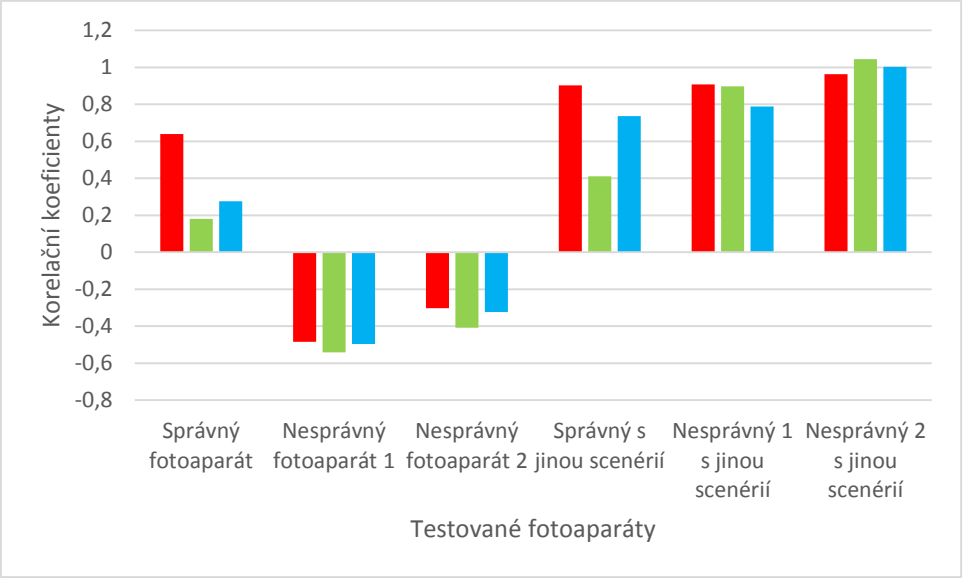
První část testu vyzkoušela, zda zmenšené fotografie zachovávají svůj šum. Zmenšil jsem všechny fotografie v databázi včetně testovaných fotografií z rozlišení 2048 x 2048 na 1024 x 1024 a poté jsem spustil aplikaci k získání výsledků, které jsou prezentovány v levé části grafu 5. Experiment dopadl dle mého očekávání velmi kladně, naprosto bez problémů lze rozlišit, jakým fotoaparátem byla fotografie pořízena. V druhé části experimentu jsem fotografii zmenšil a aplikoval jsem na ni filtr podobný takovému, jaký by byl aplikován například mobilní aplikací služby Instagram, čímž jsem kompletně napodobil proces, kterým prochází fotografie nahrána na sociální síť Instagram. Výsledky testu této zdeformované fotografie (v grafu 5 vpravo) jsou také jednoznačně správné, avšak korelační koeficienty se snížily téměř o 50%, což není problém, protože se ve většině případů snížily i korelační koeficienty ostatních fotoaparátů, takže úspěšnost přiřazení je i v případě zdeformování fotografie přibližně stejná.

7.5 Rekonstrukce scenérie

Abychom pomocí této aplikace dokázali spolehlivě určit původ fotografie, musíme mít k dispozici fotoaparát, o němž předpokládáme, že je původcem dané fotografie, nebo alespoň dostatečné množství fotografií, tedy 50 a více (čím více, tím lépe). Předpokládejme, že ani jednu z těchto dvou podmínek nesplňujeme. Uvažoval jsem, jak co nejvíce zefektivnit extrakci referenčního šumu fotoaparátu z co nejmenšího počtu fotek pořízených testovanými fotoaparáty.

Referenční šum fotoaparátu je nejvíce narušen obrazovými daty fotoaparátu, tedy scenérií, která je na fotografii zachycena. Za předpokladu, že by scenérie byla stejná na testované fotografii i na referenčních snímcích, je šum stejně porušen stejnou scenérií, tudíž je shodný. Tento experiment je založen na úvaze, že pokud fotoaparátem vyfotím stejnou scenérii, jako je na testované fotografii, potlačím tím dopad obrazových dat na extrakci šumu natolik, že aplikace dokáže spolehlivě rozpoznat původ fotografie.

Pro tento experiment jsem vyfotil stejný objekt ve venkovním prostředí pětkrát na tři různé kamery a o 14 dní později jsem na jednu z nich stejný objekt znovu jedinkrát vyfotil, tato poslední fotografie je testovanou fotografií, u níž se snažím zjistit původ. Vzhledem k tomu, že mezi pořízením prvních fotografií a testované fotografie uběhlo 14 dní, fotografie byly pořízené z jiných úhlů a při jiných světelných podmínkách. Na fotografiích využitých v experimentu je navíc zeleň, která za tu dobu trochu vyrostla a rozhodně má jinou podobu.



Graf 5 – Výsledky experimentu rekonstrukce scenérie

Jak lze vidět v grafu 5, má úvaha byla správná. V pravé části grafu jsou výsledky s pěti fotografiemi jiné než rekonstruované scenérie, aplikace nedokázala správně rozlišit, kterým fotoaparátem byla testovaná fotografie pořízena, správný fotoaparát dokonce získal nejhorší výsledek. V levé části grafu jsou výsledky, kdy na fotoaparáty bylo vyfoceno 5 fotografií rekonstruované scenérie a aplikace tentokrát jednoznačně správně určila správný fotoaparát, jímž byla testovaná fotografie pořízena.

8 Možná rozšíření

Naskýtá se široké spektrum možných rozšíření aplikace, tak aby aplikace implementovaná v rámci práce stále plnila stejný účel. Například lze implementovat zpracování částí fotografií místo celých fotografií, jak je toto popsáno v kapitole 7.3, čímž by se dosáhlo zrychlení aplikace. Je také možno aplikaci rozšířit o další metody popisované v kapitole 4 a umožnit uživateli zvolit požadovanou výpočetní metodu například spouštěcím parametrem aplikace, tímto by se sice dosáhlo více funkcí aplikace, avšak za předpokladu, že ostatní popisované metody dosahují horších výsledků, než metoda implementovaná, pravděpodobně by toto rozšíření v praxi nebylo příliš užitečné, avšak pro vědecké účely a experimenty by mohlo přijít vhod mít ostatní metody implementované a k dispozici k experimentům.

Na základě poznatků této práce lze také vytvořit aplikaci, která by s extrahovaným šumem nakládala jinak, než k přiřazení fotografie k původnímu fotoaparátu. Tady se naskýtá například možnost vytvořit aplikaci, která by ověřovala, zdali digitální fotografie byla zmanipulována, tedy určitá její část změněna, protože v takovém místě by byl porušen i šum fotografie.

Užitečné by také mohlo být, kdyby aplikace získávala šumy fotoaparátů, které by ukládala do databáze a později, když by vyvstala potřeba, mohl by se snadno šum fotografie, u níž je třeba zjistit původ, porovnat se šumy v databázi. Takto by mohla vzniknout například databáze podobná té otisku prstů, která by mohla být k dispozici Policii ČR v případě potřeby. Tato databáze by se mohla plnit například fotografiemi z veřejně dostupných internetový alb (například rajce.cz) za předpokladu, že fotografie v jednotlivých albech jsou foceny jediným fotoaparátem a jsou nezměněné (pokud alespoň většina by tuto podmínku splňovala, lze tento postup použít k naplnění databáze). Výjimečně pozměněné fotografie v albu by nebyly příliš velký problém, protože velký počet ostatních

nezměněných snímků by při průměrování šumů minimalizoval dopad změněné fotografie v albu jinak nezměněných fotografií.

9 Závěr

V rámci práce jsem prozkoumal možné metody extrakce šumu fotoaparátu, což je šum, který je nedílnou součástí každé digitální fotografie a je unikátní pro každý fotoaparát. Vybral jsem nejvhodnější metodu osmiokolí, která na základě testů dosahovala oproti ostatním metodám nejlepších výsledků. V této metodě jsem zaměnil navrhovaný Wienerův filtr za Gaussovský filtr, protože Wienerův filtr byl příliš náročný na implementaci a přinášel pouze zanedbatelné zlepšení.

Vytvořil jsem konzolovou aplikaci, která dokáže za použití této metody získat šum z testované digitální fotografie a databáze fotografií různých fotoaparátů a následně určit, který z těchto fotoaparátů je původcem testované fotografie. Aplikace je napsána v jazyce Java. Při implementaci jsem se snažil dosáhnout co nejvyšší rychlosti a objektového návrhu, který je snadno rozšiřitelný o další metody extrakce šumu fotoaparátu a různé filtry. Tuto aplikaci jsem také implementoval jako modul pro běžně používaný nástroj pro dolování a analýzu dat KNIME, který poskytuje pro implementované metody grafické uživatelské prostředí a umožňuje použití implementovaných metod bez hluboké znalosti problematiky.

S aplikací jsem provedl několik testů a experimentů, ve kterých jsem zjistil například závislost rychlosti aplikace na velikosti fotografií, její spolehlivost v závislosti na velikosti fotografií, nebo zdali zdeformované fotografie pořízené například mobilní aplikací sociální sítě Instagram lze pomocí této aplikace také přiřadit k mobilnímu telefonu, jímž byly pořízeny. Velmi pozitivní výsledky jsem také dosáhl v experimentu rekonstrukce scenérie, při kterém se mi podařilo dosáhnout nevídané úspěšnosti přiřazení fotoaparátu k fotografii při extrémně nízkém použitém počtu fotografií v databázi fotoaparátů. V tomto experimentu jsem rekonstruoval scenérii na testované fotografii a tuto jsem vyfotil na testované fotoaparáty. Za použití stejného počtu běžných snímků nebylo možné určit původ fotografie, avšak při vyfotografování rekonstruované scenérie aplikace správně jednoznačně určila původní fotoaparát.

Aplikaci by bylo možno dále rozšířit například o možnost určení pravosti obsahu fotografie na základě šumu fotografie, který by byl porušen v místě změnění obsahu fotografie. Šum fotografie by totiž byl porušen v oblasti, kde byla fotografie zmanipulována, lze tedy určit nejen, zda byla či nebyla fotografie pozměněna, ale také kde přesně byla pozměněna. Aplikaci by bylo také možno rozšířit o více metod k extrakci šumu fotoaparátu, což by sice z praktického hlediska nepřineslo zlepšení výkonnosti, ale z vědeckého hlediska by bylo vhodné mít k dispozici tyto metody implementované pro jejich možné použití v testech a experimentech a jejich další zkoumání.

Literatura

[1] *Graf gaussovy křivky* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/figs/gauss2.gif

[2] LUKÁŠ, J., J. FRIDRICH a M. GOLJAN. Digital Camera Identification From Sensor Pattern Noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*[online]. 2006, vol. 1, issue 2, s. 205-214 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1109/tifs.2006.873602.

[3] KANG, Xiangui, Jiansheng CHEN, Kerui LIN a Peng ANJIE. A context-adaptive SPN predictor for trustworthy source camera identification. *EURASIP Journal on Image and Video Processing* [online]. 2014, vol. 2014, issue 1 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-19.

[4] DABOV, K., A. FOI, V. KATKOVNIK a K. EGIAZARIAN. Image Denoising by Sparse 3-D Transform-Domain Collaborative Filtering. *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2007, vol. 16, issue 8, s. 2080-2095 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1109/tip.2007.901238.

[5] CHEN, Mo, Jessica FRIDRICH, Miroslav GOLJAN a Jan LUKÁŠ. Determining Image Origin and Integrity Using Sensor Noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* [online]. 2008, vol. 3, issue 1, s. 74-90 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1109/tifs.2007.916285.

[6] GOLJAN, Miroslav. Digital Camera Identification from Images – Estimating False Acceptance Probability. *7th International Workshop, IWDW 2008* [online]. 2008, s. 454-468 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1007/978-3-642-04438-0_38.

[7] KANG, Xiangui, Yinxiang LI, Zhenhua QU a Jiwu HUANG. Enhancing Source Camera Identification Performance With a Camera Reference Phase Sensor Pattern Noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*[online]. 2012, vol. 7, issue 2, s. 393-402 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1109/tifs.2011.2168214.

[8] FISHER, R., S. PERKINS, A. WALKER a E. WOLFART. Digital Filters. *Image Processing Learning Resources* [online]. 2004 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/filtops.htm

Seznam příloh

Příloha 1. Manuál
Příloha 2. Popis obsahu CD
Příloha 3. CD

Příloha 1. Manuál

Konzolová aplikace

Konzolová aplikace je k dispozici na přiloženém CD jako spustitelný soubor .jar. Spustit lze standardně pomocí interpretu Java:

```
java[.exe] –jar cesta\k\souboru.jar [cesta_k_testovane] [cesta_k_fotografiim …]
```

Konzolová aplikace očekává minimálně dva argumenty. První bude cesta k testované fotografii a další argumenty budou cesty ke složkám obsahující pouze fotografie ve formátu jpeg. Všechny fotografie musí mít stejné rozlišení.

Výstupem aplikace je výpis korelačních koeficientů pro každé barevné pásmo každé složky fotografií ve formátu:

```
<čas>: Coefficients for <jméno složky> are R: <korelace R> G: <kor. G> B: <kor. B>
```

Například:

```
16:41:48: Coefficients for nikon_coolpix_S6150 are R: 0,08421 G: 0,07390 B: 0,23027
```

Na závěr konzolová aplikace porovná korelační koeficienty mezi sebou:

```
Match chance for camera <jméno složky> relative to other tested cameras is <0-100>%
```

Výstup je uzavřen řádkem informujícím o největší shodě a jak vzdálená je tato shoda od ostatních fotoaparátů:

```
Best match is camera <jméno složky> with relative match <0-100>% which is <0-100>%
far from 2nd best.
```

Plugin pro KNIME

Plugin pro KNIME je automaticky nahrán při spuštění nástroje KNIME a je promítnut do nástroje přidáním příslušných uzlů do seznamu uzlů, jež jsou k dispozici.

Práce s uzlem je již stejná, jako u ostatních uzlů nástroje KNIME. Popis jednotlivých uzlů a jak s nimi pracovat je v práci v kapitole 6.3.3.

Příloha 2. Popis obsahu CD

V kořenové složce CD je následující:

- Manuál,
  - obsahuje manuál, který je také přiložen v příloze 1 této práce.
- Písemná zpráva,
  - obsahuje tuto zprávu v PDF a její zdrojové texty ve formátu docx.
- Spustitelné soubory,
  - obsahuje spustitelný jar archiv konzolové aplikace a nástroj KNIME (64bit) s předinstalovaným modulem.
- Zdrojové texty,
  - obsahuje zdrojové kódy pro konzolovou aplikaci i modul pro KNIME.