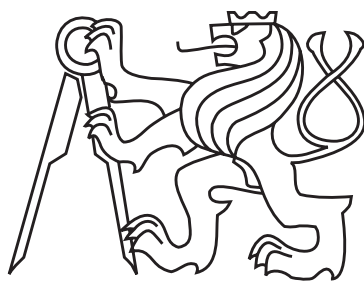


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky



Archivní filmové záznamy a jejich rekonstrukce

Bakalářská práce

Iveta Kostelníčková

Vedoucí práce: Ing. Karel Fliegel, Ph.D.

Praha 2014

Abstract

This bachelor thesis deals with image defects that affects digitized archive film material and deteriorate its original image information. At first, a list of typical image defects and its description is given. Major part of this thesis aims on study of methods for suppression of defects called blotches and line scratches, which belong among the most common ones. Several methods had been implemented in MATLAB environment and their efficiency was proved on some appropriate test sequences, together with a comparison. Those sequences, with real deterioration, were taken from database of short digitized archive films, which was created as a practical part of this thesis.

Keywords: image defects, archive film restoration, defects detection, image reconstruction, blotches, line scratches

Abstrakt

Tato práce se zabývá obrazovými artefakty, které se vyskytují v digitalizovaných archivních filmových záznamech a zkreslují původní obrazovou informaci. Nejdříve jsou zde jednotlivé artefakty popsány spolu s příčinami jejich vzniku. Velkou část práce tvoří studie metod pro potlačení jednosnímkových artefaktů a vertikálních škrábanců, které patří mezi nejčastěji se vyskytující artefakty. Vybrané metody byly implementovány v prostředí MATLAB a v rámci praktické části byla na zkreslených sekvencích ověřena jejich účinnost a provedeno jejich srovnání. Zkreslené sekvence byly čerpány z databáze krátkých úseků digitalizovaných archivních filmových záznamů, která byla vytvořena v rámci této práce.

Klíčová slova: obrazové artefakty, rekonstrukce archivních filmových záznamů, restaurace obrázku, jednosnímkové artefakty, vertikální škrábance, kompenzace pohybu

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....

.....

Iveta Kostelníčková

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu této práce Ing. Karlu Fliegelovi, PhD. za jeho čas a cenné rady.

Obsah

1	Filmový materiál	2
1.1	Obrázek na černobílém filmovém materiálu	2
1.2	Podložka filmového pásu	2
1.3	Barevný filmový materiál	4
2	Obrazové artefakty v digitalizovaném filmovém záznamu	6
2.1	Nečistoty	8
2.2	Mechanická poškození	9
2.2.1	Škrábance a odřeniny	9
2.2.2	Trhliny	10
2.2.3	Špatně ošetřený stříh	10
2.3	Artefakty vzniklé během kopírování / vyvolávání	11
2.3.1	Mnohonásobné kopírování	11
2.3.2	Kopírování poškozeného filmu	11
2.3.3	Nesprávné kopírování filmu	12
2.4	Digitalizace pomocí telecine	13
2.5	Stárnutí a nesprávné skladování filmového materiálu	14
3	Jednosnímkové artefakty	15
3.1	Pohybová kompenzace	16
3.2	Detekce jednosnímkových artefaktů	17
3.2.1	Heuristické detektory	17
3.2.2	Modelové detektory	20
3.3	Následné zpracování	20
3.4	Potlačení jednosnímkových artefaktů	21
3.4.1	Mediánové filtrování	21
3.4.2	Další možnosti rekonstrukce	23
4	Vertikální škrábance	24
4.1	Detekce vertikálních škrábanců	24
4.1.1	Model vertikálního škrábance	25
4.1.2	Prostorové detektory	26
4.1.3	Časové detektory	33
4.2	Potlačení vertikálních škrábanců	35
5	Zhodnocení implementovaných metod pro potlačení jednosnímkových artefaktů	37
5.1	Detekce jednosnímkových artefaktů	37
5.2	Potlačení jednosnímkových artefaktů	46

6	Zhodnocení implementovaných metod pro potlačení vertikálních škrábanců	51
6.1	Detekce vertikálních škrábanců	51
6.2	Potlačení vertikálních škrábanců	61
7	Databáze	64
8	Závěr	66
A	Obsah přiloženého CD	72

Úvod

Spousta cenných snímků je zaznamenána na filmovém materiálu, který ale není médiem vhodným pro dlouhodobé uchování informace. Podléhá totiž chemickému rozkladu a trvanlivost informace je tedy omezená. Za účelem uchování informace jsou filmy digitalizovány. Mohou tak navíc být snadněji zpřístupněny veřejnosti. Dnešní veřejnost je už ale zvyklá na vysokou kvalitu reprodukce, kterou digitalizovaný filmový záznam často neposkytuje. Filmový materiál je totiž velice náchylný k mechanickému poškození, které způsobí zkreslení, nebo úplnou ztrátu zaznamenané obrazové informace. Ke zkreslení informace může dojít i mnoha jinými způsoby. Důležité však je, že se všechna taková zkreslení, promítnou i do digitalizované sekvence. Říká se jim obrazové artefakty. Digitalizované filmy proto prochází procesem rekonstrukce původní obrazové informace, který zajistí lepší vjemový zážitek diváka. Mnoho artefaktů přináší vzhledem ke své povaze do digitalizovaného signálu vysoké frekvence navíc. Rekonstrukce digitalizovaných filmových záznamů proto přispívá i ke snížení šířky pásma potřebné k přenosu.

Rekonstrukci původní obrazové informace je možné provádět manuálně a v každém snímku digitalizované sekvence retušovat zkreslené oblasti. To je ale příliš náročný, pomalý a drahý způsob. Vzniklo proto několik projektů, které si kladly za cíl vyvinout automatický systém pro potlačení obrazových artefaktů (například projekt BRAVA [1] nebo PrestoSpace [2]). Některé takové systémy již existují (například systém DIAMANT [3]), ale stále jsou vyvíjeny nové efektivnější metody pro potlačení jednotlivých artefaktů.

Tato práce se zabývá problematikou obrazových artefaktů. Jedním z cílů je vytvořit přehled všech možných artefaktů, které se v digitalizovaných archivních filmových záznamech objevují. Tento přehled je náplní Kapitoly 2. Artefakty jsou rozděleny do přehledných skupin a jsou zde popsány jejich charakteristické vlastnosti. Pro pochopení příčin vzniku jednotlivých artefaktů je do práce zařazen stručný popis filmového materiálu, který je obsahem Kapitoly 1.

Dalším cílem práce je studie způsobů odstranění vybraných obrazových artefaktů z digitalizovaných filmových záznamů. Velká část práce je proto tvořena popisem různých přístupů k tomuto problému. V Kapitole 3 jsou uvedeny metody vedoucí k potlačení jednosnímkových obrazových artefaktů, které se v digitalizovaných filmových záznamech vyskytují nejčastěji. Následující Kapitola 4 se zabývá druhým často se objevujícím artefaktem, kterým jsou vertikální škrábance.

Vybrané nastudované metody byly v rámci praktické části této práce implementovány v prostředí MATLAB a testovány na zkreslených sekvencích. V Kapitole 5 jsou porovnány implementované detektory jednosnímkových artefaktů. Je ukázán vliv míry pohybu ve scéně na účinnost jednotlivých detektorů. Míra pohybu a hlavně kvalita pohybové kompenzace je důležitá i pro rekonstrukci původní obrazové informace, která je zde také řešena. Kapitola 6 představuje výsledky implementovaných metod pro detekci vertikálních škrábanců. Je zde také ukázáno, jaké výhody a nevýhody má časová filtrace prostorově detekovaných potencionálních škrábanců a detekované škrábance jsou potlačeny implementovanou metodou.

V rámci praktické části této práce má také vzniknout databáze krátkých digitalizovaných filmových záznamů s typickými obrazovými artefakty. Ta je stručně popsána v Kapitole 7.

Kapitola 1

Filmový materiál

Tato kapitola stručně popisuje strukturu filmového materiálu a způsob, jakým je na něj zaznamenána jak černobílá tak barevná obrazová informace. Plyne odtud jak snadno může dojít k jejímu zkreslení.

1.1 Obrázek na černobílém filmovém materiálu

Emulze filmového materiálu je tvořena želatinou obsahující krystaly halogenidu stříbra, které jsou citlivé na světlo. Krystaly se skládají z kladně nabitých iontů stříbra (Ag) a záporně nabitých iontů halogenu – nejčastěji bromu (Br). Fotony dopadající na krystal AgBr dodávají valenčním elektronům aniontů bromu dostatečnou energii k excitaci. Odtržené elektrony jsou pak přitaženy kationty stříbra a vzniká tak kovové stříbro. Čím více fotonů dopadá na emulzi, tím více vzniká atomů kovového stříbra. Ty tvoří tzv. latentní obraz, který je pro zviditelnění potřeba vyvolat. Vývojka dodá elektrony všem krystalům AgBr, které obsahují alespoň jeden atom kovového stříbra. Ze všech ostatních iontů stříbra v krystalu se tak také stane kovové stříbro. Takový krystal pak spolu s ostatními tvoří viditelný negativní obraz a nazývá se zrno filmu. Krystaly AgBr, které nebyly osvětleny, jsou vývojkou odstraněny [8].

Zrnitost filmu

Obrázek ve filmovém políčku je tedy tvořen zrny, která vznikají osvětlením a vyvoláním krystalu AgBr ve fotocitlivé vrstvě filmu. Fotony ale prostupují do různých vrstev emulze a dochází tak k osvětlení zrna na stejné pozici v několika vrstvách nad sebou. Hustota osvětlených krystalů AgBr záleží na množství dopadajícího světla. I při rovnoměrném osvětlení celého filmového políčka se však jen těžko osvítlí naprosto stejný počet vrstev ve všech místech políčka. Po vyvolání se zrna v jednotlivých vrstvách překrývají. Výsledkem je, že ačkoli bylo políčko rovnoměrně osvětlené (a mělo by tedy mít zrna rovnoměrně rozprostřená), obraz je tvořen náhodně hustými hloučky zrn. Tento jev je okem vnímán jako šum, který ale dodává obrazu přirozený pro film typický vzhled. Je tedy u filmového obrazu žádoucí [4].

1.2 Podložka filmového pásu

Fotocitlivá emulze je nanášena na podložce, bez níž by nešlo s filmovým materiálem manipulovat. Materiál pro výrobu podložky byl v historii ze závažných důvodů několikrát změněn. Původně byla podložka vyráběna z nitrátu celulózy, ale zejména kvůli jeho vysoké hořlavosti se přešlo na bezpečnější acetát celulózy označovaný slovem „safety“. Ten už nebyl tak hořlavý, ale podléhal

rychlému chemickému rozkladu, což bránilo archivaci záznamu. Nakonec se tedy podložka vyrábí z polyesteru.

Nitrát celulózy

Nitrát celulózy je vysoce hořlavý materiál, který je navíc chemicky nestabilní. Při nesprávných skladovacích podmínkách (vlhkost, vysoká teplota) se z podložky začínou uvolňovat kyselé nitrátové skupiny (NO_2), které spustí proces chemického rozkladu filmového materiálu [5]. Podložka začne žloutnout a deformovat se. Obrázek tvořen kovovým stříbrem se začne vybělovat. V dalších fázích podložka hnědne, emulze začne být lepkavá a jednotlivé závitky filmu namotaného na cívce od sebe nelze oddělit. Ve finální fázi procesu se celulóza promění v hnědý prášek a želatina v tekutinu. Plechovka, ve které byl film skladován, může zrezivět. Celý proces je doprovázen silným zápachem.



Obr. 1.1 – Finální fáze chemického rozkladu nitrátové podložky. Zdroj [01, 02]

Acetát celulózy

Tento materiál nesoucí značku „safety“ byl představen firmou Kodak jako bezpečná náhrada nitrátu celulózy. Při vysoké teplotě nezačne hořet, ale spíše se roztékat. Je také vysoce chemicky nestabilní. Pokud je filmový pás s podložkou z acetátu celulózy skladován v nesprávných podmínkách (nadměrná vlhkost, vysoká teplota), dojde k uvolňování kyseliny octové (CH_3CO) uvnitř podložky filmového pásu [5]. Kyselina se postupně dostává na povrch a způsobuje typický štiplavý octový zápach. Odtud název pro proces rozpadu - octový syndrom. Materiál podložky křehne a začíná se smršťovat a kroutit. V pokročilých stádiích procesu se může podložka zmenšit až o 10 %. Emulze ale zůstává v původní velikosti, což vede k jejímu prohýbání se v rámci zachování vazby mezi emulzí a podložkou. Může dojít k potrhání želatiny nesoucí obrázek. Podložka z acetátu celulózy navíc obsahuje velké množství změkčovadel, která mají za úkol snížit její hořlavost a teplotní rozměrovou nestálost. Změkčovadla se uvolňují a krystalizují na povrchu pásu, nebo se vylučují v tekuté podobě a tvoří pod emulzí bublinky plné tekutiny.

Polyesterová podložka

Chemicky nejstabilnější podložka je vyráběna z polyesteru. Zatím se neobjevily žádné zprávy o tom, že by polyesterová podložka podléhala chemickému rozkladu. Uvádí se [5], že v porovnání s acetátem celulózy by měla vydržet pětikrát až desetkrát déle při stejných podmínkách skladování (vlhkost a teplota). Polyesterová podložka je velice pevná, což je dobré proto, že se nepřetrhne. Na druhou stranu je to ale také velká nevýhoda. Pokud se totiž filmový pás s polyesterovou podložkou zasekne v kameře, pravděpodobně ji zničí.



Obr. 1.2 – Zkřehlý a zkroucený filmový pás s podložkou z acetátu celulózy trpící octovým syndromem. Zdroj [03]

1.3 Barevný filmový materiál

Bylo vynalezeno mnoho více či méně úspěšných systémů pro zachycení barevné obrazové informace na filmový materiál. Lišily se v náročnosti vyvolávacího procesu, v potřebném technickém vybavení ale především ve věrnosti podání barev. Zpočátku byly vzhledem ke složitosti systémů používány pouze dvě barvy. Jeden barevný obrázek byl vytvořen složením červené a zelené složky světla zachycených při natáčení scény. Modrá složka chyběla. Barvy v takovém obrázku zcela neodpovídaly realitě. Pro věrnější podání barev bylo potřeba přestoupit k třibarevným systémům. První dvoubarevné systémy byly aditivní. Ty však nebyly efektivní. Protože jsou zde různé barvy tvořeny sčítáním červené a zelené složky světla na plátně, musela být každá z těchto složek zaznamenána na zvláštním filmovém políčku a při promítání musely být použity filtry. Přešlo se proto na subtraktivní systémy, kde různé barvy vznikají odečítáním různých složek od bílého světla. Všechny barevné složky tak mohly být zaznamenány v několika vrstvách jediného filmového políčka. Odpadl problém se zarovnáváním jednotlivých barevných složek obrazu na plátně a protože film sám zde tvořil filtr, mohl být promítán v klasických promítacích strojích pro černobílý film.

Kinemacolor

První používaný systém pro zachycení barevné informace na filmový materiál byl *Kinemacolor* (1908) [6]. Jednalo se o aditivní dvoubarevný systém, kdy před kamerou při snímání rotoval kotouč s červeným a zeleným filtrem. Jeden barevný snímek filmu se skládal ze dvou políček černobílého filmu z nichž každé bylo exponováno přes jeden z filtrů. Při promítání před projektořem rotoval stejný kotouč jako při snímání před kamerou. Na plochu tak byly promítány dva monochromatické obrázky, které se díky setrvačnosti lidského zraku složily v jeden barevný obrázek.

Technicolor Dalším významným systémem byl Technicolor [7], který prošel čtyřmi stupni vývoje. První verze *Technicolor I* (1916) byl stále ještě aditivní systém. Světlo zachycené speciální kamerou bylo za objektivem rozděleno dělicím hranolem do dvou paprsků tak, že přes červený a zelený filtr exponovalo dvě filmová políčka najednou. Promítání vyžadovalo speciální projektor se dvěma optickými soustavami s příslušnými filtry.

Technicolor II (1919) byl první významný subtraktivní systém. Světlo zachycené kamerou bylo stejně jako v předchozím systému rozděleno na dva paprsky filtrované červeným a zeleným filtrem. Z černobílého negativu byla políčka exponována přes jednotlivé filtry kopírována na dva speciální černobílé filmové pásy, jejichž emulze (na rozdíl od emulze klasického černobílého filmu) ve vývojce ztvrdla tam, kde byl vyvolán stříbrný obraz. Zbytek emulze i stříbro bylo následně vymyto a ztvrdlá emulze tak tvořila transparentní reliéf obrázku. Takto vyvolaný pás

byl pak ponořen do barvicí lázně, která jej obarvila na barvu komplementární k barvě filtru, přes který byl obrázek exponován. Oba obarvené pozitivy byly v poslední fázi výroby slepeny podložkami k sobě do jediného filmového pásu.

Systém *Technicolor III* (1928) přinesl inovaci pouze ve způsobu spojení jednotlivých barevných pásů do finálního jednoho. To bylo prováděno tzv. hydrotypickou metodou přenášení barev. Jednotlivé barevné pozitivy byly vyrobeny stejně jako ve druhé verzi Technicoloru, následně však byly přivedeny do kontaktu se speciálním černobílým filmovým pásem, jehož emulze obsahovala chemické látky (mořidla), které udržují barviva. Obarvené pozitivy byly pod vysokým tlakem na tento pás natisknuty a barevná informace tak byla nesena pouze na jedné straně filmového pásu.

Poslední verze *Technicolor IV* (1932) již pracovala se třemi barvami. V kameře byly transportovány tři pásy černobílého negativu. Světlo zachyceno kamerou se za objektivem rozdělilo hranolem na dva paprsky. Jeden pokračoval přes zelený filtr na panchromatický filmový pás, druhý pokračoval přes purpurový filtr (propouští červenou a modrou) na bipack (dva pásy transportované jedním transportním mechanismem společně) panchromatického a ortochromatického filmového pásu. Ortochromatický pás stál světlu v cestě jako první – je citlivý na modrou a zelenou a proto se na něj exponovala modrá složka světla. Na vrchu emulze měl ještě červenou vrstvu, která zajistila, že žádné modré světlo neprojde na panchromatický materiál, na který se tak exponovala pouze červená složka světla. Výstupem kamery byly tedy tři černobílé negativy obsahující latentní obrazy červené, modré a zelené složky světla. Ty pak byly hydrotypickou metodou sloučeny v jediný filmový pás.

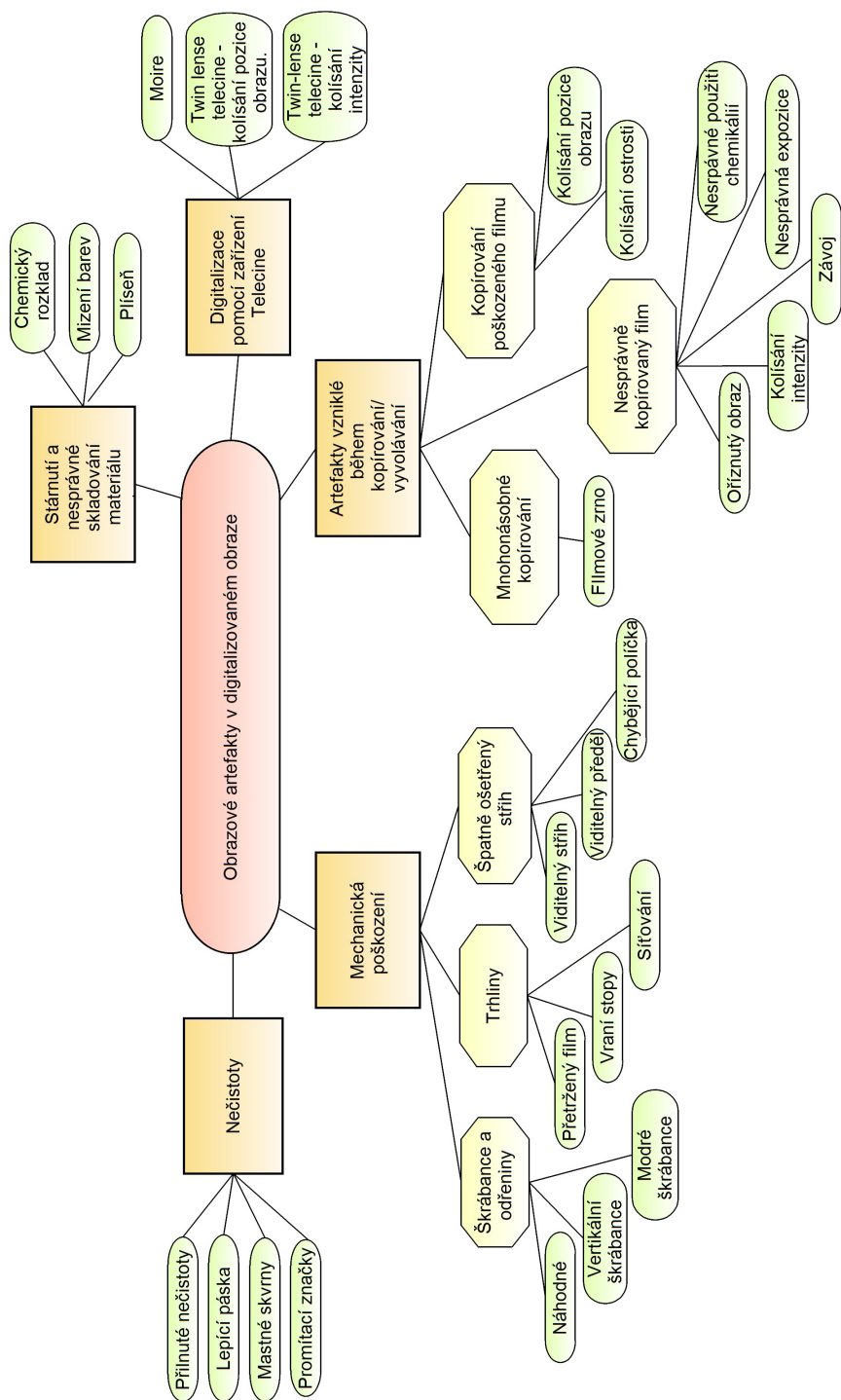
Kodachrome V roce 1935 byl vynalezen nový filmový materiál *Kodachrome*, který zaznamenával veškerou barevnou informaci na jediný třívrstvý filmový pás. Každá vrstva emulze byla citlivá na určitou část světelného spektra. Tento materiál tak nepotřeboval ke správné expozici žádné filtry a dal se proto použít v klasické kameře na černobílý film, což byla obrovská výhoda oproti Technicoloru. Emulze neobsahovala žádné barvotvorné složky [9], ty byly obsaženy až ve třech barvotvorných vývojkách, díky kterým byl ale vyvolávací proces poměrně složitý.

Eastman Kodak Všechny předchozí systémy byly inverzní, což znamená, že po expozici a vyvolání materiálu máme k dispozici pozitivní obraz. Pro získání pozitivní kopie je tedy třeba dvojnásobného kopírování. V roce 1950 byl představen nový filmový materiál *Eastman Kodak* [9], který po vyvolání zachycuje negativní obraz. Z negativu lze na rozdíl od inverzního materiálu snadno vyrobit libovolný počet kopií. Vyvolávací proces negativu je také jednodušší, než u inverzního materiálu. Barvotvorné složky jsou tentokrát obsaženy přímo v jednotlivých vrstvách emulze. Filmový materiál je po expozici vyvolán v barevné vývojce, kde dojde ke vzniku kovového stříbra, které spustí reakci vývojky a barvotvorných složek emulze. V místech, kde bylo vyvoláno kovové stříbro, vytváří barvotvorné složky barvivo příslušné komplementární barvy k barvě, na níž je daná vrstva citlivá. Následně je v bělicí lázni kovové stříbro přeměněno zpět na halogenid stříbrný, který je v ustalovači rozpuštěn. Základní princip zachycení barevné informace na tomto materiálu je používán dodnes.

Kapitola 2

Obrazové artefakty v digitalizovaném filmovém záznamu

Snímky zachycené na filmovém materiálu představují cenné národní dědictví. Film ale bohužel není ideálním médiem pro archivaci. Stárnutím materiálu dochází k postupné degradaci až úplnému vymizení obrazové informace. Filmový materiál je také náchylný k různým typům mechanického poškození. Každé další promítání filmu představuje riziko poničení materiálu. Ve snaze zabránit dalšímu poškození, jsou filmy skladovány ve filmových archivech v podmínkách, které co nejvíce zpomalují chemický rozklad materiálu. Spousta záznamů je proto nedostupná. Řešením této situace je digitalizace filmového materiálu. Digitalizovaný filmový materiál lze snadno kopírovat a zpřístupnit veřejnosti. Při digitalizaci filmového pásu se však do výsledného videa promítnou v podobě obrazových artefaktů všechny defekty, kterými byl pás díky chemickému rozkladu materiálu a neopatrné manipulaci postížen. Kapitola podává přehled těchto artefaktů.



Obr. 2.1 – Přehled obrazových artefaktů v digitalizovaném filmovém záznamu

2.1 Nečistoty

Nečistoty přilnuté k filmu překrývají obrazovou informaci, která se pod nimi nachází. Před digitalizací bývá sice film vyčištěn, některé nečistoty však již odstranit nejdou. Většina nečistot je již totiž zaznamenaná v obrazové informaci digitalizovaného pásu, protože přilnula k filmu, který byl použit k vytvoření kopie, která je k dispozici k digitalizaci.

Přilnuté nečistoty

Drobné částičky smetí (např. prach nebo vlas), které přilnou k filmovému materiálu se ve výsledném videu projevují jako oblasti snímku s chybějící obrazovou informací [21]. Mají různé tvary, různé velikosti a jsou v sekvenci snímků rozmístěny zcela náhodně. Tyto oblasti mají více méně konstantní jasovou hodnotu většinou výrazně se lišící od jasové hodnoty svého okolí. Jsou buď tmavé, nebo světlé. Jedna částice nečistoty zasáhne pouze jedno filmové políčko a typickou charakteristickou vlastností tohoto artefaktu je tedy jeho časová impulsivnost.

Lepící páska

Jednotlivé záběry filmu se spojují lepící páskou. Lepící páska může být použita také v případě opravy přetrženého filmu. V případě, že se páska od filmového pásu odchlípně, nachytají se pod ni částičky prachu, které pak překrývají obrazovou informaci. Tento artefakt je obvykle viditelný ve dvou po sobě následujících snímcích. V jednom v dolní části a ve druhém v horní části.

Mastné skvrny

Pokud filmový pás přijde do styku s olejem nebo jinou mastnotou a není okamžitě vyčištěn, mastná místa pak k sobě přitahují prach a špínu, které překrývají obrazovou informaci. Příkladem mastné skvrny může být otisk prstu (Obr. 2.2), který může zůstat na filmovém pásu, pokud se s ním manipuluje holými rukama [10].

Promítací značky

Jedná se o značky záměrně přidávané do obrazové informace, které říkají promítačům kdy mají přepnout na druhý promítací stroj s připravenou následující cívku filmu obsahující navazující část filmu tak, aby došlo k plynulému přechodu mezi záběry a divák nic nepoznal. Nejčastěji to bývají malé značky v pravém horním rohu filmového políčka. Bohužel ale existovalo mnoho standardů, což vedlo k tomu, že jakmile promítač dostal cívku do ruky, označil si ji tak, jak byl on zvyklý a proto se v některých filmových pásích vyskytuje mnohem více značek, než by bylo při jednotném standardu potřeba [10].



Obr. 2.2 – 1. Vlas přilnutý k digitalizovanému filmovému pásu. Zdroj [42]; 2. Otisk prstu. Zdroj [10]; 3. Promítací značka v pravém horním rohu. Zdroj [05]

2.2 Mechanická poškození

Mechanická poškození podobně jako nečistoty způsobují ztrátu obrazové informace. Nečistoty však znamenají, že k filmovému pásu přilnulo něco navíc, kdežto mechanická poškození znamenají spíše že část filmového materiálu chybí.

2.2.1 Škrábance a odřeniny

Náhodné škrábance a odřeniny

Při neopatrném zacházení s filmovým pásem může dojít k jeho odření o hrubou plochu [21]. Ve filmovém políčku tak vzniknou oblasti chybějící nebo zkreslené obrazové informace o různé velikosti. Nejčastějším projevem jsou drobné rušivé jiskřičky (sparkle) vyskytující se ve snímcích v hojné míře s čistě náhodným rozmístěním. Odřena ale může být i větší oblast. Kromě odření, může být filmový materiál také poškrábán ostrým předmětem. Vznikají tak oblasti se specifickými tvary škrábanců, ve kterých buď částečně, nebo kompletně chybí obrazová informace podle toho, jak hluboko škrábanec zasáhl.

Vertikální škrábance

Jde o poškrábání filmového pásu způsobené nejčastěji nečistotou usazenou v transportním mechanismu pásu v promítacím přístroji. Tato nečistota poškozuje pás kontinuálně, dokud nezmizí, proto je tímto defektem často poškozeno více po sobě jdoucích snímků a ne jen jeden. Vertikální škrábance se projevují jako tenké více či méně vertikální čáry, které se objevují v několika po sobě jdoucích snímcích. Mohou být statické, ale mohou se i pohybovat. Jsou buď světlé, nebo tmavé, podle toho jaký typ materiálu byl poškrábán. [28].

Modré vertikální škrábance

Modré vertikální linky objevující se i v moderních barevných filmech vznikají při vyvolávání filmového pásu a jsou způsobeny malými částicemi zachycenými v transportním mechanismu vyvolávacích strojů. Ve filmu se projevují podobně, jako vertikální škrábance, jen jsou většinou statické. V sekvenci snímků se tedy objevují vždy ve stejné pozici. V oblasti modrého škrábance se artefakt projevuje zvýšenou hodnotou modré, intenzita zelené se chová případ od případu, červená většinou zůstává zachována [11].



Obr. 2.3 – 1. Náhodný škrábanec; 2. Tmavý vertikální škrábanec; 3. Modrý vertikální škrábanec. Všechny obrázky jsou z [42]

2.2.2 Trhliny

Přetržený film

Může se stát, že se filmový pás zasekne v kameře, nebo v promítacím stroji a přetrhne se (ne v případě filmového pásu s podložkou z polyesteru). Obě části přetrženého filmu pak bývají slepeny dohromady průhlednou lepící páskou. Pokud slepení není provedeno šikovně, vznikne vzájemný posun obou částí a mezi jednotlivými částmi je viditelná mezera, ve které není vůbec žádná obrazová informace[16].

Vraní stopy

Vraní stopy jsou tenké trhliny vedoucí z vnitřních rohů perforačních otvorů do oblasti obrázku, které připomínají stopy vrány [10]. Jsou způsobeny poškozením perforačních otvorů v důsledku častého promítání pásu, nebo smrštění podložky filmového pásu, a tedy i perforačních otvorů, které pak nepasují na ozubená kola transportního mechanismu promítacího stroje a trhají se.

Síťování

Síťování se projevuje jako síť malých trhlinek a vrásek na emulzi filmového pásu [10]. Ty mohou být způsobeny smrštěním podložky vlivem chemického rozkladu materiálu. Další příčinou může být náhlá změna teploty filmového pásu způsobená velkým teplotním rozdílem jednotlivých lázní při vyvolávání.



Obr. 2.4 – 1. Přetržený film. Zdroj [42]; 2. Vraní stopy. Zdroj [06]; 3. Síťování. Zdroj [07]

2.2.3 Špatně ošetřený střih

Viditelný střih

Může dojít k situaci, kdy je potřeba vystříhnout část filmového pásu. Střih by měl být proveden v oblastech mezi jednotlivými filmovými políčky a části filmového pásu, které mají zůstat součástí filmu, by měly být znovu slepeny dohromady tak, aby mezi nimi nevznikla mezera. Často jsou však k vidění střihy, které byly provedeny přímo v oblasti políčka a slepení obou částí dohromady bez mezery se nepodařilo. Takový střih se pak projevuje jako vertikální čára, která neobsahuje žádnou obrazovou informaci, podobně jako trhanec.

Viditelný předěl mezi filmovými políčky

Pokud při slepování dvou částí filmového pásu vznikne velká mezera, může se stát, že se oblast filmového políčka posune vertikálně dolů vzhledem k masce promítacího přístroje a dolní oblast políčka se tak promítá do horní oblasti promítací plochy. Zároveň je tak promítán i předěl mezi

jednotlivými políčky projevující se jako tenká rovná horizontální čára rozdělující obrazovou informaci na horní a spodní část políčka.



Obr. 2.5 – 1. Viditelný stříh: horní část snímku patří ještě předchozímu záběru; 2. Viditelný předěl mezi filmovými políčky: dolní část snímku patří nahoru. Oba obrázky jsou z [42].

Chybějící políčka

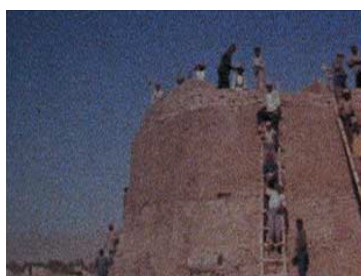
Může dojít k fatálnímu poškození části filmového pásu, která pak musí být vystřižena. Obrazová sekvence je tak ochuzena o několik snímků, výsledkem čehož je nepřirozený skok pohybu ve scéně.

2.3 Artefakty vzniklé během kopírování / vyvolávání

2.3.1 Mnohonásobné kopírování

Filmové zrno

Míra zrnitosti závisí na citlivosti filmového materiálu. Citlivější materiál obsahuje větší zrna a jeví se pak jako více zašuměný. Větší zrnitost má ale také film, který je kopií [4]. Filmový negativ je jen jeden a je to to nejcennější, co výrobci filmu mají. Z něj se vytvoří několik kopií. Ty už ale obsahují informaci s určitým zhoršením kvality. Zvětšuje se zrnitost a ztrácí se detaily. Z těchto kopií se vyrábí další distribuční kopie a zkreslení oproti originálnímu negativu roste s každou další přidanou vrstvou kopírování.



Obr. 2.6 – Filmové zrno projevující se ve snímku jako šum. Zdroj [07]

2.3.2 Kopírování poškozeného filmu

Kolísání pozice obrazu

Určitá míra kolísání pozice obrazu je přirozená už z principu posunu filmového pásu v kameře strhovacím mechanismem s maltézským křížem. Za artefakt se považuje až přidaná nestabilita

způsobená jinými důvody [12]. Nejčastější příčinou přídatné nestability je smrštění filmového pásu díky stárnutí materiálu, kdy zmenšené perforační otvory nepasují na ozubená kola transportního mechanismu. Dochází pak k určitým skluzům, které se projevují tak, že obrázek cestuje po promítací ploše.

Kolísání ostrosti

Kolísání zaostření v čase může být způsobené deformací filmového pásu [10]. Filmový pás se může prohýbat, nebo být zvlněn či zkroucen například vlivem nerovnoměrného smrštění podložky způsobeného chemickým rozkladem. Při kopírování filmu pak neleží všechny promítané body v jedné rovině a nejsou tak rovnoměrně zaostřeny.

2.3.3 Nesprávné kopírování filmu

Oříznutý obraz

K oříznutí obrazové informace filmového políčka může dojít použitím nesprávné masky při kopírování [10]. Pokud je němý film, který neobsahuje zvukovou stopu podél vnitřní strany levých perforačních otvorů, kopírován s maskou pro zvukový film, je výsledný obrázek oříznut. Masky pro zvukový film brání expozici filmového pásu v oblasti zvukové stopy a zakrývá tak část obrazové informace nesené v této oblasti v případě němého filmu.

Závoj

Nechtěná přidaná hustota zrna způsobená omylnou expozicí nevyvolaného filmu [10] se ve vyvolaném obrázku projeví jako světlý závoj.

Kolísání intenzity

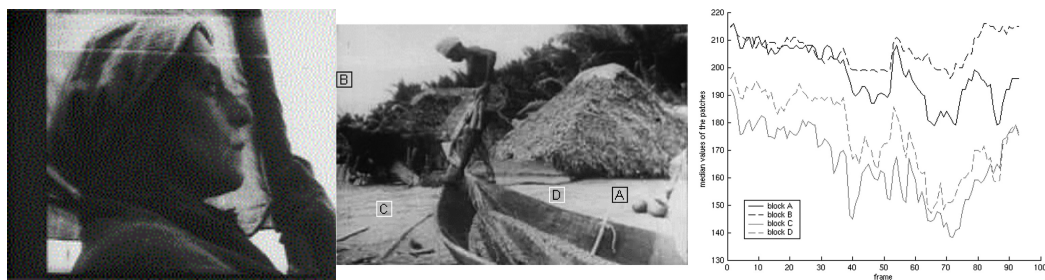
Může docházet k náhodnému kolísání intenzity obrazové sekvence s časem, které nepochází z originální scény [13]. To může být způsobeno stárnutím filmového materiálu, chemickým zpracováváním, kopírováním filmu, nebo ve starších filmech kolísáním rychlosti závěrky při natáčení. Nejde jen o globální jev, tzn. jev napadající stejnou měrou celý snímek. Intenzita může kolísat i jen v určité oblasti snímku.

Nesprávná expozice

Kopírovaný film může být v kopírovacím stroji osvětlen příliš dlouhou dobu a může tak být přeexponován. Ztrácí se tak dynamický rozsah obrázku a obrazová informace je ochuzena o detaily ve světlejších oblastech. V opačném případě, kdy je film podexponován, je celá obrazová sekvence tmavší a detaily se vytrácí z nejtmažších oblastí snímku. Políčko kopírovaného filmu může být také exponováno nerovnoměrně. Obrazová informace pak například od středu směrem k okrajům filmového políčka tmavne.

Nesprávné použití chemikálií

Nedodržení postupu při vyvolávání filmu může způsobit různá zkreslení. Nesprávné použití vývojky může například na černobílém filmu zapříčinit vznik žlutých skvrn. Ty se v kopii filmu projeví jako skvrny se změněnou intenzitou oproti původnímu obrázku [10].



Obr. 2.7 – 1. Oříznutý obrázek: levý okraj je rezervovaný pro zvukovou stopu kterou ale film neobsahuje. Zdroj [10]; 2. Kolísání intenzity: Časová závislost průměrné intenzity jednotlivých bloků A, B, C, D, které reprezentují oblasti obrazové sekvence, v nichž nedochází k pohybu ani změně osvětlení a měly by tak mít tuto závislost konstantní. Zdroj [13]

2.4 Digitalizace pomocí telecine

Kolísání pozice obrazu díky Twin-lense telecine

Pokud byl film digitalizován tak, že se rovnou snímal prokládaný obraz, bylo zapotřebí dvouočkové verze přístroje zvaného telecine. Paprsek vycházející ze zdroje světla byl zaostřen systémem čoček na filmové políčko tak, že průměr paprsku odpovídal velikosti pixelu v digitalizovaném filmu. Paprsek (flying spot) skenoval políčko ze strany na stranu po řádcích, které se obměňovaly kontinuálním pohybem filmového pásu před zdrojem světla. Filmovým pásem filtrovaný paprsek pak dopadal na fotocitlivý prvek (fotonásobič nebo CCD snímač). Dvouočková verze Telecine měla pro snímání prokládaného obrazu dvě oddělené optické cesty pro sudé a liché půlsnímků. Pokud nebyly oblasti představující jednotlivé půlsnímků na filmovém políčku správně zarovnané a zaostřeny, výsledné video trpělo horizontálním i vertikálním chvěním o polovině snímkové frekvence dané televizní normy. Tímto artefaktem je napaden celý záznam. [14]

Kolísání intenzity díky Twin-lense telecine

Dalším obrazovým artefaktem způsobeným digitalizací filmového materiálu dvouočkovou verzí zařízení telecine je nepříjemné blikání obrazu způsobené nestejnou intenzitou paprsků snímajících sudé a liché půlsnímků. Blikat může také jen určitá oblast snímku. Příčinou toho může být nečistota stojící v optické cestě paprsku pro jeden z půlsnímků.

Moire

Dokud neexistoval magnetický záznam, bylo jedinou možností, jak zaznamenat televizní vysílání, snímání televizní obrazovky na film zařízením zvaným Kinescope. Televize měla svůj rastr, který byl zaznamenaný na film. Při digitalizaci takového záznamu v Telecine pak dochází k prosvěcování filmu paprskem, který filmové políčko skenuje ze strany na stranu po řádcích. Úhel pod kterým paprsek skenuje filmové políčko se ale může lišit od úhlu řádků rastru televize, která byla snímána na film. Dochází pak k superpozici dvou rastrů pod různým úhlem – nelineární kombinace, která ve výsledném superponovaném obrázku způsobí efekt zvaný moire, který se projevuje jako periodický obrazec přičtený k původnímu obrázku [15].



Obr. 2.8 – Moire. Zdroj [07]

2.5 Stárnutí a nesprávné skladování filmového materiálu

Mizení barev

Mizení barev je problém způsobený barevnou nestálostí filmového materiálu. Barviva se z barevného filmového materiálu začínají po nějaké době vytrácet a hustota barevného záznamu v jednotlivých vrstvách se snižuje. Barevná stálost závisí na technologii filmového materiálu a na skladovacích podmínkách. Nejrychleji většinou mizí azurová vrstva (která filtruje červenou složku světla), následovaná žlutou vrstvou (filtrující modrou složku světla). V pokročilých fázích zůstane v emulzi zachována jen purpurová vrstva. Obrázek je pak silně zbarven do červena, barevná informace ostatních složek světla je téměř ztracena. Barevný závoj není v celém snímku rovnoměrný, proto oprava tohoto defektu není snadná [17].

Plíseň

Zejména při skladování filmového pásu v nesprávných skladovacích podmínkách je možné napadení materiálu plísní. Plíseň napadá želatinu, což se v obrázku projevuje nejružněji strukturovanými obrazci, které se snímek od snímku liší [10].

Chemický rozklad

Chemický rozklad filmového materiálu není vyloženě artefaktem, ale je příčinou mnoha z nich. Například kolísání intenzity, ostroty či pozice obrázku nebo síťování.



Obr. 2.9 – 1. Mizení barev: Barevně degradované snímky filmu. Zdroj [07, 17]; 2. Plíseň: Světlý flek v dolní části obrázku je způsoben plísní, která napadla film. Zdroj [10]

Tím končí přehled typických obrazových artefaktů. Každý artefakt má své charakteristické vlastnosti, na základě kterých může být v digitalizované sekvenci automaticky rozpoznán a potlačen. Metodami odstranění vybraných běžně se vyskytujících artefaktů se zabývají následující dvě kapitoly.

Kapitola 3

Jednosnímkové artefakty

Mezi nejčastěji se vyskytující obrazové artefakty v digitalizovaných filmových záznamech patří beze sporu přilnuté nečistoty, a vzhledem ke slabé odolnosti filmového materiálu vůči mechanickému poškození také odřeniny a náhodné škrábance. Při sledování snímku působí velice rušivě a proto jejich potlačení vede k výraznému zvýšení kvality vjemového zážitku diváka. Tato kapitola popisuje metody, jakými lze potlačení těchto artefaktů dosáhnout.

Jednosnímkové artefakty, zkráceně skvrny (z anglického blotches), vyskytující se v digitalizované obrazové sekvenci jsou způsobené přilnutím nečistoty (vlas, prach, smítka. . .) ke skenovanému nebo kopírovanému filmovému pásu, nebo také odchlípnutím či odřením části želatiny v důsledku mechanického poškození filmového materiálu. Mohou to být ale třeba také projevy plísně. Obecně lze mezi tyto artefakty počítat jakoukoliv oblast zkreslené obrazové informace, která se vyskytuje pouze v jednom snímku sekvence, ať už je příčina jejího vzniku jakákoliv. Jejich nejcharakterističtější vlastností je tedy jejich časová impulsivnost. Těžko se jedna a ta samá skvrna objeví na stejném místě ve dvou po sobě jdoucích snímcích. Výskyt skvrn v sekvenci je zcela náhodný. Skvrny mají různý tvar i různou velikost. Většinou se jedná o souvislé oblasti s velmi podobnou jasovou hodnotou (bývají buď světlé nebo tmavé), která se výrazně liší od jasové hodnoty obrazových bodů v okolí skvrny. Obrazová informace v oblasti skvrn většinou zcela chybí, v případě že se nejedná o poloprůhledné skvrny, jejichž výskyt ale není běžný. Z toho vyplývá model snímku s tímto artefaktem [21]

$$G(i, j) = (1 - b(i, j)) \cdot I(i, j) - b(i, j) \cdot c(i, j) \quad (3.1)$$

$I(i, j)$čistá obrazová informace na pozici (i,j)

$b(i, j)$binární mapa výskytu skvrn, 1 označuje pozice (i,j) ve kterých se vyskytuje skvrna

$c(i, j)$jasová hodnota skvrny na pozici (i,j)

Detektory jednosnímkových artefaktů jsou často založené na tom, že porovnávají jasové hodnoty obrazových bodů v současném, předchozím a následujícím snímku a vyhledávají tak časové nespojitosti jasové hodnoty. Je ale vhodné porovnávat obrazové body, které v jednotlivých snímcích představují tu samou část toho samého objektu scény. Protože se ale objekty ve scéně pohybují, mění se užitečná informace podél pohybové trajektorie daného objektu. Je proto nutné tuto trajektorii určit a pohyb kompenzovat. Pak leží užitečná informace na té samé pozici v několika po sobě jdoucích snímcích. Pohybová kompenzace je důležitá také pro rekonstrukci obrázku, kdy se často jasové hodnoty zkreslených pixelů interpolují pomocí předchozího a následujícího snímku.

3.1 Pohybová kompenzace

Obrazová informace se v sekvenci snímků patřících do jednoho záběru obvykle nemění příliš rapidně. Jeden záběr je často tvořen snímky těch samých objektů, které jen mění svou pozici, velikost, nebo rotují. Často využívaný model pohybové kompenzované sekvence předpokládá, že se v jednom záběru vyskytují ty samé objekty a změna obrazové informace v po sobě jdoucích snímcích je způsobena pouze posunem těchto objektů [21]. Podle tohoto modelu se tedy snímek skládá z obrazové informace obsažené v předchozím snímku, která je v současném snímku jen jinak rozmístěna

$$I_n(x) = I_{n-1}(x + d_{n,n-1}) \quad (3.2)$$

xpozice (i,j) snímku

I_n, I_{n-1}snímek n a jemu předcházející snímek $n-1$

$d_{n,n-1}$pohybový vektor mapující pozici pixelu x ze snímku $n-1$ na jeho pozici ve snímku n

Kompenzace pohybu ve snímku n tedy spočívá v nalezení pohybových vektorů $d_{n,n-1}$ pro všechny pixely snímku. Nejčastěji využívanou metodou je *Block Matching*. Snímek $n-1$ pro jehož pixely jsou pohybové vektory určovány, je rozdělen na bloky určité velikosti. Každý blok je porovnáván s bloky o stejné velikosti ležící v určité vyhledávací oblasti kolem středové pozice bloku v následujícím snímku n . Pozice toho bloku ze snímku n , který se nejméně liší od referenčního bloku ve snímku $n-1$, pro nějž je pohybový vektor určován, je označena za novou pozici referenčního bloku v následujícím snímku. Rozdíl pozice referenčního bloku ve snímku $n-1$ a nalezeného bloku ve snímku n je odhadnutý pohybový vektor $d_{n,n-1}$.

Mírou odlišnosti referenčního a porovnávaného bloku může být průměrný absolutní rozdíl (Mean Absolute Difference)

$$MAD(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j |I_n(i, j) - I_{n+1}(i + k, j + l)| \quad (3.3)$$

M, Nrozměry bloku

I_n, I_{n+1}snímek n a po něm následující snímek $n+1$

i, jsouřadnice obrazových bodů uvnitř bloků

k, lpotencionální pohybový vektor

Vektor (k, l) určující vzdálenost porovnávaného bloku od referenčního bloku, který bude minimalizovat průměrný absolutní rozdíl jasových hodnot pixelů uvnitř obou bloků, bude zvolen za výsledný pohybový vektor daného referenčního bloku. Tato metoda kompenzace pohybu je odolná vůči šumu díky průměrování jasových hodnot pixelů v bloku. Selhává ale při změnách osvětlení scény, nebo také v sekvencích, které trpí kolísáním intenzity.

Při takzvaném vyčerpávajícím hledání (Exhaustive Search), je referenční blok porovnáván se všemi možnými bloky uvnitř vyhledávací oblasti. To je výpočetně náročný proces, avšak přináší nejspolehlivější výsledky. Existují i zjednodušené metody, kdy je referenční blok porovnáván jen s několika určitými bloky v následujícím snímku. Výpočetní náročnost klesá, ovšem stejně tak spolehlivost odhadnutých pohybových vektorů.

Často využívanou metodou, která snižuje výpočetní nároky a přesto poskytuje dobré výsledky, je hierarchický odhad pohybových vektorů [18], který využívá snímků se sníženým rozlišením. Z každého ze dvou po sobě následujících snímků je vytvořeno několik úrovní obrázku, kde má každá předchozí úroveň dvakrát menší rozlišení. Hrubý odhad pohybového vektoru je nejdříve určen pomocí vyčerpávajícího vyhledávání na úrovních obrázků s nejmenším rozlišením. I když se jedná o vyčerpávající vyhledávání, není to díky malému rozlišení obrázku výpočetně náročný krok. Takto odhadnutý vektor následně postupuje na další úroveň obrázků s vyšším rozlišením (musí tedy být zvětšen), kde je zpřesněn porovnáváním referenčního bloku s

bloky z malé vyhledávací oblasti se středem určeným pohybovým vektorem z předchozí úrovně. S rostoucím rozlišením může být vyhledávací úroveň zmenšována, protože se jedná už jen o upřesnění odhadu pohybového vektoru z předchozího kroku.

Problémem při kompenzaci pohybu, je takzvaný patologický pohyb [19], což je pohyb, který nemůže být algoritmem pro hledání pohybových vektorů odhadnut. Jedná se například o náhlé zmizení nebo objevení objektu, velmi rychlý pohyb překračující meze vyhledávací oblasti, rozostření objektu, nebo třeba složitý pohyb typu mávání křídel letícího ptáka. V oblastech, kde objekty vykazují známky patologického pohybu jsou odhadnuté pohybové vektory nespolehlivé. Špatně odhadnuté pohybové vektory se promítanou na výkonu detektorů i při restauraci zkreslené obrazové sekvence.

3.2 Detekce jednosnímkových artefaktů

Většina metod pro detekci jednosnímkových artefaktů využívá informaci ze dvou časově sousedících snímků prohledávaného obrázku. Hledá podle ní časové nespojitosti jasové hodnoty, které jsou typickou vlastností těchto artefaktů. Metody, které pracují s pohybově kompenzovanými snímky jsou výpočetně náročnější, ale také účinnější, než metody, které pohyb ignorují. Existují také metody, které vůbec nevyužívají informace z jiných snímků a vyhledávají jednosnímkové artefakty na základě jejich prostorových charakteristik. Ty ale označí za skvrny mnoho oblastí obrázku, které vůbec zkresleny nejsou.

Detektory mohou být rozděleny na heuristické a modelové. Heuristické jsou takové, které fungují na základě zkušenosti, nebo obecného předpokladu a konkrétní hodnoty využívané v algoritmu jsou určeny metodou pokusu a omylu. Modelové detektory se snaží vytvořit model normálně se vyvíjející obrazové sekvence a za skvrny označí všechny oblasti, které tomuto modelu neodpovídají. Tyto metody sice mohou dosahovat lepších výsledků, za to jsou ale složitě implementovatelné.

3.2.1 Heuristické detektory

Tyto detektory (Storey, SDI, ROD a sROD) zkoumají každý pixel obrázku zvlášť a zjišťují, zda je jeho jasová hodnota v čase spojitá. K tomu využívají jasové hodnoty vybraných pixelů v časově sousedících snímcích. Storey a SDI patří mezi čisté časové detektory. V žádném ze snímků nevyužívají informaci pixelů z prostorového okolí. ROD a sROD využívají informaci více pixelů z časově sousedících snímků, díky čemuž se stávají odolnější vůči nepřesné pohybové kompenzaci. SDI, ROD a sROD využívají pohybově kompenzovaných snímků, které zvýší přesnost detekce za cenu vyšší výpočetní náročnosti.

Storey

První metodu na detekci skvrn vynalezl Storey již v roce 1985 pro BBC [30]. Výstup z Telecine byl elektronicky prozkoumáván, zda neobsahuje jednosnímkové defekty. Vzhledem k náročnosti elektronické implementace pohybové kompenzace obrazové sekvence v té době, počítal Storey se sekvencí, ve které se objekty nepohybují. Navíc předpokládal znalost úrovně šumu v sekvenci. Skutečnou nezkraslenou obrazovou informaci ve zkoumaném snímku pak odhaduje na základě interpolace obrazové informace ze dvou časově sousedících snímků. Pokud se jasová hodnota ve zkoumaném snímku liší od odhadu o větší hodnotu, než jaká může být způsobena šumem, je detekována skvrna. Je tedy určen rozdíl mezi jasnem zkoumaného pixelu a pixelu na stejné pozici v předchozím snímku. Stejně tak rozdíl mezi jasnem zkoumaného pixelu a pixelu na stejné pozici ve snímku následujícím. Jsou-li oba tyto rozdíly větší, než určitá prahová hodnota a zároveň je znaménko obou rozdílů stejné, je jasová hodnota zkoumaného pixelu považována za časově nespojitou a pixel je tak označen za součást skvrny.

$$\delta_{n,n-1} = I_{n-1}(i, j) - I_n(i, j)$$

$$\delta_{n,n+1} = I_{n+1}(i, j) - I_n(i, j)$$

$$B_{St}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } |\delta_{n,n-1}| > T_1, |\delta_{n,n+1}| > T_1, \text{sgn}(\delta_{n,n-1}) = \text{sgn}(\delta_{n,n+1}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.4)$$

I_{n-1}, I_n, I_{n+1} předchozí, současný a následující snímek
 (i, j) zkoumaná pozice snímku
 T_1 prahová hodnota určena mírou šumu

Tato metoda ovšem selhává v případě pohybu scény, který způsobí velkou zpětnou i dopřednou změnu jasové hodnoty a může tak být nesprávně detekován jako skvrna.

Spike detection index - SDIa, SDIp

Tato jednoduchá metoda [21] je podobná metodě, kterou navrhl Storey. Je však výkonnější, protože pracuje s pohybově kompenzovanými snímky. Opět porovnává jasovou hodnotu zkoumaného obrazového bodu v současném snímku s jasnou odpovídajícího obrazového bodu v tentokrát pohybově kompenzovaném předchozím a následujícím snímku. Je určena druhá mocnina rozdílů jasových hodnot v dopředném i zpětném směru.

$$SDIa(i, j) = \min((I_n(i, j) - I_{n-1,mc}(i, j))^2, (I_n(i, j) - I_{n+1,mc}(i, j))^2) \quad (3.5)$$

I_n zkoumaný snímek
 $I_{n-1,mc}, I_{n+1,mc}$ pohybově kompenzovaný předchozí a následující snímek
 i, j zkoumaná pozice snímku

Pokud menší z nich přesahuje danou prahovou hodnotu, pak je detekována časová nespojitost jasové hodnoty, tedy skvrna.

$$B_{SDIa}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } SDIa > T \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.6)$$

Malá hodnota T znamená větší citlivost detektoru. Spolu s většinou skvrn v sekvenci bude ale detekováno mnoho falešných detekcí díky šumu a patologickému pohybu. Velká hodnota T zmenší počet falešných detekcí, ale zároveň nebudou detekovány všechny skvrny.

SDIp je rozšíření SDIa přidáním další omezující podmínky pro detekci skvrn. Znaménka obou rozdílů $I_n(i, j) - I_{n-1,mc}(i, j)$ a $I_n(i, j) - I_{n+1,mc}(i, j)$ musí být stejná. V případě správné kompenzace pohybu by měly mít obrazové body $I_{n-1,mc}(i, j)$ a $I_{n+1,mc}(i, j)$ velmi podobnou jasovou hodnotu, takže i znaménka rozdílů jasových hodnot těchto bodů s bodem náležícím skvrně by měla být stejná. Spolehlivost této metody závisí na spolehlivosti kompenzace pohybu. Pokud je pohyb odhadnut nesprávně, což se v oblasti skvrn může snadno stát, pak není jasová hodnota zkoumaného pixelu porovnávána s odpovídajícími pixely a výsledek není zaručen.

Schallauer

P. Schallauer vymyslel další podobnou časovou metodu pro detekci skvrn [20]. Využívá dvou prahových hodnot T_1 a T_2 . Obrazový bod je detekován jako součást skvrny, pokud absolutní hodnota rozdílů jasové hodnoty tohoto obrazového bodu a stejného bodu v předchozím a následujícím pohybově kompenzovaném snímku přesahuje první prahovou hodnotu T_1 a zároveň absolutní hodnota rozdílů jasových hodnot tohoto obrazového bodu v předchozím a následujícím pohybově kompenzovaném snímku nepřesahuje druhou prahovou hodnotu T_2 , kde $T_2 < T_1$. Stejně jako u SDI spolehlivost závisí na správné kompenzaci pohybu.

ROD - Rank Ordered Differencies

Tato velice úspěšná metoda [21] je odolnější vůči nesprávné pohybové kompenzaci než SDI, protože využívá více informace ze sousedních snímků. Zda zkoumaný pixel náleží skvrně, rozhoduje na základě toho, jak moc jeho jasová hodnota vybočuje z intervalu stanoveného jasovými hodnotami pixelů z jeho časoprostorového okolí. Pracuje se šesti referenčními pixely s jasovými hodnotami P_i , $i=1,2 \dots 6$, které jsou vzaty z pohybově kompenzovaného předchozího a následujícího snímku ze sloupců 3×1 , jejichž střed je zarovnán se zkoumaným pixelem.

Jasové hodnoty referenčních pixelů jsou seřazeny od nejmenší po největší tak, že $P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5 < P_6$. Dále jsou určeny tři rozhodující hodnoty ROD_l , $l = 1, 2, 3$. Je-li jasová hodnota P_x zkoumaného pixelu menší nebo rovna mediánu jasových hodnot referenčních pixelů $\frac{P_3+P_4}{2}$, jsou třemi rozhodujícími hodnotami rozdíly jasu P_x zkoumaného pixelu s jasy prvních tří referenčních pixelů s nejmenší jasovou hodnotou P_1, P_2, P_3 . V opačném případě rozhoduje, jak moc se liší jas zkoumaného pixelu P_x od jasu tří pixelů s největší jasovou hodnotou P_4, P_5, P_6 .

$$ROD_l = \begin{cases} |P_l - P_x| & \text{if } P_x \leq \frac{P_3+P_4}{2} \\ |P_x - P_{7-l}| & \text{if } P_x > \frac{P_3+P_4}{2} \end{cases}, l = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

Je-li jas zkoumaného pixelu P_x menší, než jas alespoň jednoho z prvních tří referenčních pixelů seřazených podle jasové hodnoty, nebo větší, než jas alespoň jednoho z posledních tří podle jasu seřazených referenčních pixelů, pak bude alespoň jedna hodnota ROD_l větší než nula. A bude-li tento rozdíl větší, než určitá prahová hodnota, pak je zkoumaný pixel s jasovou hodnotou P_x označen za součást skvrny.

$$B_{ROD} = \begin{cases} 1 & \text{if } ROD_l > T_l \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad 0 \leq T_1 \leq T_2 \leq T_3 \quad \text{a } l = 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

Nepříjemnost metody spočívá v nastavení tří prahových hodnot.

sROD

Van Roosmalen později zjednodušil detektor ROD tak, že nechal prahové hodnoty T_1 a T_2 přiblížit se k nekonečnu [28]. Tím pádem je možné ROD_2 a ROD_3 zcela vypustit.

$$SROD = \max(0, |P_1 - P_x|, |P_x - P_6|) \quad (3.9)$$

Je-li tedy jasová hodnota zkoumaného pixelu P_x světlejší, než nejsvětlejší referenční pixel, nebo tmavší, než nejtmaší referenční pixel, je SROD větší než nula a přesahuje-li danou prahovou hodnotu T_1 , je označen za součást skvrny.

Morfologické filtrování

K detekci skvrn může být použito také měkké morfologické filtrování obrázku [25], které je rozšířením binárního morfologického filtrování popsaného v Sekci 4.1. Otevření je použito pro eliminaci světlých skvrn (lokálních maxim), zavření pro odstranění tmavých skvrn (lokálních minim). Výstupem detektoru je pak rozdíl filtrovaného a původního obrázku. Je použito dvou různých strukturních elementů. Nejdříve je snímek filtrován pomocí strukturního elementu tvořeného nulami, který ale označí za skvrny spoustu oblastí obrázku, které mají stejné vlastnosti jako skvrny. Následně je proto použit druhý strukturní element, který odhalí pouze ty struktury obrázku, které mají velikou absolutní hodnotu gradientu na svých hranách, což je vlastnost pro skvrny typická. Použitím pouze jednoho z těchto elementů by nebylo dosaženo tak dobrých

výsledků. Tato metoda detekuje skvrny pouze na základě informace z jediného snímku. Nevýhodou takové metody je proto velké množství falešných detekcí, způsobené běžným výskytem struktur ve snímku, které mají stejné prostorové charakteristické vlastnosti, jako skvrny. Výhodou je, že se nemusí počítat pohybová kompenzace. Úspěšnější prostorová metoda ale byla představena v [27]. K detekci využívá *vlňkové transformace*.

3.2.2 Modelové detektory

3D-AR

Jedním z detektorů využívajících model obrazové sekvence je *3D-AR* detektor [21], který předpokládá, že vývoj jasové hodnoty každého pixelu v sekvenci snímků, odpovídá 3D autoregresnímu modelu, kdy jas každého pixelu může být modelován lineární kombinací jasových hodnot pixelů z jeho okolí, ať už prostorového, nebo v případě 3D modelu, časového, tzn. z pohybově kompenzovaných časově sousedících snímků.

$$I_n(i, j) = \sum_{k=1}^P a_k I_{n+q_k^t}(i + q_k^i, j + q_k^j) + e(i, j) \quad (3.10)$$

$I_n(i, j)$jasová hodnota pixelu (i,j) ve snímku n

a_kP koeficientů modelu definující lineární kombinaci

q_k^i, q_k^j, q_k^tčasové a prostorové souřadnice jednotlivých pixelů pomocí nichž je modelován jas pixelu (i,j)

$e(i, j)$chyba predikce

Koeficienty modelu mohou být zjištěny statisticky a pak už je snadné detekovat skvrnu jako oblast, jejíž jasové hodnoty se výrazně liší od predikovaných hodnot. Tedy jako oblast, pro kterou je chyba predikce vyšší, než daná prahová hodnota.

MRF

Dalším detektorem, který využívá modelu obrazové sekvence je detektor založený na *modelu MRF - Markov Random Field*. Tento detektor je však těžko implementovatelný a jeho popis přesahuje rámec této práce. Navíc podle testování v [26] nemá výrazně lepší výsledky než SDIa.

3.3 Následné zpracování

Žádný detektor není neomylný a podá větší či menší množství falešných detekcí. Některé skvrny zas nemusí být detekovány kompletně. Od kvality detekce se odvíjí také kvalita rekonstrukce. Ta závisí i na pohybových vektorech, které v oblastech skvrn nemohou být odhadnuty přesně. Byly proto navrženy různé metody následného zpracování výsledku detektoru, které přinášejí lepší kvalitu potlačení skvrn.

Vylepšení výsledku detekce

Vylepšení výsledku detekce lze dosáhnout dalším zpracováváním výstupu detektoru například tak, jak navrhl van Roosmalen [28]. Pixely uvnitř jedné skvrny mají velmi podobnou jasovou hodnotu. Je proto stanoveno kritérium určující, zda jsou si jasy dvou pixelů podobné (např. je-li jejich absolutní rozdíl menší než dvojnásobek standardní odchylky šumu ve snímku) a při následném zpracování jsou pixely označené detektorem, které leží vedle sebe a zároveň splňují toto kritérium sloučeny do jedné skvrny. Následující fáze pak pracují s jednotlivými skvrnami a ne s jednotlivými pixely.

V dalším kroku van Roosmalen popisuje pravděpodobnostní metodu, pomocí níž jsou označeny ty potencionální skvrny, u nichž je velká pravděpodobnost, že vznikly kvůli šumu.

Některé skvrny nemusí být v detekční fázi detekovány kompletně. To Roosmalen napravuje opětovným použitím detektoru. Ten je ale tentokrát nastavený na maximální citlivost, která sice způsobí spoustu falešných detekcí, ale také detekci dříve neodhalených částí některých skvrn. Výsledky této detekce jsou také pospojovány do jednotlivých skvrn a následně jsou vyloučeny ty skvrny, z nichž se ani jediný pixel neobjevuje mezi skvrnami detekovanými detektorem s nižší citlivostí.

V posledním kroku zpracování je na výsledné skvrny aplikována podmíněná dilatace, která za součást každé skvrny označí pixely, které s ní sousedí a zároveň mají podobnou jasovou hodnotu. Tím dojde k detekování těch částí skvrn, které z nějakého důvodu nebyly detekovány ani jedním nastavením detektoru.

Oprava pole pohybových vektorů

Vzhledem k tomu, že skvrny v obrazové sekvenci také představují patologický pohyb, nejsou pohybové vektory odhadnuté ze zkreslených dat spolehlivé. V detekční fázi to obvykle nevádí, ale při rekonstrukci původní obrazové informace, kdy pohybové vektory určují, z jakých oblastí předchozího a následujícího snímku se bude informace interpolovat, je to již problém. Zlepšení výsledků rekonstrukce degradovaného snímku může být dosaženo opravou pole pohybových vektorů v oblasti skvrn. Oprava může být provedena na základě předpokladu že, původní obrazová informace v oblasti skvrny souvisí s informací v pixelech z časoprostorového okolí skvrny a tedy že by se pixely v oblasti skvrny měly hýbat podobně jako pixely v jejím okolí. Jinými slovy řečeno, že by pole pohybových vektorů mělo být hladké. Metod pro nalezení vhodnějších pohybových vektorů je mnoho [28]. Mohou být získány lineární interpolací z okolních vektorů. Lze také využít mediánového filtrování pole pohybových vektorů. Další možností je znovu odhadnout pohybové vektory na základě obrazové informace podél hran bloku. Tedy znovu vyhledávat zkreslený blok v určité vyhledávací oblasti v následujícím i předchozím snímku, ale tentokrát neuvažovat data skvrny ani v referenčním, ani v porovnávaném bloku. Nejméně náročným způsobem je nastavit pohybové vektory v oblasti skvrny na nulu a předpokládat, že tak dojde k menší chybě interpolace, než při zachování původních vektorů.

3.4 Potlačení jednosnímkových artefaktů

3.4.1 Mediánové filtrování

Mediánové filtry lze úspěšně využít k eliminaci oblastí obrázku jejichž jasová hodnota vyčnívá nad jasovými hodnotami okolí. Mohou tedy úspěšně potlačit jednosnímkové artefakty. Původně byly mediánové filtry aplikovány na celý rekonstruovaný snímek. Vstupními hodnotami filtrů byly jasové hodnoty právě rekonstruovaného pixelu a několika pixelů z jeho prostorového okolí. Kromě skvrn tak ale došlo i k odstranění detailů obrázku. Navíc tak nešlo potlačit větší skvrny, protože velikost skvrny, která může být prostorovým mediánovým filtrem odstraněna, závisí na velikosti okna filtru. Mediánové filtry byly proto rozšířeny do časové oblasti. Vstupními hodnotami jsou tak i jasové hodnoty pixelů v předchozím a následujícím snímku. Kvalitu rekonstrukce výrazně zvyšuje také použití pohybově kompenzovaných snímků. Aby nedocházelo ke zkreslení čisté obrazové informace, začaly být mediánové filtry používány pouze v oblastech, které byly v předchozím kroku označeny za skvrny některým z výše popsaných detektorů. Mediánové interpolátory mohou být použity i jako detektory skvrn. Skvrna je ve zkoumaném pixelu jednoduše detekována v případě, že se jeho jasová hodnota výrazně liší od výstupní hodnoty mediánového filtru se středem v tomto pixelu.

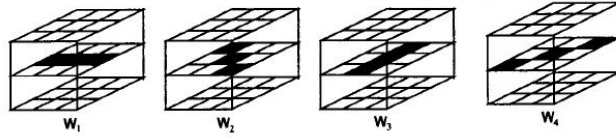
MM filtr - Multilevel Median Filter

Nieminen a Heinonen [23] navrhli víceúrovňový mediánový filtr pro odstranění drobných prostorově impulsivních struktur. Odhad hodnoty každého obrazového bodu je určen dvouúrovňovým mediánovým filtrem. Nejdříve jsou použity čtyři mediánové filtry s různými topologiemi W_n (viz Obr. 3.1), které zajišťují zachování hran ve snímku. Jejich střed je ve zkoumaném obrazovém bodu x' . Výstupem těchto filtrů je medián jasových hodnot obrazových bodů, které do filtru vstupují (na obrázku vyznačeny černě).

$$z_n = \text{med}(W_n) \quad n=1, 2, 3, 4$$

Výstupem celého filtru je pak medián výstupů těchto čtyř filtrů a hodnoty středového obrazového bodu.

$$x_{MML} = \text{med}(z_1, z_2, z_3, z_4, x')$$



Obr. 3.1 – Masky dílčích filtrů MM filtru. Zdroj [24]

LUM filtr - Lower-Upper-Middle Filter

LUM filtr [22] se dá využít k vyhlazení nebo zostření obrázku, tedy i k potlačení prostorově impulsivních struktur. Okno filtru se středem ve zkoumaném obrazovém bodu x' o poloměru r určí $N = (2r+1)^2$ obrazových bodů, které do filtru vstupují. Všechny N hodnot je seřazeno podle jasové hodnoty od nejmenší po největší. Pak jsou určeny nižší a vyšší statistické hodnoty x_L a x_U . Hodnota x_L je určena jako medián hodnoty zkoumaného pixelu a hodnot dvou vybraných pixelů z první poloviny podle jasu seřazené množiny vstupujících pixelů.

$$x_L = \text{med}(x_{(k)}, x', x_{(l)}) \quad (3.11)$$

Hodnota x_U je určena jako medián hodnoty zkoumaného pixelu a hodnot dvou určitých pixelů z druhé poloviny podle jasu seřazené množiny vstupujících pixelů.

$$x_U = \text{med}(x_{(N-k+1)}, x', x_{(N-l+1)}) \quad (3.12)$$

Pozice pixelů $x_{(k)}, x_{(l)}, x_{(N-k+1)}, x_{(N-l+1)}$ je určena dvěma parametry k a l . $1 \leq k \leq l \leq \frac{N+1}{2}$. Výstupem LUM filtru je buď x_U nebo x_L , podle toho, která tato hodnota je blíže hodnotě zkoumaného pixelu x' .

$$x_{LUM} = \begin{cases} x_L & \text{if } x' \leq \frac{(x_L + x_U)}{2} \\ x_U & \text{else} \end{cases} \quad (3.13)$$

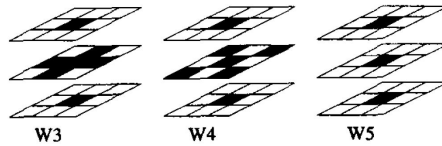
Pokud je hodnota pixelu x' menší, než hodnota k -tého pixelu, je výstupem filtru hodnota k -tého pixelu. Pokud hodnota x' překročí hodnotu x_{N-k+1} , pak je výstupem tato hodnota. Parametr k tedy určuje jakési hranice filtru. Pokud je hodnota x' mezi x_l a x_{N-l+1} , pak je výstupem ta z těchto dvou hodnot, ke které je hodnota x' blíže. A pokud x' leží mezi x_k a x_l anebo mezi x_{N-l+1} a x_{N-k+1} , pak zůstává hodnota x' nezměněna.

LUM filtr v časové oblasti

LUM filtr rozšířený do časové oblasti má tentokrát trojrozměrné okno, kde třetí rozměr je časový. V [24] je užíváno okna o rozměrech $3 \times 3 \times 3$, tedy rozšířeného na dva časově sousedící snímky. Nastavuje se zde pouze jediný parametr k , $k \leq 14$, protože $N=27$. Výstupem x_{LUMt} je pak medián hodnot pixelů x' , $x_{(k)}$ a $x_{(N-k+1)}$, kde spodní index určuje pořadí v množině pixelů vstupujících do filtru seřazených podle jasové hodnoty.

ML3D filtr

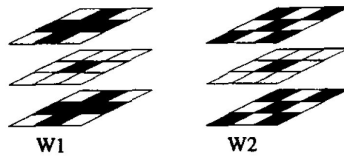
Alp navrhl ML3D filtr [21], který je rozšířením MM filtru do časové oblasti. Nevyužívá pohybově kompenzovaných snímků. Výstupem ML3D filtru je medián výstupních hodnot tří dílčích filtrů W3, W4 a W5 na Obr. 3.2. Výstupní hodnotou dvou z těchto filtrů je medián jasových hodnot sedmi pixelů, z nichž pět leží v současném snímku. Bude-li všech pět těchto pixelů náležet skvrně, bude výstupem dvou ze tří dílčích filtrů a tedy i výstupem celého ML3D filtru jasová hodnota skvrny. ML3D filtr tedy nedokáže opravit velké skvrny.



Obr. 3.2 – Dílčí mediánové filtry filtru ML3D. Zdroj [29]

ML3Dex filtr

Kokaram [21] později rozšířil ML3D filtr o další dva dílčí filtry (3.3), které dávají větší váhu informaci ze sousedních snímků. Do těchto dvou nových filtrů vstupuje jedenáct jasových hodnot, z nichž pouze jedna náleží pixelu v současném snímku. Při opravě velké skvrny, jejíž součástí budou všechny pixely ze současného snímku vstupující do dílčích filtrů, nebude výstup těchto dvou přidávaných filtrů ani filtru W5 na Obr. 3.2 skvrnou ovlivněn. Mediánem výstupních hodnot celkem pěti dílčích filtrů tedy nebude jasová hodnota skvrny. Kokaram navíc filtr aplikuje na pohybově kompenzované snímky a jen na ty oblasti, ve kterých byly skvrny v předchozím kroku detekovány.



Obr. 3.3 – Masky dvou přidávaných dílčích filtrů filtru ML3Dex. Zdroj [29]

3.4.2 Další možnosti rekonstrukce

Dalšími možnostmi rekonstrukce jsou *3D AR interpolátor*, který interpoluje data na základě 3D AR modelu popsaného výše, nebo *MRF Markov Random Field interpolátor* který je založen na jiném modelu, jehož pochopení je nad rámec mých dosavadních znalostí. Oba jsou popsány v [29].

Kapitola 4

Vertikální škrábance

Dalším často se vyskytujícím artefaktem v digitalizovaných filmových záznamech jsou vertikální škrábance. Na rozdíl od jednosnímkových artefaktů dokáže jediný vertikální škrábanec zkreslit klidně i celý filmový záznam. Odstranění vertikálních škrábanců tedy také vede k výraznému zlepšení kvality reprodukce filmových záznamů. Tato kapitola se věnuje různým přístupům k tomuto problému.

Vertikální škrábance se v digitalizovaném obraze projevují jako tenké dlouhé vertikální čáry. Jde o poškrábání filmového pásu, způsobené nečistotou usazenou v transportním mechanismu pásu v promítacím přístroji. Tato nečistota odírá filmový pás, dokud nezmizí, díky čemuž se tento artefakt objevuje v několika po sobě jdoucích snímcích často téměř ve stejné poloze. Poloha však nemusí být ve všech snímcích stejná, protože se škrábance mohou pohybovat [31]. Jejich šířka v digitalizovaném obraze závisí na rozlišení, ale udává se od 3 do 10 pixelů [28]. Vertikální škrábance jsou buď světlé, nebo tmavé, podle toho jaký typ materiálu byl poškrábán. Poničený negativ je častější variantou, proto se častěji setkáváme s tmavými škrábanci [39]. Dají se rozdělit na principiální a sekundární škrábance [31]. Principiální jsou ty, které zabírají více než 90 % výšky obrázku. Dále existují škrábance, které jsou osamocené a v jejich blízkém okolí se žádný další škrábanec nevyskytuje, ale také skupinové, které mají sousedící škrábanec tak blízko, že může být problém oba detekovat [28].

4.1 Detekce vertikálních škrábanců

Detekce vertikálních škrábanců není jednoduchá ze dvou důvodů. Prvním důvodem je, že škrábance mohou setrvávat ve stejné poloze několik po sobě jdoucích snímků a nelze je proto detekovat čistě v časové oblasti, jako jednosnímkové artefakty. K nalezení škrábanců je zapotřebí prostorové detekční metody, která je vyhledává pouze na základě informací obsažených v jediném snímku sekvence. V obrázku se ale mohou vyskytovat vertikální struktury se stejnými vlastnostmi, jaké mají škrábance (šířka, barva, délka, orientace..) a přitom být součástí scény zachycené na obrázku. Prostorové metody nedokážou tyto struktury odlišit od skutečných škrábanců a to je druhý problém, který znesnadňuje přesnou detekci. Proto je vhodné kombinovat prostorové detekční metody s časovými metodami. Nejdříve jsou prostorovou metodou detekovány potenciální škrábance na základě jejich charakteristických prostorových vlastností, následně jsou časovou detekční metodou vyloučeny ty, které neodpovídají časovým charakteristikám vertikálních škrábanců.

4.1.1 Model vertikálního škrábance

Prvním, kdo se zabýval detekcí vertikálních škrábanců, byl A. C. Kokaram. Zkonstruoval model, který popisuje profil (horizontální průběh jasových hodnot) vertikálního škrábance tlumenou sinusoidou [26].

$$L_n(i, j) = b_p k_p^{|i - (m_p j + c_p)|} \cos\left(\frac{3\pi|i - (m_p j + c_p)|}{2\omega_r}\right) \quad (4.1)$$

poznačení škrábance
 i, jhorizontální a vertikální souřadnice bodu obrázku
 c_phorizontální souřadnice středu škrábance
 m_psklon škrábance
 w_pšířka škrábance
 b_pjasová hodnota škrábance v c_p (amplituda)
 k_pútlum sinusoidy závislý na vzdálenosti od c_p

Profil škrábance má svou extrémní jasovou hodnotu ve svém středu. Na okrajích škrábance však lze pozorovat výrazné postranní laloky, s jasnem opačného charakteru. Světlé na okrajích tmavého a tmavé na okrajích světlého. Později Kokaram společně s V. Bruni a D. Vitulanem dokázal, že je tento jev důsledkem difrakce světla na poškrábaném filmovém materiálu [27]. Na základě toho zkonstruovali vylepšený fyzikální model popisující profil vertikálního škrábance pomocí funkce sinc^2 . Celý obrázek je zde reprezentován svým horizontálním jasovým průřezem (tzv. cross-section) který je tvořen vertikálním průměrem jasových hodnot v jednotlivých sloupcích obrázku, s tím, že je odečten lokální jasový průměr z určitého okolí daného sloupce. Tím pádem je profil škrábance závislý jen na horizontálních souřadnicích i .

$$L_n(|i - c_p|) = (b_p - a) \text{sinc}^2\left(\frac{|i - c_p|}{m}\right) + a \quad (4.2)$$

ihorizontální souřadnice cross-section
 c_phorizontální souřadnice pozice středu škrábance
 b_pjasová hodnota profilu škrábance v c_p
 mšířka škrábance
 aprůměr jasových hodnot postranních laloků škrábance

Kokaram ve svém původním modelu popisoval škrábance jako čistě aditivní zkreslení, které vlastně není obrazovou informací, ale pouze ji zakrývá. Jeho původní model zkresleného obrázku vypadá následovně.

$$I(\vec{x}) = G(\vec{x}) + \sum_{p=0}^{P-1} L_n^{(p)}(\vec{x} - \vec{x}_p) + e(\vec{x}) \quad (4.3)$$

$\vec{x} = (i, j)$ pozice v obrázku.
 Iobrázek zkreslený P vertikálními škrábanci
 Gnezkreslený obrázek
 $\vec{x}_p = (c_p, 0)$střed p -tého škrábance
 $e(\vec{x})$aditivní Gaussovský šum

V. Bruni a D. Vitulano později Kokaramův původní model upřesnili [28]. Již neuvažují o škrábanci jako o čistě aditivním artefaktu, což je správný postoj, protože nezkreslená obrazová informace se již v poškrábaných oblastech obrázku nenalézá. Popisují tedy model, podle něž lze vertikální škrábance považovat za částečně chybějící obrazovou informaci. Definují parametr γ , který je určen poměrem jasu škrábance a jasu jeho okolí a pomocí útlumového koeficientu k_p z 4.1 závislém na vzdálenosti od středu škrábance, rozděluje informaci zkresleného obrázku na čistou obrazovou informaci a informaci škrábance. Čím výraznější je škrábanec vůči okolí, tím menší je γ a tím větší má informace škrábance podíl na informaci zkresleného obrázku, který je zde opět reprezentován svým horizontálním jasovým průřezem.

$$I(i) = (1 - (1 - \gamma) k_p^{|i-c_p|}) G'(i) + (1 - \gamma) k_p^{|i-c_p|} L_n^{(p)'}(i) \quad (4.4)$$

Ihorizontální jasový průřez poškrábaného obrázku
 G'horizontální jasový průřez nezkresleného obrázku společně s šumem
 k_ptlumicí koeficient
 $L_n^{(p)'}$upravený model profilu p -tého škrábance ((4.7))
 c_pstřed škrábance
 γpoměr jasu škrábance a jasu v jeho okolí normovaný do intervalu $\langle 0, 1 \rangle$

4.1.2 Prostorové detektory

Kokaramova metoda

Kokaram spolu se svým modelem představil také prostorovou metodu pro detekci vertikálních škrábanců, která tohoto modelu využívá [26]. Obrázek je nejdříve vertikálně podvzorkován a filtrován vertikálně orientovaným Gaussovým filtrem pro odstranění šumu. Následně je na tento obrázek použit horizontálně orientovaný mediánový filtr, který eliminuje horizontální impulsivní změny jasu. Na základě velikosti rozdílů $e(i, j)$ takto filtrovaného snímku a jeho původní verze, je vytvořen binární obrázek $B(i, j)$, ve kterém jedničky označují polohy impulsivních horizontálních jasových změn, které jsou jednou z charakteristických vlastností vertikálních škrábanců.

$$e(i, j) = G_s(i, j) - M_s(i, j) \quad (4.5)$$

$G_s(i, j)$Gaussovsky filtrovaný obrázek
 $M_s(i, j)$ Mediánově filtrovaný $G_s(i, j)$

$$B(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } e(i, j) > e_{trsh} \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (4.6)$$

e_{trsh} prahová hodnota

V binárním obrazu $B(i, j)$ jsou pomocí Houghovy transformace [30] nalezeny přímky, jejichž orientace odpovídá orientaci vertikálních škrábanců.

Houghova transformace detekuje geometrické objekty v binárním obrázku na základě jejich parametrů. Každý objekt v obrazovém prostoru I je v tzv. Houghově prostoru H reprezentován bodem, jehož souřadnice odpovídají parametrům daného objektu. V případě detekce přímek je H dvojrozměrný. Jedním rozměrem je směrnice přímky m a druhým rozměrem její průsečík s horizontální osou obrázku c . Přímka $p = m_0 i + c_0$ nacházející se v I je tedy v H reprezentována bodem (m_0, c_0) . Všechny body (i, j) v I , které leží na této přímce, se v H zobrazí jako přímky procházející bodem (m_0, c_0) . Jinými slovy řečeno počet přímek, které v H prochází bodem (m_0, c_0) , odpovídá počtu bodů v I náležících přímce, s těmito parametry. V H jsou tak nalezeny všechny body, kterými prochází určitý minimální počet přímek a jim odpovídající parametry jsou označeny za parametry přímek, které se v I vyskytují. Pokud je vyhledávání omezeno na určitou část Houghova prostoru představující přímky s vertikální orientací, může být Houghova transformace použita k detekci potencionálních škrábanců. Nevýhodou jejího použití je nutnost externího nastavení několika prahových hodnot. Minimálně prahové hodnoty stanovující minimální počet bodů, které mohou vytvořit přímku.

Profil jednotlivých detekovaných přímek, určen jejich horizontálním jasovým průřezem, je následně porovnáván s modelem profilu vertikálního škrábance 4.1 z hlediska pravděpodobnosti a statistiky. Pokud profil dané přímky odpovídá modelu, je tato přímka označena za vertikální škrábanec. Nevýhodou této metody je citlivost na ručně nastavené prahové hodnoty pro Houghovu transformaci. Také předpokládá, že jsou škrábance skutečně rovné a zabírají většinu výšky obrázku.

Automatická metoda Bruni a Vitulana

Bruni a Vitulano spolu s upřesněním Kokaramova modelu představili automatickou metodu [28] pro detekci vertikálních škrábanců, kde jedinou ručně nastavovanou hodnotu představuje binární volba barvy škrábance (světlý-tmavý).

Oproti Kokaramově původnímu modelu profilu škrábance 4.1 je zde obrázek o rozměrech $M \times N$ již od začátku reprezentován svým horizontálním jasovým průřezem $x(n)$ ($n \in [1, N]$) a útlum k_p je použit k rozdělení informace zkresleného obrázku na čistou obrazovou informaci a informaci škrábanců 4.4. Tím pádem se model zjednodušuje na sinusoidu.

$$L_n^{(p)'}(i) = b_p \cos\left(\frac{3\pi|i - c_p|}{2\omega_r}\right) \quad (4.7)$$

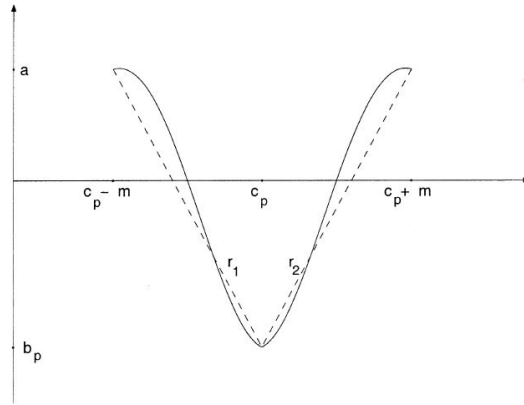
poznačení škrábance

ihorizontální souřadnice v horizontálním jasovém průřezu

c_phorizontální souřadnice středu škrábance

b_pjasová hodnota škrábance v c_p (amplituda)

w_pšířka škrábance



Obr. 4.1 – Model profilu vertikálního škrábance plnou čarou, aproximace čárkovaně. Zdroj [28]

Předpokládá se, že světlé vertikální škrábance budou ve správně určených lokálních maximech a tmavé škrábance ve správně určených lokálních minimech horizontálního jasového průřezu obrázku. Lokální extrémy, které představují vertikální škrábance, jsou vybírány na základě znalostí obvyklé šířky a hloubky škrábanců a na základě minimální energie, jakou musí škrábanec mít, aby byl v obrázku rozpoznatelný.

Nejdříve je tedy určen horizontální jasový průřez $x(n)$ ($n \in [1, N]$) a jeho lokální extrémy. Z těch jsou pak vybírány extrémy $\{x(n_E)\}$ podle toho, jaké škrábance jsou hledány. V případě světlých škrábanců se vybírají maxima a v případě tmavých minima. Jedná se o jediný parametr, který musí nastavit externí operátor, jinak jde o plně automatickou metodu.

Nejdříve jsou z vybrány extrémy $x(n_H)$, které odpovídají běžné šířce vertikálních škrábanců. Tedy z $\{x(n_E)\}$ jsou vyloučeny ty extrémy, jejichž sousední extrémy jsou vzájemně vzdáleny o více než 10 px. Dále se z $x(n_H)$ vybírají extrémy $x(n_V)$, jejichž hloubka (rozdíl hodnoty horizontálního jasového průřezu v daném extrému a průměrné hodnoty v sousedních extrémech) je větší než hloubka všech extrémů $x(n_H)$. V posledním kroku je určena minimální energie E_{rjn} (spíše síla), jakou musí škrábanec mít, aby byl na pozadí obrázku rozpoznatelný. Vychází se z Weberova zákona, podle kterého je objekt (v tomto případě škrábanec) s jase b_p na pozadí s jase b_{mean} rozpoznatelný, pokud

$$\frac{|b_{mean} - b_p|}{b_p} \geq 0.02 \quad (4.8)$$

b_{mean}průměr všech lokálních extrémů $\{x(n_E)\}$ horizontálního jasového průřezu obrázku
 b_pjasová hodnota škrábance

Je tedy určena nejmenší možná amplituda $\bar{b}_{pjn}$ fiktivního škrábance, který je právě rozpoznatelný na pozadí obrázku (jehož jasová hodnota je stanovena z průměru všech extrémů $\{x(n_E)\}$).

Z aproximace modelu profilu škrábance (Obr. 4.1) je určena energie E_{rjn} tohoto fiktivního právě rozpoznatelného škrábance s jasovou hodnotou $\bar{b}_{pjn}$. Zároveň je stejným způsobem určena také energie E_r každého potencionálního škrábance $\{x(n_H)\}$.

$$E_r = |b_p - a|m \quad (4.9)$$

kde

$$b_p = x(c_p), \quad a = \frac{x(m_l) + x(m_r)}{2}, \quad m = \left\lfloor \frac{m_r - m_l}{2} \right\rfloor$$

m_l, m_rlokální extrémy cross-section sousedící s extrémem b_p

Je-li energie potencionálního škrábance E_r větší, než energie fiktivního právě rozpoznatelného škrábance E_{rjn} , pak se v daném extrému vyskytuje skutečný škrábanec.

Model profilu škrábance je symetrický kolem středu. Reálné profily škrábance ale symetrické nejsou, protože jsou ovlivněny čistou obrazovou informací. Putuje-li například tmavý škrábanec přes celou výšku obrázku moře, jehož horní půlku tvoří světlé nebe bez detailů a dolní půlku tmavá voda s detaily vlnek, pak v horní půlce nebude profil škrábance obrazovou informací ovlivněn a bude odpovídat modelu (symetrický s minimální jasovou hodnotou ve středu). V dolní oblasti obrázku však budou výrazné tmavé detaily obrázku profil škrábance deformovat. Amplituda profilu klesá vzhledem k rostoucí hodnotě koeficientu γ a může dojít k jejímu horizontálnímu posunu. Pokud budou detaily dostatečně výrazné, převáží nad škrábacem i v horizontálním jasovém průřezu obrázku, a pozice škrábance pak bude určena nesprávně, protože lokální extrém nebude nalezen ve středu škrábance. Autoři počítají s tím, že je vypočtená energie škrábance ovlivněna také čistou obrazovou informací a určují nejistotu tohoto výpočtu na základě nejistoty $x(m_l)$, $x(m_p)$ a $x(c_p)$. Nicméně fakt, že výrazné detaily mohou zajistit posun lokálního extrému o několik pixelů od polohy skutečného škrábance, díky čemuž pak tato metoda, která pracuje pouze s lokálními extrémy horizontálního jasového průřezu, nedokáže správně určit polohu škrábance, řešení není. Přesto je tato metoda považována za rychlý a výkonný nástroj při detekci vertikálních škrábanců [29].

Další postupy

Obě předchozí metody detekují vertikální škrábance jinými postupy, přesto však obě provádí dva základní kroky. Nejdříve určí horizontálně impulsivní jasové změny (Kokaram rozdílem původního a filtrovaného obrázku, Bruni a Vitulano určením lokálních extrémů horizontálního jasového průřezu) a následně vybírají, které z těchto změn by mohly odpovídat vertikálním škrábancům (Kokaram Houghovou transformací a statistickým porovnáváním. Bruni a Vitulano hledáním lokálních extrémů cross-section, které odpovídají modelu profilu škrábance a mají dostatečnou energii na to, aby byly v obrázku vidět). K realizaci těchto dvou kroků se dá využít různých dalších metod.

Detekce hran

Kromě filtrování, nebo hledání lokálních extrémů horizontálního jasového průřezu se dá k detekci horizontálně výrazných jasových změn využít také metod pro detekci hran, protože vertikální škrábance vlastně jsou hrany. Hrana je množina propojených obrazových bodů, které leží na hranici mezi dvěma oblastmi obrázku, které mají rozdílné jasové hodnoty [30]. Při přechodu z jedné oblasti do druhé dochází na hraně k náhlé změně jasové hodnoty. Bod náležící hraně lze tedy detekovat na základě jeho dvojrozměrné první derivace jasové hodnoty, která je získána pomocí různých aproximací dvojrozměrného gradientu. Gradient obrázku I v pozici (i, j) je vektor

$$\nabla \vec{f}(i, j) = \begin{bmatrix} G_i \\ G_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta I(i, j)}{\delta i} \\ \frac{\delta I(i, j)}{\delta j} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

V každém bodě obrázku I je určena velikost a směr gradientu. Orientace gradientu určuje směr největší změny jasové hodnoty, absolutní hodnota gradientu pak určuje velikost této změny. Úhel gradientu vztažený k horizontální ose obrázku lze určit jako $\alpha(i, j) = \tan^{-1} \left(\frac{G_i}{G_j} \right)$, absolutní hodnotu gradientu jako $\nabla f(i, j) = |\nabla f(i, j)| = \sqrt{G_i^2 + G_j^2}$. V každém bodu obrázku se vypočte aproximace (nejde totiž o spojitou veličinu) parciální derivace jasové hodnoty podle i a j . Nejjednodušší aproximací je

$$\frac{\delta I(i, j)}{\delta i} = I(i + 1, j) - I(i, j) \quad (4.11)$$

$$\frac{\delta I(i, j)}{\delta j} = I(i, j + 1) - I(i, j) \quad (4.12)$$

a lze ji realizovat filtrováním obrázku maskami na Obr. 4.2

-1		-1	1
1			

Obr. 4.2 – Operátory pro nejednodušší aproximaci derivace

Výhodnější je ale použít masky, které mají středový bod a jsou kolem něj symetrické (viz Obr. 4.3). Ty totiž berou v úvahu i informaci z druhé strany okolí obrazového bodu.

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

Obr. 4.3 – Označení okolí bodu z_5 o rozměrech 3x3

Filtrováním obrázku I maskou w o rozměrech $A \times B$ vznikne obrázek G . Hodnota bodu nového obrázku $G(i, j)$ je určena pomyslným přiložením počátečního bodu masky w k bodu $I(i, j)$ a sečtením jasových hodnot bodů obrázku, které jsou překryty maskou, násobených příslušnými koeficienty masky w .

$$G(i, j) = \sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 w(s, t) I(i + s, j + t) \quad (4.13)$$

Nejjednodušší aproximaci první derivace v bodě z_5 popisují rovnice (4.14) a (4.15) a lze ji realizovat operátorem Prewittové na Obr. 4.4.

$$G_i = z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9 \quad (4.14)$$

$$G_j = z_1 + z_4 + z_7 - z_3 - z_6 - z_9 \quad (4.15)$$

-1	-1	-1	-1	0	1
0	0	0	-1	0	1
1	1	1	-1	0	1

Obr. 4.4 – Operátor Prewittové pro aproximaci G_i a G_j

Existuje také operátor Prewittové uzpůsobený tak, aby měly největší odezvu na diagonální hrany. Nicméně vzhledem k tomu, že v tomto případě jde o detekci vertikálních hran, stačí určit aproximaci parciální derivace jasové hodnoty podle i a označit za výrazné horizontální jasové změny ty body, které mají tuto aproximaci dostatečně vysokou. Tato metoda je použita například v [31].

Vyspělejší způsobem detekce hran, který je využit v [32] je Cannyho operátor. Tato metoda sestává z několika kroků. Nejdříve je obrázek I filtrován Gaussovým filtrem pro odstranění šumu. Následně je určen gradient obrázku $\nabla \tilde{f}(i, j)$ včetně orientace. Do nového obrázku I_V jsou vybrány pouze ty pixely z I , jejichž gradient má s určitou odchylkou úhel vzhledem k horizontální ose obrázku 0° nebo 180° (ty totiž mohou náležet vertikálním hranám). Absolutní hodnoty gradientu pixelů (i, j) v obrázku I_V jsou pak porovnávány s absolutními hodnotami gradientu dvou horizontálně sousedících pixelů $I_V(i-1, j)$ a $I_V(i+1, j)$. Má-li alespoň jeden z těchto pixelů absolutní hodnotu gradientu větší, je zkoumaný pixel vyřazen z dalšího zpracovávání, protože sousední pixel náleží hraně s větší pravděpodobností. V opačném případě je jeho hodnota v novém obrázku I_N rovna absolutní hodnotě jeho gradientu. Obrázek I_N je pak prahován dvěma hodnotami T_l a T_h , kde $T_l < T_h$. Body, jejichž gradient má absolutní hodnotu větší než T_h jsou označeny jako body náležící vertikálním hranám. Jsou k nim ale ještě přidány body z obrázku I_N , které leží v jejich blízkém okolí a mají absolutní hodnotu gradientu větší, než T_l , aby došlo k detekci kompletních hran.

Vlnková transformace

Dalším způsobem, jak najít výrazné horizontální jasové změny je převedení obrázku do frekvenční oblasti pomocí diskrétní vlnkové transformace [33]. Obrázek je pomocí filtrů rozložen na aproximaci A a koeficienty detailů V (vertikálních), H (horizontálních) a D (diagonálních). Aproximace A se získá filtrováním obrázku vhodnou dolní propustí, V , H a D jsou získány kombinací dolních a horních propustí. Koeficienty vertikálních detailů V přímo obsahují informaci o vertikálně výrazných strukturách obrázku. Výpočtem vertikálního průměru ve všech sloupcích V a vhodným prahováním těchto hodnot mohou být oblasti s těmito strukturami nalezeny. V dalším kroku je na tyto oblasti v aproximaci A použito unsharp maskování v horizontálním směru.

$$I_{hp}(i, j) = I(i, j) - I_l(i, j) \quad (4.16)$$

Od obrázku se odečte jeho verze rozostřená (filtrovaná dolní propustí) v horizontálním směru, čímž jsou získány vysoké frekvence v horizontálním směru obsažené v obrázku. Následně je na základě I_{hp} vytvořen binární obraz B , který obsahuje 1 tam, kde je I_{hp} kladná v případě

hledání světlých škrábanců (ty mají větší jasovou hodnotu než jejich okolí), záporná v opačném případě. V každém sloupci B je pak určena průměrná hodnota. Přesahuje-li tato hodnota nastavenou prahovou hodnotu, je na dané horizontální pozici obrázku detekován škrábanec.

Takto detekované výrazné horizontální změny jasové hodnoty označují v binárním obrázku jedničkou oblasti, které by mohly být součástí škrábance, neboť odpovídají jeho horizontálním prostorovým charakteristikám. Je ale potřeba vybrat z nich ty, které dohromady tvoří vertikální čáru. K tomu může kromě Houghovy transformace posloužit také morfologické filtrování.

Morfologické filtrování

Matematická morfologie je silný nástroj, který dokáže odhalit zajímavé vlastnosti objektů v obrázku (například hranice objektu, nebo jeho kostru), které se dají využít pro další zpracování. Existuje i šedotónová morfologie, ale na binární obraz označující body náležící výrazným horizontálním změnám jasové hodnoty je použita morfologie binární. Dvěma primitivními morfologickými operacemi, na nichž je postavena většina složitějších operací, jsou dilatace a eroze obrázku daným strukturovacím elementem.

Strukturní element je set obrazových bodů, které dohromady tvoří malý binární obraz, pomocí kterého morfologické operace prozkoumávají vlastnosti daného obrázku. Musí mít určený svůj počátek (bod $(1,1)$) který často bývá v jeho geometrickém středu, pokud je element symetrický.

Posun bodu $a = (a_i, a_j)$ o bod $z = (z_i, z_j)$ je bod $b = (a_i + z_i, a_j + z_j)$. Posun strukturního elementu B o bod z je množina všech bodů z B , jejichž souřadnice (i, j) jsou nahrazeny $(i + z_i, j + z_j)$.

$$(B)_z = \{c | c = b + z, b \in B\} \quad (4.17)$$

Zrcadlení strukturního elementu B je množina všech bodů z B , jejichž souřadnice (i, j) jsou nahrazeny $(-i, -j)$.

$$\hat{B} = \{w | w = -b, b \in B\} \quad (4.18)$$

Pak je již možno definovat morfologickou erozi objektu A strukturním elementem B jako množinu všech bodů z takových, že strukturní element B posunutý o z bude celý obsažen v objektu A .

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (4.19)$$

Eroze tedy způsobí zúžení objektu A .

Dilatace objektu A strukturním elementem B je množina všech bodů z takových, že strukturní element B zrcadlený kolem svého počátku posunutý o z bude s objektem A sdílet alespoň jeden bod.

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (4.20)$$

Dilatace tedy objekt A rozšiřuje.

Otevření a uzavření jsou operace složené z eroze a dilatace.

Otevření objektu A strukturním elementem B znamená dilataci erodovaného objektu.

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (4.21)$$

Vyhladí objekt zvenku. Eliminuje drobné výstupky nebo také tenké propojky mezi částmi objektu.

Zavření objektu A strukturním elementem B znamená naopak erozi dilatovaného objektu.

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (4.22)$$

Také objekt vyhlazuje, ale spíše spojuje drobná přerušení, vyplňuje malé prohlubně a díry.

V [31] je morfologické otevření použito na binární obrázek B , ve kterém jsou 1 označeny body s výraznou horizontální jasovou změnou. Jsou pomocí něj, detekovány hrany, které mají jinou, než vertikální orientaci, to jest diagonální nebo horizontální. Pro detekci jednotlivě orientovaných hran jsou zvoleny následující strukturní elementy

$$B_R = \begin{bmatrix} X & 1 & 1 \\ X & 1 & X \\ 1 & 1 & X \end{bmatrix}, \quad B_L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & X \\ X & 1 & X \\ X & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad B_H = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 1 & 1 & 1 \\ X & X & X \end{bmatrix}$$

Obr. 4.5 – Strukturní elementy pro detekci horizontálních a diagonálních hran. X označuje pozice, u kterých nezáleží, zda budou 1 nebo 0.

Jiné než vertikální hrany jsou pak v B eliminovány následujícím způsobem.

$$B' = B - \{B \circ B_R + B \circ B_L + B \circ B_H\} \quad (4.23)$$

V binárním obrazu B je postupně provedeno otevření všemi třemi strukturními elementy B_R, B_L a B_H . B_R a B_L zanechají v B pouze diagonální hrany, B_H jen horizontální hrany. Logický součet výsledků jednotlivých otevření je odečten od B , čímž v B zůstanou pouze vertikální hrany. Z těch jsou pak za vertikální škrábance označeny ty, jejichž výška je větší, než například desetina výšky obrázku.

A contrario

Další metoda [34] přistupuje k detekci vertikálních čar ze statistického hlediska a využívá *a contrario* metodu, která se dá využít k vyhledávání geometrických struktur v obrázku.

Je založená na Helmholtzově principu vnímání, podle kterého jsou pro nás objekty něco, co se výrazně liší od šumu [35]. Objekt se tedy v obrázku nevyhledává hledáním struktury, která co nejpřesněji odpovídá jeho modelu, ale naopak hledáním struktury, která se výrazně liší od naprosto naivního modelu pozadí, které určitě neodpovídá charakteristikám hledaného objektu. Struktura je pak označena za patřičný objekt, pokud je velmi malá pravděpodobnost výskytu takové struktury v obrázku, který odpovídá modelu pozadí (např. v obrázku tvořeném šumem). Tato metoda je tedy použita k vyhledání vertikálních čar v binárním obrázku, kde 1 označují výrazné vertikální změny jasu.

Nejdříve je určen model pozadí, který předpokládá, že směr gradientu obrazových bodů v pozadí je náhodně a rovnoměrně rozprostřen po celém obrázku. Čáry jsou pak vyhledávány jako segmenty tvořeny skupinou obrazových bodů, které mají stejnou orientaci gradientu. Skupina bodů je označena za čáru tehdy, když je pravděpodobnost výskytu tolika bodů se stejnou orientací gradientu v pozadí, které odpovídá výše zmíněnému modelu, dostatečně malá. Pravděpodobnost výskytu vertikální čáry v obrázku se prostorově liší v závislosti na hustotě bodů detekovaných v předchozí fázi. V detailnějších oblastech obrázku bylo detekováno více bodů a je tedy větší pravděpodobnost, že utvoří vertikální čáru. Tento fakt usnadňuje detekci. Jednotlivé segmenty, které dohromady tvoří jednu čáru, která odpovídá charakteristice vertikálních škrábanců, jsou pak sloučeny dohromady. Tj. pokud je v jednom sloupci detekováno více segmentů, je z nich vytvořena pouze jedna čára. Také v případě, kdy se různě nakloněné segmenty kříží, je bod, který je obsažen oběma segmenty přiřazen segmentu s menší pravděpodobností výskytu

v pozadí určeném modelem a z druhého segmentu s vyšší pravděpodobností je vyřazen. Pokud tato pravděpodobnost druhého segmentu po vyloučení daného bodu stoupne nad určitou hranici, je vyloučen celý segment.

Výhodou této metody je, že vyhledává také sekundární škrábance, neoznačuje za škrábanec celý sloupec obrázku. Určuje také počátek a konec škrábance velmi přesně.

4.1.3 Časové detektory

Na základě sloučení metod z předchozí sekce může vzniknout silná prostorová detekční metoda, která dokáže detekovat škrábance pomocí informací obsažených v jediném snímku. Co ale nedokáže, je rozeznat vertikální škrábance od vertikálních struktur, které mají stejnou prostorovou charakteristiku jako škrábanec, přitom ale tvoří součást čisté obrazové informace. Takové struktury mohou být rozeznány až podle toho, jak se chovají v čase. Vertikální škrábanec zůstává na stejné prostorové pozici v průběhu několika snímků, nebo se mírně pohybuje. Jeho pohyb ale nekoresponduje s pohybem scény, na rozdíl od vertikálních struktur obsažených v obrazové informaci. Většina časových detekčních metod využívá tohoto faktu k rozpoznání skutečných škrábanců v setu potencionálních škrábanců detekovaných prostorovou metodou.

Koherence pohybu

Jednu takovou metodu popsal M. K. Güllü [36]. V okolí potencionálního škrábance ve snímku n je vytvořen blok o rozměrech $A \times B$ tak, že potencionální škrábanec je v jeho středu. Tento blok je následně vyhledáván ve snímku $n + 1$ v určité pátrací oblasti pomocí Block Matching algoritmu (viz sekci 3.1). Počítá se tedy průměr absolutní hodnoty rozdílu MAD 3.3 bloku ve snímku t a každého bloku z pátrací oblasti ve snímku $t + 1$.

Je-li ve snímku $n + 1$ nalezen blok s dostatečně malým MAD , je považován za ten samý blok ze snímku n , jen posunutý na danou pozici. Následně je vypočten MAD_c středu bloku ve snímku n a středu bloku nalezeného ve snímku $n + 1$. Pokud potencionální škrábanec nepředstavuje škrábanec, ale vertikální strukturu obrázku, bude MAD_c velmi malý, protože se tato struktura pohne společně se svým okolím a bude tedy i ve středu bloku ve snímku $n + 1$. V opačném případě, kdy se bude jednat o skutečný škrábanec, bude MAD_c vysoký, protože škrábanec zůstane na svém místě i ve snímku $n + 1$ a ve středu bloku pak bude čistá obrazová informace.

Podobně funguje další metoda [37], ta ale analyzuje globální pohyb scény a porovnává ho s pohybem škrábance. Vyjmou se ty potencionální škrábance, jejichž průměrný horizontální pohyb odpovídá průměrnému horizontálnímu pohybu scény v okolí škrábance. Nejdříve se tedy (opět například pomocí Block Matching algoritmu) určí pole pohybových vektorů (ξ, ψ) pro referenční obrázek I_0 tak, že

$$I_0(i, j) = I_1(i + \xi(i, j), j + \psi(i, j)) \quad (4.24)$$

Pro každý potencionální škrábanec se určí průměrný pohyb v oblasti škrábance a porovnává se s průměrným pohybem sousedících oblastech, který představuje pohyb scény.

$$P_j = \frac{1}{M} \sum_i \xi(i, j) \quad (4.25)$$

P_iprůměrný horizontální pohyb ve sloupci i
 Mvýška obrázku
 i, jhorizontální a vertikální souřadnice
 ξpole vektorů horizontálního pohybu

Pokud se pozadí škrábance vůbec nějak hýbe (průměrný horizontální pohyb scény přesahuje hodnotu 0,2 px/snímek), pak je možné použít časový detektor, který porovná průměrný pohyb škrábance a okolí. Jestliže pohyb škrábance dosahuje alespoň 70 % pohybu okolí, je tento škrábanec určen za falešnou detekci.

Robustnější metoda byla představena A. Newsonem [34]. Nejdříve jsou určeny vektory globálního pohybu scény, jimiž je následně kompenzován pohyb všech potencionálních škrábanců ve všech snímcích sekvence detekovaných prostorovou detekční metodou. Je vytvořen binární obraz prostorových detekcí, který ukazuje trajektorie jednotlivých potencionálních škrábanců. Jedničky zde představují pozice v čase. Vertikální souřadnice jedničky určuje snímek n , ve kterém se daný potencionální škrábanec nachází a horizontální souřadnice určuje jeho horizontální pozici v tomto snímku. Pokud bude pozice každého potencionálního škrábance kompenzována pohybovým vektorem globálního pohybu scény, zobrazí se v novém binárním obrazu vertikální struktury patřící do obrazu, které byly falešně označeny za potencionální škrábance, jako rovné vertikální čáry. Je to proto, že konají stejný pohyb jako scéna a ten je kompenzován.

Pokud se ale ve scéně neodehrával žádný pohyb, není možné rozhodnout, zda rovná čára představuje škrábanec, nebo ne, protože trajektorie statického vertikálního škrábance kompenzovaná nulovým pohybem scény zůstává rovnou čarou. Je tedy třeba sledovat celou trajektorii, která byla třeba jen z části označena za trajektorii vertikální struktury obrázku a označit ji za falešnou detekci až v případě, že se v jedné trajektorii neobjeví dvě jedničky na různých časových pozicích, jejichž horizontální vzdálenost přesahuje danou prahovou hodnotu.

Kalmanův filtr

Zajímavá a zcela odlišná metoda [38] pro časovou detekci vertikálních škrábanců využívá Kalmanova filtru, který sleduje vývoj polohy potencionálních škrábanců určený prostorovou metodou v čase a určuje podle něj, zda se jedná o škrábance, nebo ne. Kalmanův filtr se obecně používá jako doplněk při měření signálu s malým odstupem od šumu. Je vytvořen model, ve kterém jsou zahrnuty fyzikální zákony, jimiž by se měřená veličina měla řídit. Ze známého počátečního stavu veličiny v čase t a známé nejistoty s jakou je tento stav určen, je pomocí tohoto modelu určen odhad následujícího stavu v čase $t + 1$ a jeho nejistota. Zároveň je v čase $t + 1$ provedeno měření s určitou nejistotou (nejistota přístrojů a podobně). Z nejistot obou hodnot je určen *Kalmanův zisk*, který stanoví, jak moc je naměřená hodnota důvěryhodná. Na základě tohoto údaje se určí váhy pro odhadnutou a změřenou hodnotu, jejichž kombinací vznikne výstupní hodnota veličiny v čase $t + 1$, která je důvěryhodnější, než samotná naměřená hodnota. Zároveň je určena nejistota této hodnoty. Obojí je použito v dalším kroku pro odhad veličiny v čase $t + 2$. Kalmanův filtr je rychlý, protože pracuje rekurzivně. Potřebuje znát pouze poslední výstupní hodnotu a její nejistotu a současné měření a jeho nejistotu.

Na tomto principu je založena metoda sledování vertikálních škrábanců, kterou navrhl L. Joyeux se svým týmem. Předpokládají, že vzhledem k tomu, že jsou vertikální škrábance způsobeny rotujícími součástkami, bude časový průběh jejich pozice složen z harmonických funkcí. Spolehají na modelování časové trajektorie sinusovkou se dvěma harmonickými.

$$x(n) = offset + \sum_{i=1}^3 A_i \sin(2\pi f \cdot i \cdot n + \varphi_i) \quad (4.26)$$

offset.....horizontální pozice středu škrábance
 A_iamplituda i -té sinusovky
 φ_ifáze i -té sinusovky
 fzákladní frekvence

Vektor stavů jednotlivých parametrů ve snímku n pak vypadá následovně

$$u_n = (A_1 \varphi_1 A_2 \varphi_2 A_3 \varphi_3 f \text{ offset})^t \quad (4.27)$$

Je potřeba určit počáteční stav všech sledovaných parametrů trajektorie a jeho nejistotu, aby z něj mohl být odhadnut stav následující.

$$u_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ f_0 \ r_0)^t$$

Nejistota hodnot počátečních stavů, na které závisí nejistota odhadnutého stavu v následujícím čase, je záměrně nastavena na vysokou hodnotu. Větší důvěru pak získává měřená hodnota a filtr rychleji konverguje ke správným hodnotám.

Před aplikací Kalmanova filtru jsou jednotlivé snímky sekvence, ve které jsou detekovány vertikální škrábance, vertikálně podvzorkovány. V každé řádce podvzorkovaného obrázku jsou určeny lokální extrémy, čímž vznikne binární obraz (který kromě pozic škrábanců obsahuje velké množství nesprávných detekcí - šumu). Následně jsou všechny takto upravené snímky sekvence vloženy do jednoho binárního obrazu, jehož vertikální osa představuje čas a horizontální osa horizontální souřadnici obrázku. Na takový obraz je použita Houghova transformace pro měření pozice a sklonu škrábanců v daných časových okamžicích. Houghova transformace poskytne navíc také informaci o přesnosti měření. Méně přesné měření méně ovlivní výstupní hodnotu. Trajektorie, které nevyhovují časové charakteristice vertikálních škrábanců, způsobí divergenci Kalmanova filtru.

4.2 Potlačení vertikálních škrábanců

Odstranění vertikálních škrábanců, je složitější, než odstranění jednosnímkových artefaktů, díky faktu, že vertikální škrábance mohou přetrvávat ve stejné pozici v několika po sobě jdoucích snímcích a není proto možné využít k rekonstrukci informaci z časově sousedících snímků. Metody pro odstranění škrábanců se liší především v předpokladech o vlastnostech škrábanců, které jednotliví autoři uvažují [31]. Mnoho autorů předpokládá, že jsou oblasti škrábance oblasti se zcela ztracenou informací. Existují ale i metody, které berou v potaz fakt, že v oblasti škrábance zůstává určitá míra užitečné informace, která může být použita k rekonstrukci.

Patrně nejpoužívanějším způsobem je návrh modelu změny jasové hodnoty obrázku v oblasti škrábance a jeho okolí a zkreslenou informaci pomocí něj interpolovat. Koeficienty tohoto modelu jsou odvozeny právě z nezkresleného okolí škrábance. Nejčastěji se používají polynomiální modely, stochastické modely, nebo Fourierovy řady [38]. Stochastické modely jsou úspěšně využívány, avšak jsou složité implementovatelné a pracují s pravděpodobnostmi a statistikou, díky čemuž přesahují hranice této práce.

K rekonstrukci oblasti škrábance lze využít polynomiální interpolace [31]. Jasové hodnoty zkreslených pixelů jsou zde nastaveny podle polynomiální funkce určitého řádu, jejíž koeficienty jsou určeny metodou nejmenších čtverců použitou nad nezkreslenými pixely z okolí škrábance. Tato metoda však obnoví pouze nižší frekvence ztracené informace, což způsobí, že výsledná rekonstruovaná oblast bude poněkud hladká. V oblastech snímku, které obsahují mnoho detailů, nebude tato metoda dostačující.

K obnovení vyšších frekvencí můžou být použity Fourierovy řady [38]. Nejdříve jsou z okolí zkreslených pixelů extrahovány vysoké frekvence odečtením dolní propustí filtrovaného obrázku od původního. Z těchto dat jsou pak odhadnuty koeficienty Fourierovských řad (amplitudy a frekvence) a takto rekonstruovaný signál je pak přičten k nízkofrekvenčnímu signálu interpolovaného polynomem.

Metoda navržená v [31] si klade za cíl opravit detekované škrábance co nejjednodušším a neefektivnějším způsobem. Předpokládá, že všechny detekované škrábance mají obdélníkový profil (tedy že neobsahují žádnou užitečnou obrazovou informaci) a jdou přes celou výšku snímku. Oblast škrábance je $I(i, j)$, kde $i = 1 \dots N$ a $j = a \dots b$. N je vertikální rozměr snímku, a a b

jsou první a poslední sloupec snímku ležící v oblasti škrábance. K rekonstrukci se zde přistupuje jako k jednorozměrné lineární interpolaci v každém řádku každého detekovaného škrábance mezi bodem $P_l = I(i, a - 1)$ a $P_r = I(i, b + 1)$. Tak jednoduchá metoda ale zkreslenou oblast příliš vyhladí. Ve snímku bude jasně vidět, ve kterých místech k rekonstrukci došlo. Zlepšení je dosaženo přidáním určité jasové hodnoty k jasové hodnotě každého rekonstruovaného pixelu, která má simulovat odlišnost reálných dat od lineárního modelu. Tato hodnota je určena na základě rozdílu reálné jasové hodnoty v nezkreslené oblasti sousedící s oblastí škrábance a jasové hodnoty v této oblasti modelované lineárním modelem použitým také v oblasti škrábance. Tedy v každém řádku každého škrábance jsou nezkreslená data v určité oblasti sousedící se škrábancem interpolována polynomem prvního řádu a pro každý bod z této oblasti je určen rozdíl mezi jeho reálnou jasovou hodnotou a touto interpolací. Tento rozdíl je pak přičten k příslušnému bodu z oblasti škrábance.

Zjednodušením dvourozměrné interpolace na jednorozměrnou je ztracena korelace obrazové informace ve vertikálním směru. tento problém je vyřešen tak, že se jednorozměrná interpolace provede jen pro každý druhý řádek škrábance a restaurovaná obrazová informace každého pixelu ve zbylých řádcích je získána jako průměrná hodnota 8 pixelů z jeho těsného okolí.

Kapitola 5

Zhodnocení implementovaných metod pro potlačení jednosnímkových artefaktů

V této kapitole jsou porovnávány implementované metody detekce jednosnímkových artefaktů. Je zde kladen důraz na účinnost jednotlivých detektorů při různé míře pohybu scény. Obrazová informace v oblastech detekovaných artefaktů je následně rekonstruována pomocí implementované metody a je zde diskutován vliv různého nastavení citlivosti detektorů na kvalitu rekonstrukce.

5.1 Detekce jednosnímkových artefaktů

Pro detekci jednosnímkových artefaktů byly implementovány detektory Storey [30], SDIa a SDIp [21], ROD a sROD [28]. Matlabové kódy implementovaných detektorů jsou na příloženém CD ve složce Implementace.

K číselnému vyjádření účinnosti detektoru je potřeba jeho výstup porovnat s výstupem ideálního detektoru, který detekuje 100% všech skvrn vyskytujících se v sekvenci. Takový detektor není k dispozici, proto byly za účelem porovnání detektorů vytvořeny dvě uměle zkrešené sekvence FORD1 a FORD2 u kterých byl ideální výsledek detekce znám.

Sekvence FORD1 a FORD2 byly vystřiženy z digitalizovaného filmového záznamu Two Ford Freedom, který byl stažen z Prelinger archivu [42] (viz Kapitola 7). Do každého snímku obou sekvencí byl přidán různý počet různě velkých skvrn s různým tvarem a různou jasovou hodnotou. Jasová hodnota byla konstantní v celém obsahu každé skvrny. Zároveň byla vyrobena 28 snímková sekvence BLOTCHMASK obsahující binární mapy těchto uměle přidávaných skvrn v každém snímku. Tato sekvence pak sloužila jako výsledek ideální detekce, se kterým byly výsledky jednotlivých detektorů porovnávány. Všechny tři sekvence jsou též k dispozici na příloženém CD ve složce TestSekv.

Jednotlivé detektory by měly mít výsledky závislé na pohybu ve scéně. Obě sekvence se proto liší mírou pohybu. FORD1 je záběr pomalu rozjíždějícího se auta, kde se na pozadí hýbou v podstatě jen větve stromů. FORD2 je sekvence, kde je pohybu více. Žena přechází po kuchyni a kamera ji sleduje. Tedy žena se hýbe doleva a mává při tom rukama a kuchyň se pohybuje doprava.

Kompenzace pohybu byla provedena tříúrovňovým hierarchickým Block Matching algoritmem s velikostí bloku 8x8 pixelů a poloměrem vyhledávací oblasti $SA=8$ pixelů. Pro zajištění spolehlivějších výsledků kompenzace pohybu byl do kódu zahrnut krok, ve kterém algoritmus

nápadně velké pohybové vektory přicházející z nižší úrovně považuje za podezřelé a raději je (za cenu zvýšení výpočetní náročnosti) vypočítá znovu na této úrovni. Kód provádějící hierarchický Block Matching algoritmus je k dispozici na přiloženém datovém nosiči ve složce Implementace.

Porovnání účinnosti detektorů na těchto dvou sekvencích bylo provedeno pomocí ROC (Receiver Operating Characteristic) křivek [21]. Tyto křivky znázorňují, kolik pixelů detektor správně označil za skvrnu v závislosti na tom, kolik jich označil falešně. Pokud je B_{id} binární maska, ve které jedničky označují pozice obrázku, které byly uměle zkresleny a B_{det} je binární maska, kde jedničky označují pozice obrázku, ve kterých byly daným detektorem detekovány skvrny, může být míra správných detekcí R_{true} a falešných detekcí R_{false} daného detektoru určena následovně.

$$R_{true} = \frac{\sum(B_{det} \& B_{id})}{\sum(B_{id})} \quad (5.1)$$

$$R_{false} = \frac{\sum(B_{det} \& \bar{B}_{id})}{\sum(\bar{B}_{id})} \quad (5.2)$$

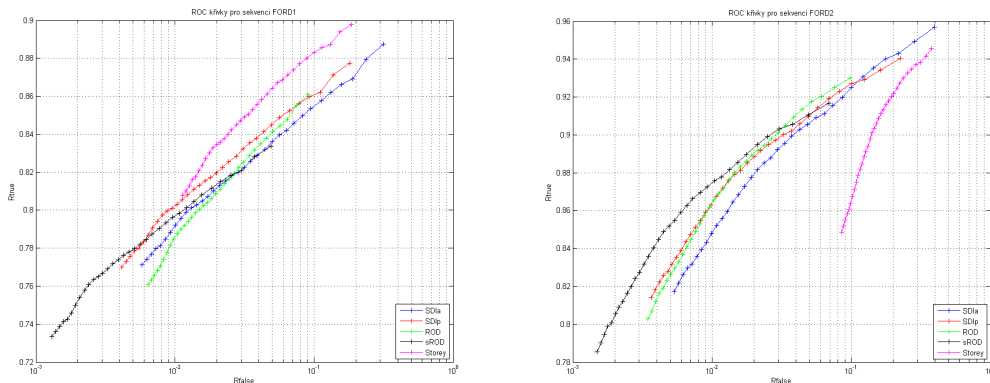
Funkce $\sum$ zde spočítá kolik jedniček se nachází ve vstupním binárním obrázku, $\&$ značí logický součet a $\bar{B}_{id}$ značí inverzi binární mapy reálných skvrn respektive logický doplněk. R_{true} pak určuje poměr mezi počtem pixelů, které byly detektorem správně označeny za skvrnu a počtem všech pixelů, které jsou skutečně zkresleny. V ideálním případě tedy bude R_{true} rovno jedné. R_{false} na druhou stranu představuje poměr mezi počtem pixelů, které byly detektorem označeny za skvrnu nesprávně a mezi počtem všech pixelů ve snímku, které skvrnu nepředstavují. R_{false} by tak měl být v ideálním případě roven nule. Různé hodnoty R_{true} a R_{false} pro výpočet ROC křivek jsou získány změnou citlivosti jednotlivých detektorů. Citlivost detektorů je určena prahovou hodnotou T_1 (v případě ROD detektoru třemi prahovými hodnotami T_1, T_2 a T_3), která je jediným nastavovaným parametrem. Vyšší prahová hodnota znamená nižší citlivost. Křivky byly pro všechny detektory počítány pro $T_1=1, 2, 3 \dots 35$. U SDIa a SDIp se skutečná prahová hodnota rovnala druhé mocnině T_1 z 3.6 díky faktu, že SDI porovnává druhé mocniny rozdílů jasových hodnot. Další dvě prahové hodnoty T_2 a T_3 pro ROD detektor byly určeny vždy jako $T_2=T_1+4$ a $T_3=T_1+20$. Křivky byly vypočteny pro obě sekvence FORD1 a FORD2 tak, že R_{true} a R_{false} byly určeny pro každý detektor na každém snímku se všemi nastaveními citlivosti a výsledky ze všech snímků pak byly zprůměrovány.

Je žádoucí, aby detektor poskytoval co nejvíce správných detekcí při co nejmenším počtu pixelů označených za skvrnu nesprávně. Čím blíže se tak bude ROC křivka detektoru blížit levému hornímu rohu grafu, tím bude detektor výkonnější.

Výsledné křivky na Obr. 5.1 ukazují, že v sekvenci FORD1, kde skoro nedochází k pohybu, podává nejlepší výsledky Storey detektor. Nejmenšího počtu falešných detekcí dosahuje detektor sROD, ale označí při nich správně pouze méně než 80 % skvrn. ROD detektor podává při nižším nastavení citlivosti nejhorší výsledky a pro vyšší citlivosti není lepší, než SDIp. SDIp je při všech testovaných citlivostech výkonnější, než jeho dřívější verze SDIa.

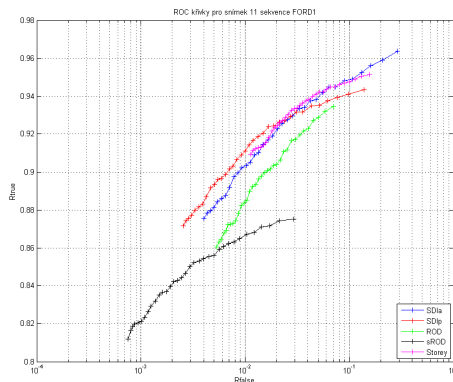
Sekvence FORD2 ukazuje, že Storey detektor nemá smysl používat pro sekvence, ve kterých dochází k výraznějšímu pohybu. Vede si jasně nejhůř pro všechna nastavení citlivosti. Skoro ve všech případech označí více než desetinu nezkreslených pixelů za skvrnu. Nejlepších výsledků na této sekvenci dosahuje detektor sROD. Do 90 % správně detekovaných skvrn podává také nejmenší počet falešných detekcí. Nad 90 % si vedou nejlépe ROD a SDIp. Při ještě vyšším R_{true} je dokonce nejlepší SDIa. Tak vysoké míry správných detekcí už ale přináší více než desetinu nezkreslených pixelů označených za skvrnu a to už je nežádoucí hodnota.

Na Obr. 5.2 jsou ukázány snímky 10, 11 a 12 sekvence FORD1 a binární mapa skvrn uměle přidávaných do snímku 11. Pomocí těchto obrázků je pak názorněji ukázáno, jak si vedou jednotlivé detektory při dvou různých nastaveních citlivosti ($T_1=8$ a $T_1=25$).



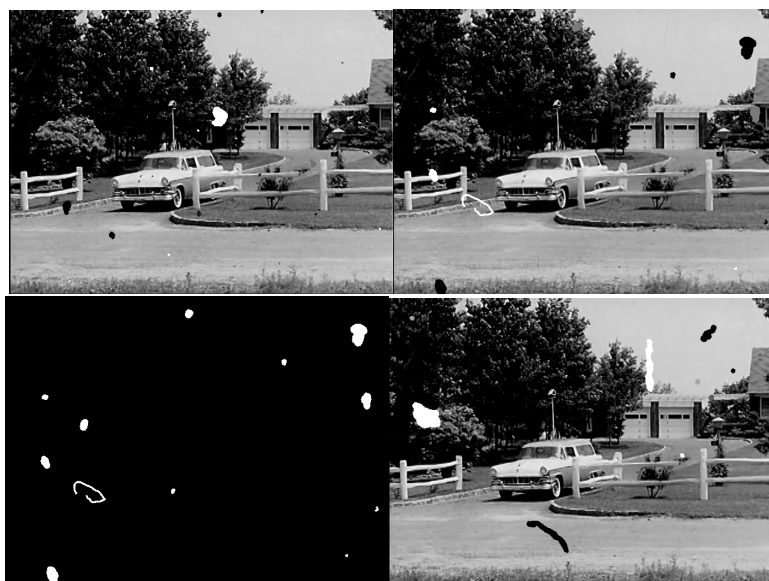
Obr. 5.1 – ROC křivky pro sekvenci FORD1 a FORD2

Nejdříve byly pro snímek 11 sekvence FORD1 vypočítány ROC křivky jednotlivých detektorů se stejně nastavenými prahovými hodnotami jako na Obr. 5.1. Podle ROC křivek na Obr. 5.3 si zde sROD počínal nejhůře. Podává sice nejmenší počet falešných detekcí, ale ani při jednom nastavení nedetekoval více než 88 % skutečných skvrn. Pro testovaná nastavení citlivosti detekoval nejvíce procent reálných skvrn SDIa, ovšem s více než desetinou nezkreslených pixelů falešně označených za defekt. Mezi desetinou a setinou nesprávně označených nezkreslených pixelů má největší počet správných detekcí SDIp a Storey. Nejlepší práci na tomto snímku odvedl nejspíše SDIp, který při méně než setině falešně označených nezkreslených pixelů správně označil kolem 90 % skutečných skvrn.



Obr. 5.3 – ROC křivky pro jednotlivé detektory použity na snímek 11 sekvence FORD1.

Binární mapy detekcí jednotlivých detektorů při nižší a vyšší citlivosti jsou ukázány na Obr. 5.6 a Obr. 5.7. Na každém z obrázků je také vidět binární mapa skutečných skvrn. Čím více se mapa detekce daného detektoru blíží této skutečné mapě, tím je detektor lepší. Obrázky odpovídají ROC křivkám. Storey a SDIa mají velký počet chybně označených pixelů. Zároveň ale mají také kompletněji detekované skvrny, než například sROD, který má zas na druhou stranu nižší počet falešných detekcí. Je také vidět rozdíl mezi nižším a vyšším nastavením citlivosti. Nižší citlivost přináší kýžený menší počet falešných detekcí, avšak zároveň také nižší počet detekcí správných. Otázkou je, co je důležitější. Menší počet správných detekcí způsobí to, že v restaurované sekvenci zůstane určité množství zkreslených pixelů. Vysoký počet falešných

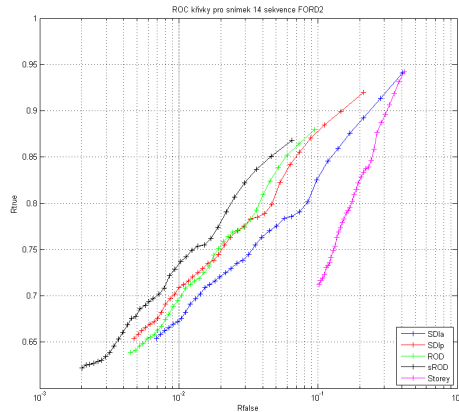


Obr. 5.2 – Sekvence FORD1. Vlevo nahoře: snímek 10; Vpravo nahoře: snímek 11; Vpravo dole: snímek 12; Vlevo dole: Reálná mapa skvrn ve snímku 11.

detekcí zase naopak zapříčiní restauraci nezkreslených oblastí. V případě správné kompenzace pohybu by měla být většina nesprávných detekcí v restaurační fázi nastavena na svou původní jasovou hodnotu. Pokud jsou ale odhadnuté pohybové vektory nepřesné, může být restaurací nezkreslených oblastí obrázku dosaženo horšího výsledku, než kdyby se obrázek nerestauroval vůbec (viz Obr. 5.13).



Obr. 5.4 – Sekvence FORD2. Vlevo nahoře: snímek 13; Vpravo nahoře: snímek 14; Vpravo dole: snímek 15; Vlevo dole: Reálná mapa skvrn snímku 14.



Obr. 5.5 – ROC křivky jednotlivých detektorů použitých na snímek 14 sekvence FORD2

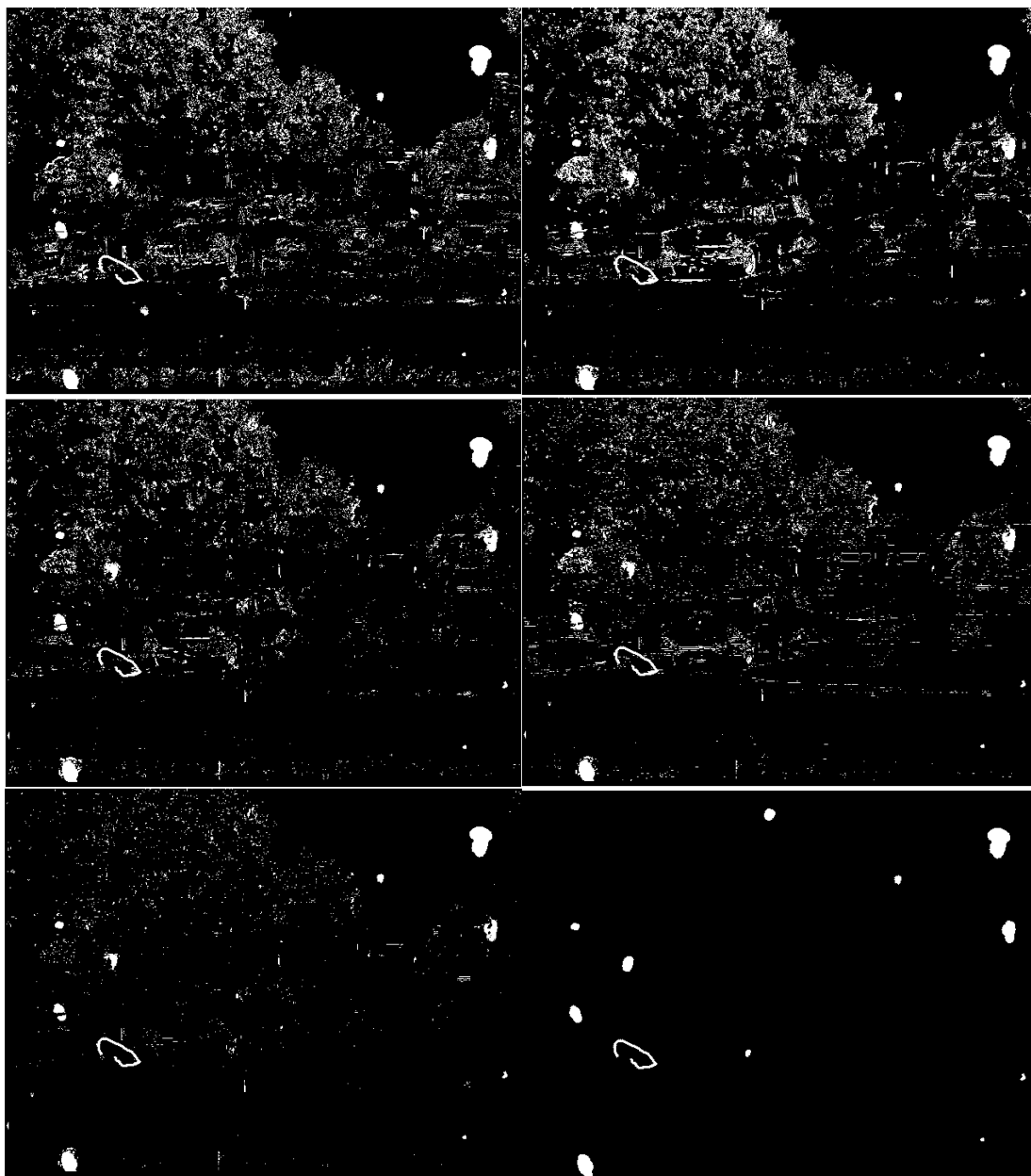
Jiná situace nastává v sekvenci, kde je scéna v pohybu. Obr. 5.4 ukazuje snímky 13, 14 a 15 uměle zkreslené sekvence FORD2 a binární mapu vyznačující výskyt skvrn uměle přidáných do snímku 14. Na tomto snímku bylo opět provedeno názornější srovnání jednotlivých detektorů.

Opět byly vypočteny ROC křivky jednotlivých detektorů, které jsou ukázány na Obr. 5.5. Ačkoliv pohyb mezi třemi použitými snímky sekvence FORD2 není příliš razantní, je přesto oproti křivkám počítaným na snímku 11 sekvence FORD1 (Obr. 5.3) vidět velké rozdíly ve výsledcích jednotlivých detektorů. Storeyho detektor má najednou jednoznačně nejhorší výkon. Při žádném nastavení se mu nepodařilo označit za skvrnu méně než desetinu nezkreslených pixelů. SDIa dosahuje vysokého podílu správně detekovaných skvrn, avšak při velmi vysoké hodnotě falešně označených pixelů. ROD a SDIp dosahují navzájem podobných výsledků. Pro vyšší citlivost má o něco lepší výsledky ROD, pro nižší citlivost zase SDIp. Nejmenší počet chybně označených pixelů poskytuje při všech testovaných citlivostech sROD. Na rozdíl od SDIp se mu však nepodařilo dostat se nad 90 % správně detekovaných skvrn.

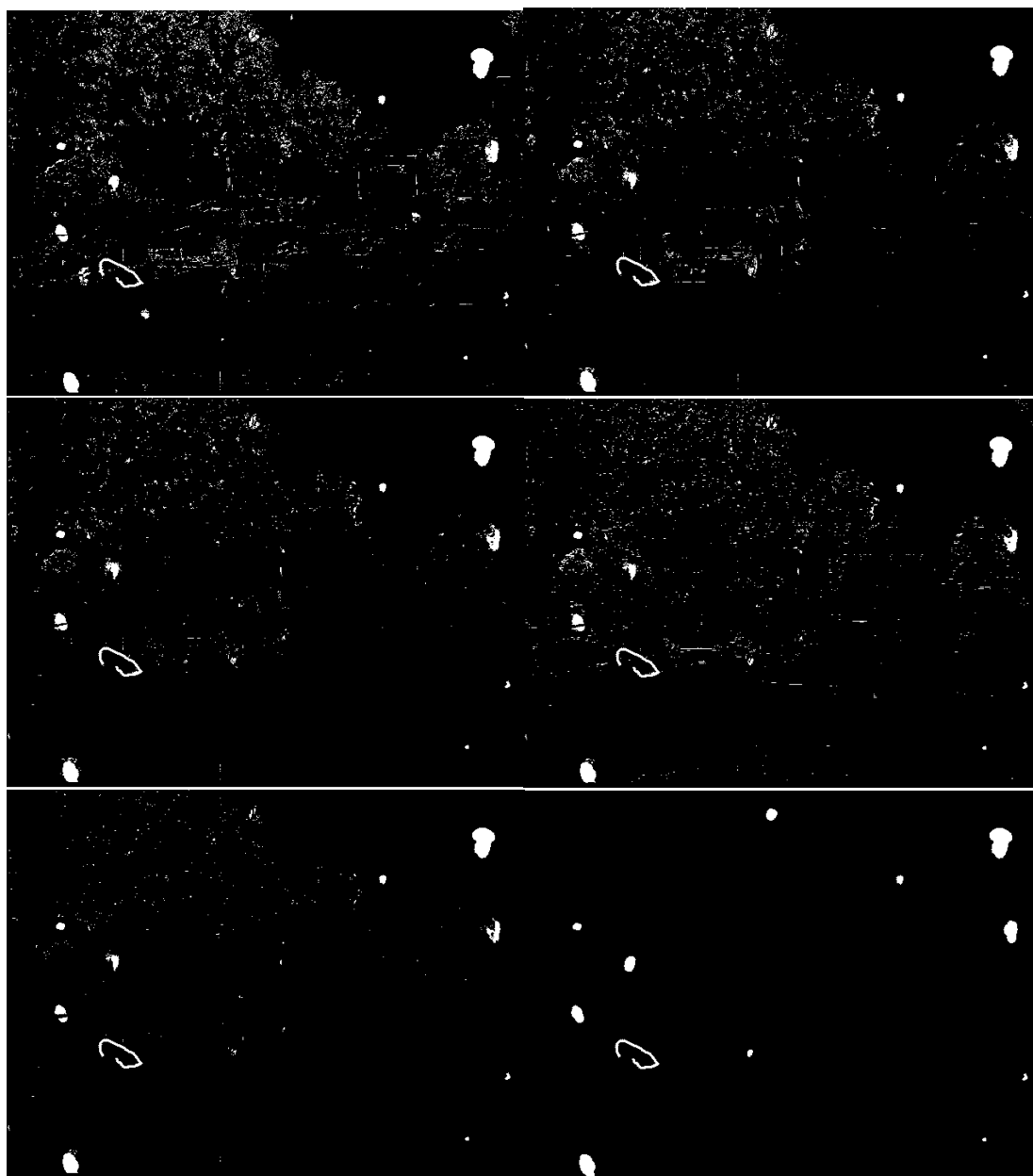
Binární mapy detekcí jednotlivých detektorů na Obr. 5.8 pro $T_1=8$ a na Obr. 5.9 pro $T_1=25$ opět potvrzují výsledky ROC křivek. Storeyho detektor má jednoznačně největší množství falešných detekcí pro obě nastavené citlivosti. Nejnižšího množství falešných detekcí dosahuje sROD pro nižší citlivost. SDIa má více falešných detekcí, než SDIp a ROD. Rozdíl je viditelně větší pro nižší nastavení citlivosti.

Shrnutí

Storeyho detektor má zásadní výhodu v nízké výpočetní náročnosti, protože nevyužívá pohybově kompenzovaných snímků. Je proto ale také použitelný pouze ve scénách bez pohybu, protože pohybující se pixely často chybně označí za skvrny. V pohyblivé scéně dosáhl nejvyššího množství chybně detekovaných pixelů. Ve scéně s menší mírou pohybu byl však nejlepším ze všech testovaných detektorů. Pohyb je však v archivních filmových záznamech zcela běžným jevem, proto Storeyho detektor nejspíše nenalezne uplatnění. Detektor SDIa dosahoval obecně horších výsledků, než jeho rozšířená verze SDIp. Byl lepší při vysokých citlivostech, při kterých už ale dosahoval obrovského množství falešných detekcí. ROD detektor dosahoval podobných výsledků jako SDI detektory. Jeho jednodušší verze sROD poskytla ve všech případech nejmenší počet falešných detekcí. Často ale zároveň s nejmenším procentem správně detekovaných skvrn. Pokud záleží na co nejmenším počtu falešných detekcí, je sROD nejlepší volbou. Z binárních map detekcí sROD detektoru je vidět, že často nedetekuje kompletní skvrnu. To je však možno opravit následným zpracováním (viz. Sekce 3.3), které z sROD detektoru může udělat mocný nástroj pro detekci jednosnímkových artefaktů.



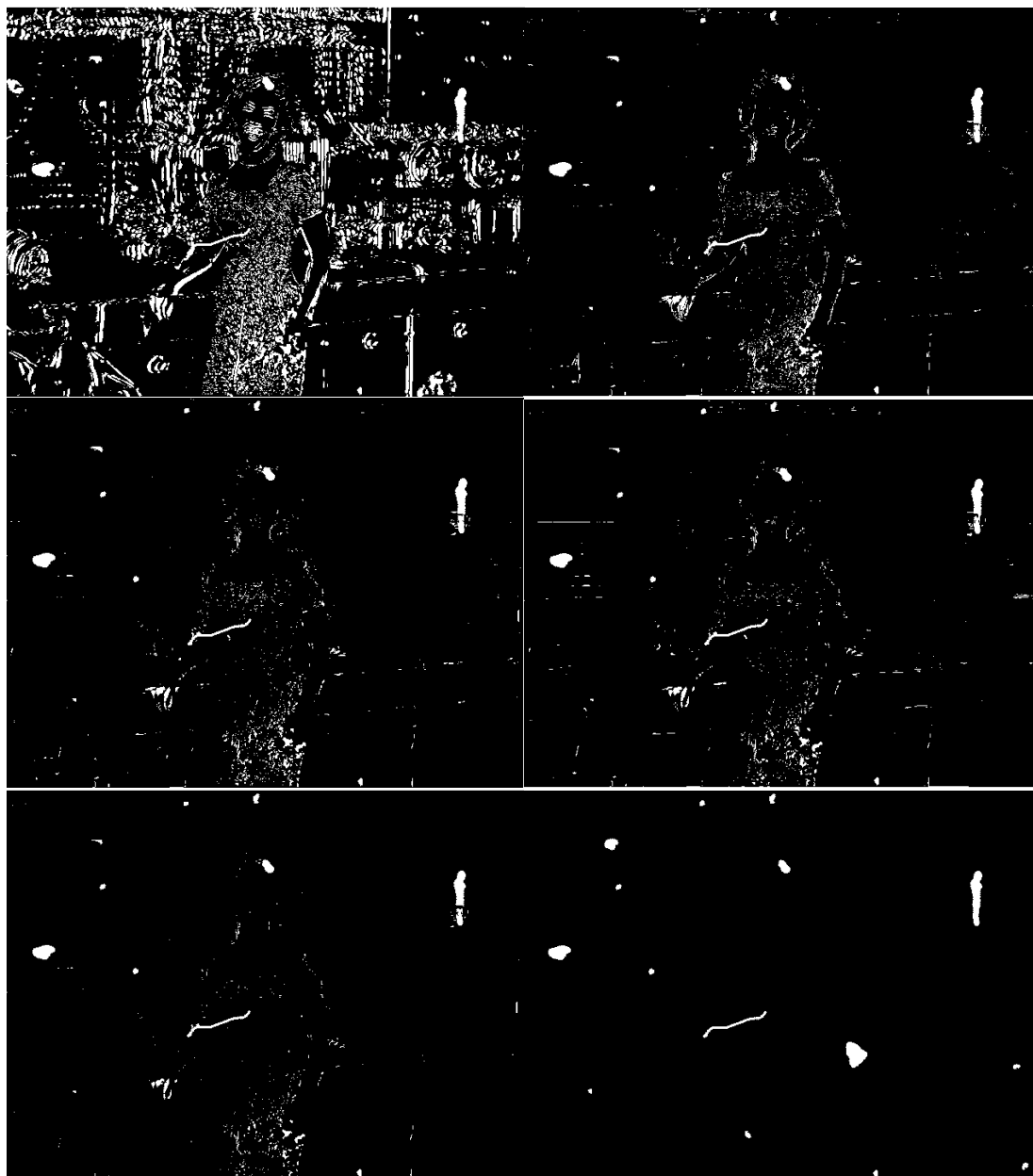
Obr. 5.6 – Detekce skvrn jednotlivými detektory ve snímku 11 sekvence ROD1 při $T1=8$. První řada vlevo: Storey; První řada vpravo: SDIa; Druhá řada vlevo: SDIp; Druhá řada vpravo: ROD; Třetí řada vlevo: sROD; Třetí řada vpravo: reálná mapa uměle vytvořených skvrn



Obr. 5.7 – Detekce skvrn jednotlivými detektory ve snímku 11 sekvence ROD1 při $T_1=25$. První řada vlevo: Storey; První řada vpravo: SDIa; Druhá řada vlevo: SDIp; Druhá řada vpravo: ROD; Třetí řada vlevo: sROD; Třetí řada vpravo: reálná mapa uměle vytvořených skvrn



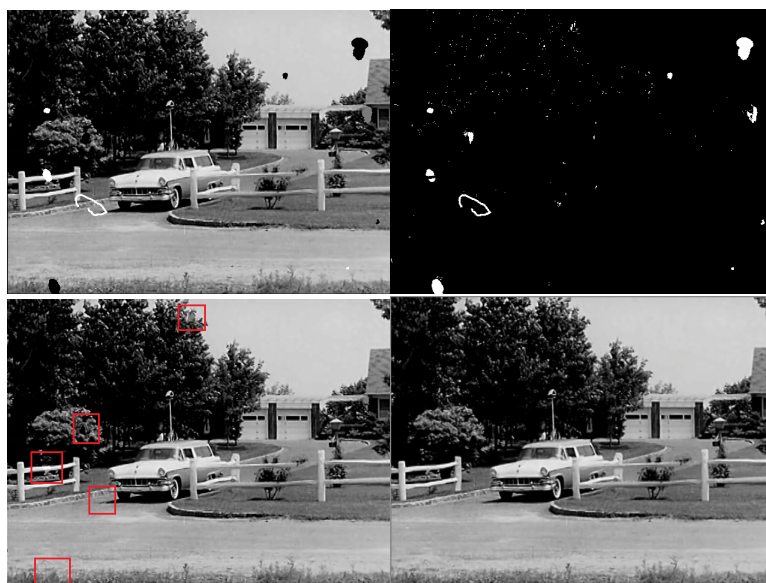
Obr. 5.8 – Detekce skvrn jednotlivými detektory ve snímku 14 sekvence ROD2 při $T1=8$. První řada vlevo: Storey; První řada vpravo: SDIa; Druhá řada vlevo: SDIp; Druhá řada vpravo: ROD; Třetí řada vlevo: sROD; Třetí řada vpravo: reálná mapa uměle vytvořených skvrn



Obr. 5.9 – Detekce skvrn jednotlivými detektory ve snímku 14 sekvence ROD2 při $T_1=25$. První řada vlevo: Storey; První řada vpravo: SDIa; Druhá řada vlevo: SDIp; Druhá řada vpravo: ROD; Třetí řada vlevo: sROD; Třetí řada vpravo: reálná mapa uměle vytvořených skvrn

5.2 Potlačení jednosnímkových artefaktů

K rekonstrukci obrazové informace v oblastech detekovaných skvrn byl použit ML3Dex filtr [21], který by měl při správné pohybové kompenzaci poskytovat uspokojivou rekonstrukci. Ve složce Implementace na přiloženém CD je k dispozici matlabový kód implementovaného filtru. Na Obr. 5.10 a Obr. 5.11 je ukázán výsledek rekonstrukce dvou snímků z uměle zkreslených sekvencí FORD1 a FORD2, kde je možno výsledek rekonstrukce porovnat s nezkresleným obrázkem. Skvrny v obou snímcích byly detekovány detektorem sROD s $T1=25$. Výsledky rekonstrukce jsou pro oba snímky uspokojivé. Rekonstruovaný snímek se od skutečného nezkresleného snímku liší pouze v místech, kde nedošlo k detekci kompletní skvrny (červeně označené oblasti v rekonstruovaných snímcích na Obr. 5.10 a Obr. 5.11). Při shlednutí celé rekonstruované sekvence však ve snímcích problikávají rušivé elementy způsobené nedokonalou detekcí.



Obr. 5.10 – Restaurace snímku 11 sekvence FORD1; Vlevo nahoře: Uměle zkreslený snímek 11; Vpravo nahoře: Skvrny detekované detektorem sROD s $T1=25$; Vlevo dole: Restaurace filtrem ML3Dex; Vpravo dole: Původní snímek 11 bez uměle přidáných skvrn.

Pro ilustraci vhodné volby citlivost detektoru a důležitosti správné pohybové kompenzace byly rekonstruovány také vybrané části sekvence AGE obsahující velké množství skutečných jednosnímkových artefaktů. Sekvence zaznamenává ruku píšící perem na papír a obsahuje úseky s nepatrným ale také s velmi rychlým pohybem.

Na Obr. 5.12 jsou vidět tři po sobě jdoucí snímky sekvence AGE, z nichž prostřední byl restaurován. Jedná se o případ, kdy se scéna téměř nehýbe. ML3Dex filtr byl použit pro pixely označené detektorem sROD a to pro dvě různá nastavení citlivosti ($T1=8$ a $T1=25$). Na Obr. 5.12 jsou vidět také binární mapy zobrazující pixely označené detektorem za skvrny a snímky rekonstruované na základě těchto detekcí. Při vyšší citlivosti detektoru došlo k falešnému označení několika nezkreslených pixelů. Výsledná rekonstrukce obrázku je však uspokojivá. K žádnému přidavnému zkreslení nedošlo. Pro nižší citlivost detektoru však nedošlo k označení všech pixelů skvrn a v rekonstruovaném obrázku tak některé části skvrn zůstaly. Při přehrávání restaurované sekvence působí rušivým dojmem.

Pokud ve scéně dojde k patologickému pohybu a pohybové vektory nejsou určeny správně, může při rekonstrukci dojít k výraznému zkreslení, které bude působit mnohonásobně rušivěji, než původní skvrny. Takový případ je ukázán na Obr. 5.13. Opět jsou zde tři snímky ze

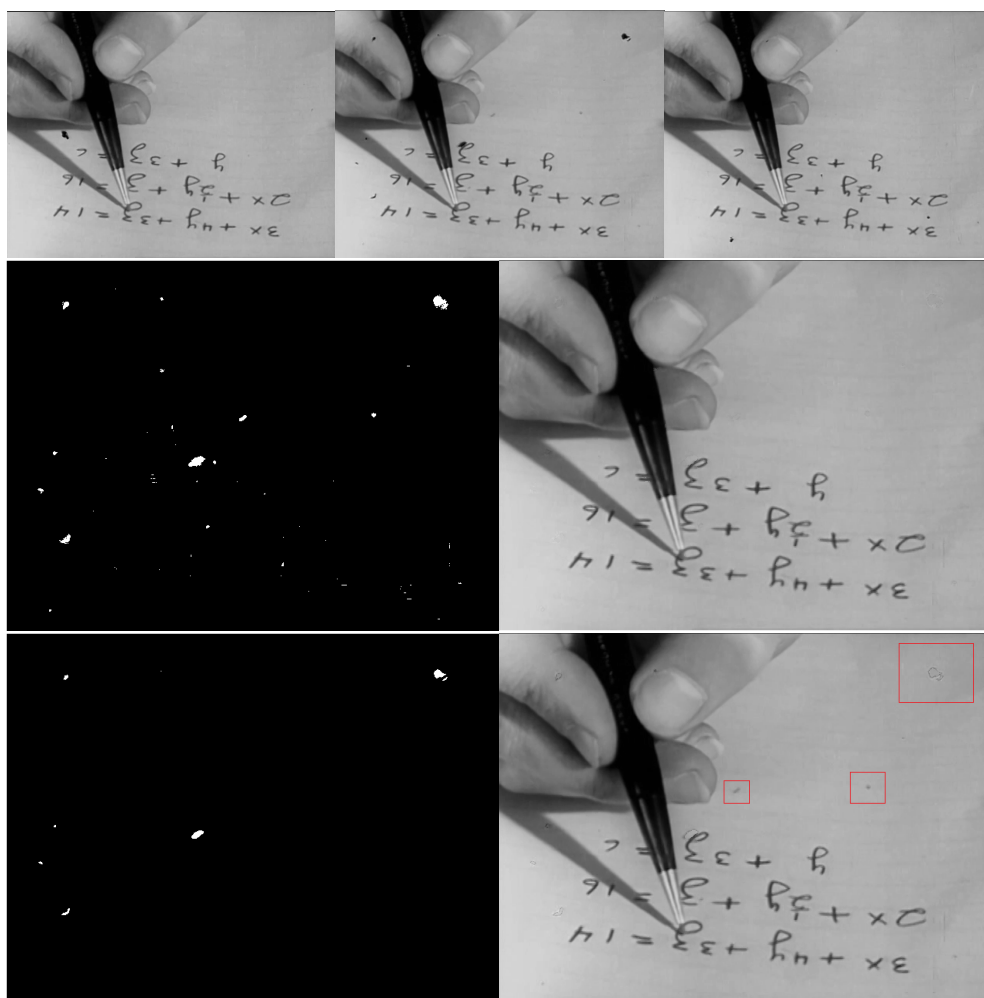


Obr. 5.11 – Restaurace snímku 14 sekvence FORD2; Vlevo nahoře: Uměle zkreslený snímek 14; Vpravo nahoře: Skvrny detekované detektorem sROD s $T1=25$; Vlevo dole: Restaurace filtrem ML3Dex; Vpravo dole: Původní snímek 14 bez uměle přidaných skvrn.

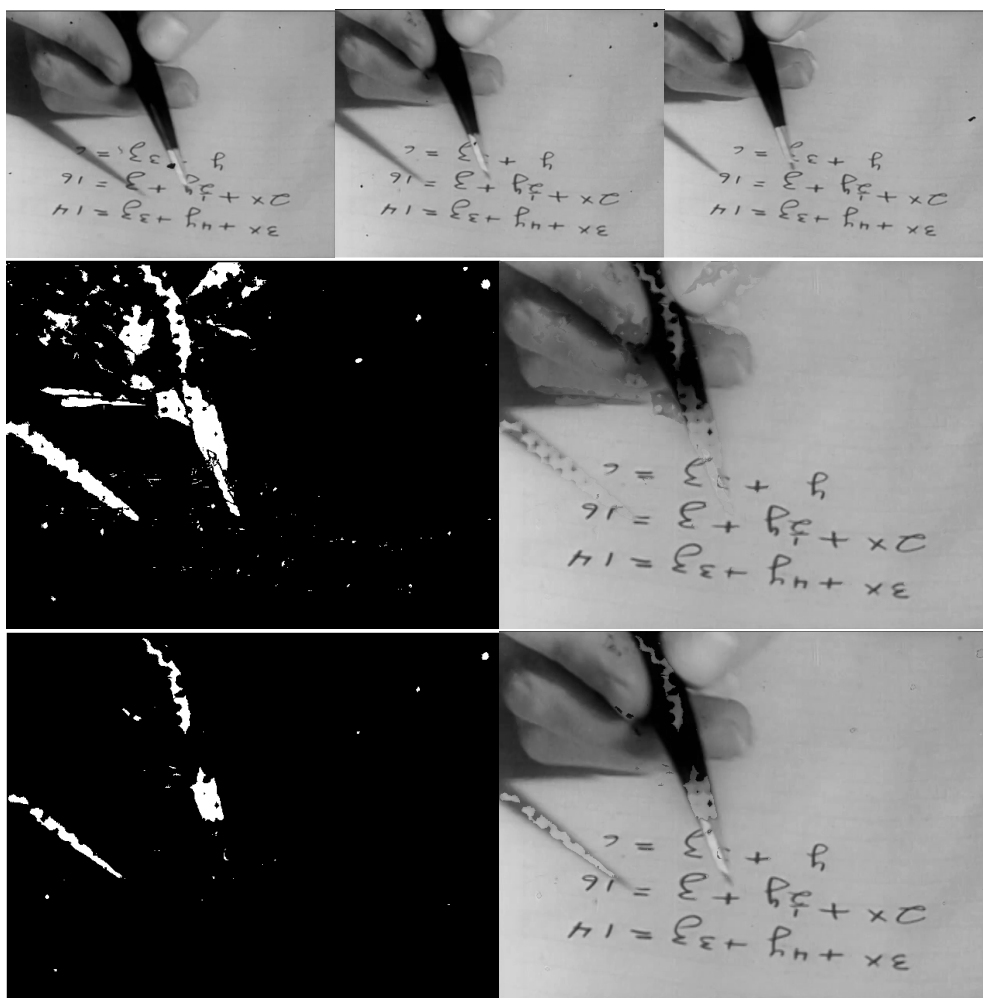
sekvence AGE, tentokrát však z části, kde se ruka rychle pohybuje. Rozdíl pozice ruky v jednotlivých snímcích přesahuje poloměr vyhledávací oblasti použité při kompenzaci pohybu, který byl nastaven na $SA=8$ pixelů. Proto nedojde ke správnému odhadu pohybových vektorů. Při porovnávání jasu daných pixelů v předchozím a následujícím snímku s jasnou pixelu v současném snímku v oblasti pera, odkazují pohybové vektory detektor patrně na pixely představující papír. Je tak falešně detekována skvrna a to v poměrně rozsáhlé oblasti. Viz Obr. 5.13, který ukazuje mapy detekcí detektoru sROD pro $T1=8$ a $T1=25$. Při rekonstrukci pixelů označených v těchto mapách, je využíváno stejných nesprávně odhadnutých pohybových vektorů, které způsobí, že ML3Dex filtr nahradí pixely představující pero pixely, které představují papír. V takovém případě je žádoucí, aby bylo falešných detekcí co nejméně, na rozdíl od předchozího příkladu části sekvence bez pohybu, kdy falešné detekce nevadily. Při rekonstrukci obrazu pomocí výstupu detektoru s citlivostí $T1=25$ dojde k o něco málo menšímu zkreslení, než při citlivějším nastavení detektoru $T1=8$.

V případě použití většího poloměru vyhledávací oblasti ($SA=64$ pixelů), kterou využívá algoritmus pro kompenzaci pohybu, bylo dosaženo lepšího výsledku detekce i rekonstrukce (viz Obr. 5.14), přesto je však stále rekonstruovaný obrázek procesem odstranění skvrn spíše více zkreslen, než vylepšen.

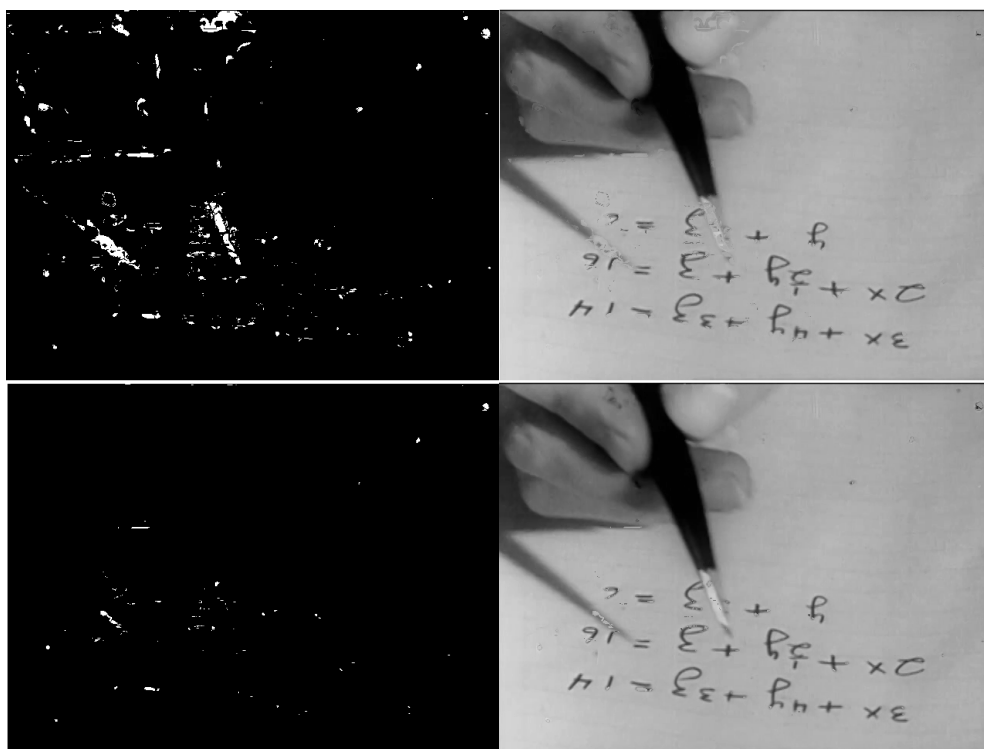
Pro nižší citlivost detektoru je přídavné zkreslení menší, avšak detektor nedetekoval všechny skvrny. Došlo tedy ke zkreslení obrázku díky procesu eliminace skvrn a skvrny navíc ani nebyly odstraněny korektně. Pro vyšší citlivost detektoru je eliminace skvrn lepší, ale zkreslení vzniklé neodhadnutelnými pohybovými vektory je výraznější. Kvalita pohybové kompenzace má tedy ohromný vliv na detekci i odstranění jednosnímkových artefaktů.



Obr. 5.12 – Restaurace snímku 49 sekvence AGE. První řada: snímek 48, 49 a 50; Druhá řada: Mapa detekovaných skvrn sROD detektorem s $T1=10$, Restaurace detekovaných skvrn filtrem ML3Dex; Třetí řada: Mapa detekovaných skvrn sROD detektoru s $T1=50$, Restaurace detekovaných skvrn filtrem ML3Dex;



Obr. 5.13 – Restaurace snímku 38 sekvence AGE. První řada: snímek 37, 38 a 39; Druhá řada: Mapa detekovaných skvrn sROD detektorem s $T1=10$, Restaurace detekovaných skvrn filtrem ML3Dex; Třetí řada: Mapa detekovaných skvrn sROD detektorem s $T1=50$, Restaurace detekovaných skvrn filtrem ML3Dex;



Obr. 5.14 – První řada: Mapa detekovaných skvrn sROD detektorem s $T1=10$ a kompenzací pohybu s $SA=64$, Restaurace detekovaných skvrn filtrem ML3Dex; Druhá řada: Mapa detekovaných skvrn sROD detektorem s $T1=50$ a kompenzací pohybu s $SA=64$, Restaurace detekovaných skvrn filtrem ML3Dex;

Kapitola 6

Zhodnocení implementovaných metod pro potlačení vertikálních škrábanců

V této kapitole je zhodnocena účinnost implementovaných prostorových detektorů vertikálních škrábanců. Je zde diskutována výhoda metody, jíž je nutné nastavit citlivost, oproti automatické metodě, jejíž výsledek nelze ovlivnit. Je také zhodnocena účinnost jednoho časového detektoru, kterým byly filtrovány prostorové detekce. Nalezené vertikální škrábance jsou zde také odstraněny implementovanou metodou s různými nastaveními.

6.1 Detekce vertikálních škrábanců

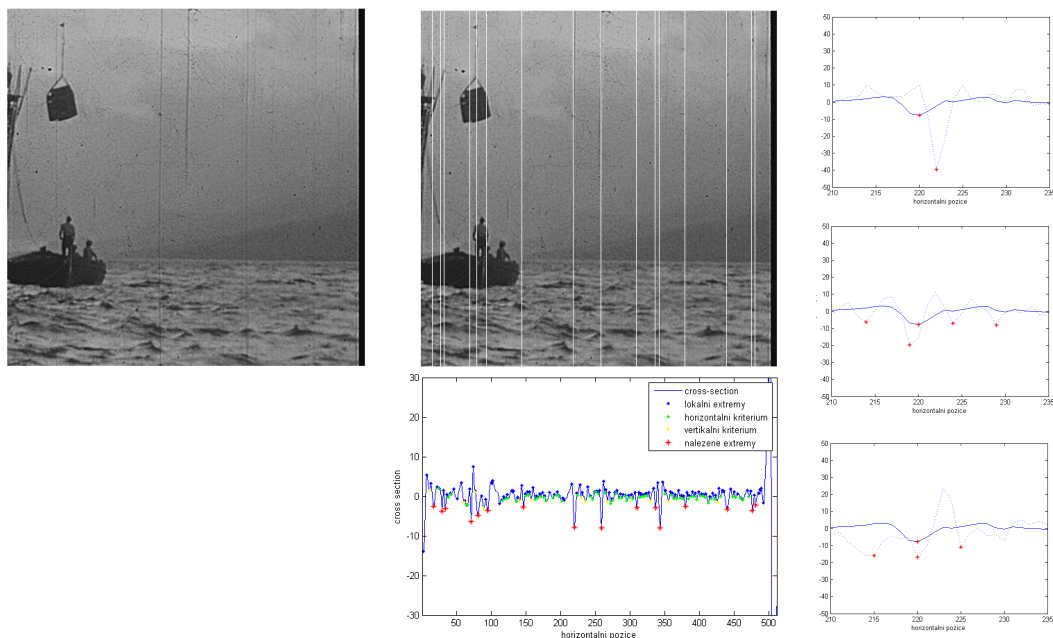
Pro detekci vertikálních škrábanců byly implementovány dva prostorové detektory Bruni [28] a Wavelet [33] a jeden časový detektor [37]. Implementace jsou k dispozici v podobě matlab souborů ve složce Implementace na přiloženém CD. Účinnost jednotlivých detektorů byla testována na sekvencích MAPLE, WAR a MOUNT, které jsou vzaty z databáze vyrobené v rámci této práce (viz Kapitola 7). Prostorové detektory byly navíc testovány na snímku SITDOWN, který je z CD přiloženého ke knize [21].

Detektor Bruni

Jedná se o automatický detektor, jehož jedinou nastavovanou hodnotou je barva škrábanců (světlý - tmavý). Výstupem jsou pouze horizontální pozice nalezených škrábanců. U sekundárních škrábanců tedy nelze určit, v jaké výšce obrázku začínají a kde končí. To může při rekonstrukci obrázku způsobit zkreslení nepoškrábaných oblastí obrázku.

Obr. 6.1 ukazuje jak si metoda detekce vertikálních škrábanců vedla na snímku SITDOWN, který obsahuje velké množství jak principiálních, tak sekundárních škrábanců. Spousta škrábanců má navíc velmi nízký kontrast. Metoda detekovala většinu škrábanců (viz Tab. 6.1), dokonce i těch s nízkým kontrastem. Zároveň ale označila za škrábanec lano v levé horní části obrázku, které je součástí původní obrazové informace. Obr. 6.1 také ukazuje, že vertikální škrábanec nepředstavuje zcela chybějící obrazovou informaci. Je zde ukázán profil škrábance na pozici 220 v různých výškách obrázku. V horní části obrázku, kde je obrazová informace v okolí škrábance bez detailu, odpovídá profil škrábance modelu Obr. 4.1. Je symetrický, největší amplitudu má ve svém středu a má dva postranní laloky s opačnou polaritou. Níže v obrázku, kde je již více detailů, se amplituda škrábance výrazně snižuje a neleží přesně ve středu škrábance.

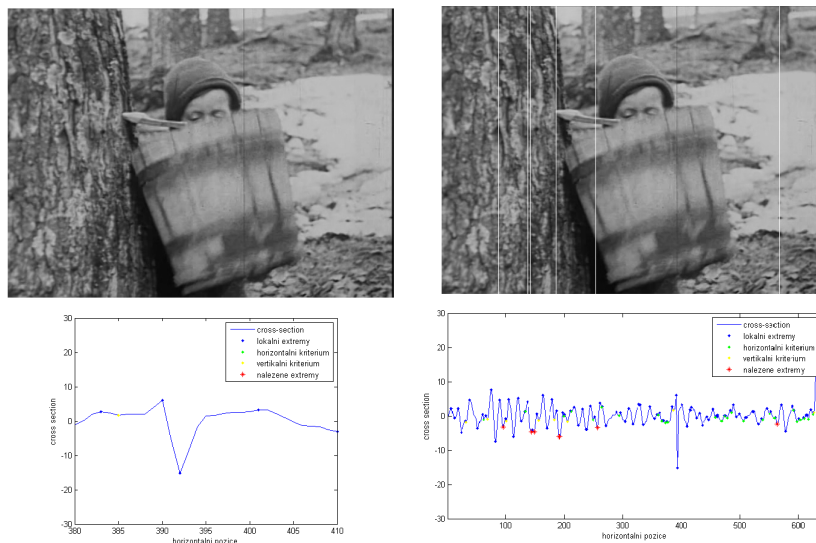
Profil škrábance již díky okolní obrazové informaci není symetrický. Ve spodní části obrázku je dokonce jeden lalok výrazně nižší. Lze předpokládat, že v případě výrazně strukturovaného obrázku by se detaily mohly promítnout do celkového horizontálního jasového průřezu obrázku a deformovat profil škrábance, který by tak nemusel být detekován.



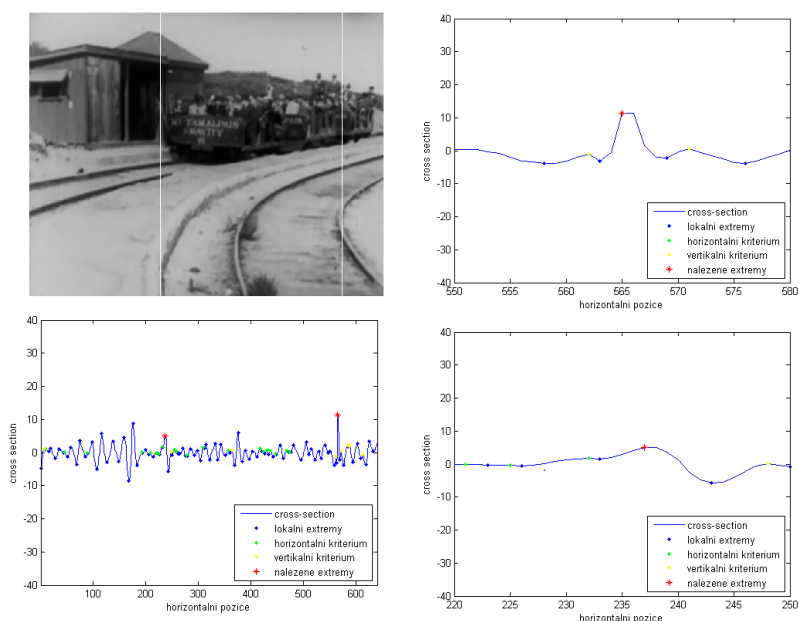
Obr. 6.1 – První sloupec: Snímek SITDOWN; Druhý sloupec: vertikální škrábance detekované detektorem Bruni označené bíle; horizontální jasový průřez obrázku, červeně vyznačeny detekované škrábance. Třetí sloupec: Detail horizontálního jasového průřezu škrábance na horizontální pozici 220, postupně ve 14. 243. a 494. řádku obrázku.

Ukázkou toho je škrábanec ve snímku 50 sekvence MAPLE na Obr. 6.2, jehož postranní lalok je deformován obrazovou informací natolik, že je jeho maximum horizontálně posunuto dále od středu, a profil škrábance tak nesplňuje šířkové kritérium, podle něhož musí být dva sousední extrémy středu škrábance vzájemně vzdáleny o méně než 10 pixelů.

Na Obr. 6.3 je ještě k vidění snímek 60 sekvence MOUNT, v níž byl detekován jeden falešný škrábanec. V pravé části obrázku je vidět horizontální jasový průřez v oblasti skutečného škrábance. Ten víceméně odpovídá modelu. Horizontální jasový průřez v oblasti falešné detekce, který je k vidění pod ním ale vůbec ne. Vzdálenost sousedních minim v oblasti tohoto za škrábanec falešně označeného maxima však splňuje šířkové kritérium. Pro ověření splnění vertikálního kritéria metoda používá průměr rozdílů jasové hodnoty zkoumaného extrému a dvou extrémů, které s ním sousedí. Právě lokální minimum má výrazně nižší jasovou hodnotu, než levé, díky čemuž je tento průměr veliký a tento lokální extrém tak splňuje i vertikální a energetické kritérium.



Obr. 6.2 – Vlevo nahoře: Snímek 60 sekvence MAPLE; Vlevo dole: detail horizontálního jasového průřezu v oblasti jediného škrábance; Vpravo nahoře: Vertikální škrábance detekované detektorem Wavelet s prahovou hodnotou 200 označené bíle; Vpravo dole: horizontální jasový průřez obrázku, červeně vyznačeny detekované škrábance

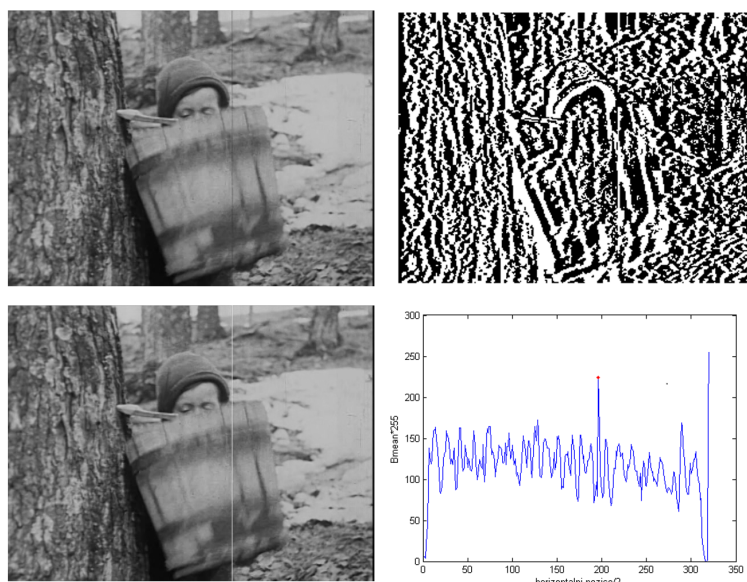


Obr. 6.3 – Vlevo nahoře: Snímek 60 sekvence MOUNT, bíle vyznačené vertikální škrábance detekované Bruni a Vitulanem; Vlevo dole: Horizontální jasový průřez a červeně vyznačené detekované škrábance; Vpravo nahoře: Detail horizontálního jasového průřezu skutečného škrábance; Vpravo dole: Detail horizontálního jasového průřezu falešného poplachu

Wavelet

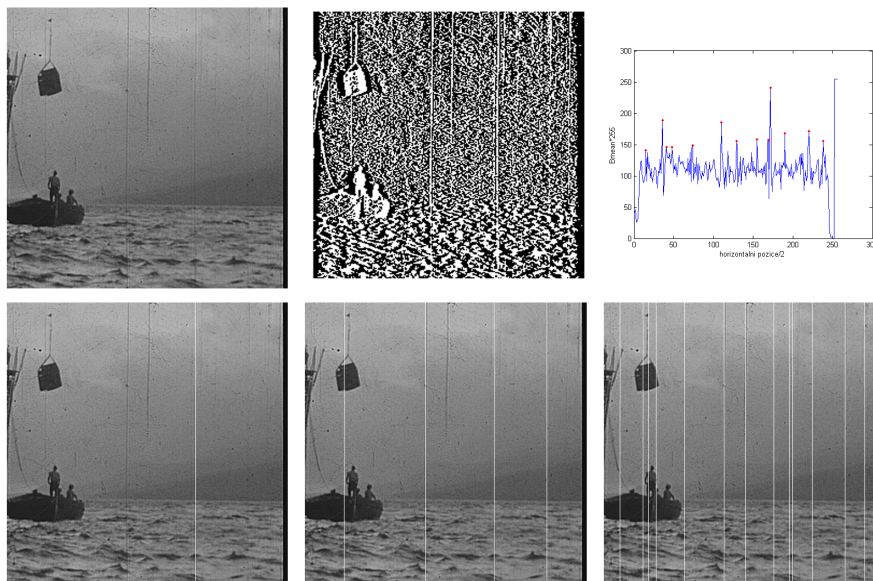
Jedná se o metodu prostorové detekce vertikálních škrábanců ve frekvenční oblasti, do které je obrázek převeden vlnkovou transformací [33]. Tomuto detektoru je kromě barvy potřeba nastavit ještě jeden parametr - prahovou hodnotu, která představuje jeho citlivost.

Obr. 6.4 ukazuje snímek 50 sekvence MAPLE, který obsahuje jeden tmavý principiální vertikální škrábanec. Je zde vidět také binární obraz vysokých frekvencí v horizontálním směru vytvořen na základě unsharp maskování a vertikální průměr sloupců tohoto obrazu, ve kterém jsou nalezena lokální maxima. Pozice obrázku, ve kterých je lokální maximum vertikálního průměru sloupců binárního obrázku větší, než nastavená prahová hodnota, jsou označeny za pozice vertikálních škrábanců. Nižší prahová hodnota znamená větší citlivost detektoru. Tu je třeba nastavit v sekvencích se sekundárními škrábanci, jak je vidět na Obr. 6.5, který ukazuje výsledky detekce na snímku SITDOWN pro tři různá nastavení citlivosti. Při prahové hodnotě, která ve snímku 50 sekvence MAPLE k uspokojivé detekci stačila, je na snímku SITDOWN odhalen jediný škrábanec z mnoha. Je tedy vidět, že pro detekci sekundárních škrábanců je potřeba nastavit nižší prahovou hodnotu.

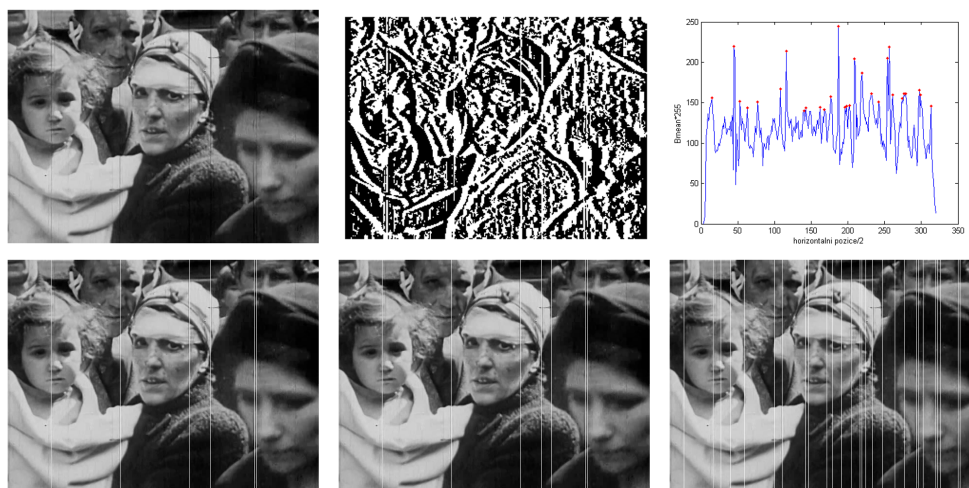


Obr. 6.4 – Vlevo nahoře: Snímek 50 sekvence MAPLE; Vlevo dole: Bíle vyznačené detekované vertikální škrábance metodou Wavelet; Vpravo nahoře: binární obraz B označující jedničkami oblasti s vysokými frekvencemi v horizontálním směru; Vpravo dole: Vertikální průměr každého sloupce B násoben 255

To může v některých sekvencích způsobit velký počet falešných detekcí. Příkladem toho je snímek 130 sekvence WAR na Obr. 6.6. Výrazné principiální škrábance jsou detekovány už při prahové hodnotě 200. Některé slabší škrábance, které jsou však v obrázku jasně vidět, jsou ale detekovány až při prahové hodnotě 140, kdy už také dojde k velkému množství falešných detekcí díky struktuře obrázku.



Obr. 6.5 – Horní řada: Snímek SITDOWN, binární obraz vysokých frekvencí v horizontálním směru a vertikální průměr ve sloupcích tohoto obrazu s červeně vyznačenými maximy, která byla označena za škrábance v případě nastavení prahové hodnoty na 140. Spodní řada: Detekce vertikálních škrábanců ve snímku SITDOWN zleva doprava s nastavením prahové hodnoty 200, 170 a 140.



Obr. 6.6 – Horní řada: Snímek WAR130, binární obraz vysokých frekvencí v horizontálním směru a vertikální průměr ve sloupcích tohoto obrazu s červeně vyznačenými maximy, která byla označena za škrábance v případě nastavení prahové hodnoty na 140. Spodní řada: Detekce vertikálních škrábanců ve snímku WAR130 zleva doprava s nastavením prahové hodnoty 200, 170 a 140.

Obr. 6.7 ukazuje jakýsi souhrn výsledků detektoru Bruni a detektoru Wavelet se třemi různými nastaveními prahové hodnoty na testovaných snímcích. Zeleně jsou v obrázcích označeny správně detekované vertikální škrábance, červeně jsou označeny falešné detekce. Počty správných a falešných detekcí jsou pro snadné srovnání zaznamenány v Tab. 6.1. Je zde vyčíslen počet

skutečných škrábanců, který byl určen na základě pečlivého pozorování jednotlivých snímků. Pro každý detektor je vyčísleno kolik těchto škrábanců detekoval a kolik podal falešných detekcí. Je třeba poznamenat, že snímky byly vybrány tak, aby ilustrovaly zajímavé situace, které můžou nastat a se kterými si detektory nemusí umět poradit. Například deformace profilu vertikálního škrábance čistou obrazovou informací ve snímku MAPLE50, která způsobí selhání detektoru Bruni, není běžnou záležitostí. V jiných snímcích této sekvence již detektor neměl s detekcí tohoto škrábance problém.



Obr. 6.7 – Detekce vertikálních škrábanců prostorovými detektory. Seshora dolů detektory Bruni, Wav140, Wav170, Wav200. Zleva doprava snímky WAR130, SITDOWN, MAPLE50, MOUNT60. Červeně jsou vyznačeny falešné detekce, zeleně správně detekované škrábance.

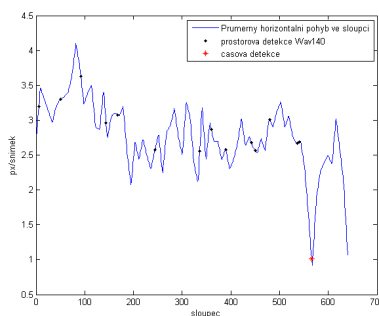
	skutečně	Bruni		Wav140		Wav170		Wav200	
		správně	špatně	správně	špatně	správně	špatně	správně	špatně
WAR130	15	7	2	8	21	7	0	6	0
SITDOWN	19	13	3	11	2	4	0	1	0
MOUNT60	1	1	1	1	26	1	5	1	0
MAPLE50	3	0	6	1	21	1	1	1	0

Tab. 6.1 – Počet vertikálních škrábanců detekovaných oběma prostorovými detektory.

Časový detektor

K filtraci falešných detekcí prostorových detektorů, které jsou způsobeny výraznými vertikálními strukturami obrázku, byl implementován ten nejjednodušší časový detektor [37], který používá pohybové vektory k určení průměrného horizontálního pohybu ve scéně. Pokud pohyb potenciálního škrábance dosahuje alespoň 70 procent pohybu scény, je tento škrábánek označen za falešný poplach. K odhadu pohybových vektorů byl použit Exhaustive Search Block Matching algoritmus s blokem o velikosti 16x8 pixelů, který lépe odhadne pohyb vertikálních struktur ve scéně. Poloměr vyhledávací oblasti byl nastaven na 8 pixelů, protože větší pohyb ve scéně nebyl předpokládán a navíc jde především o hledání lokálních minim průměrného horizontálního pohybu scény.

Na Obr. 6.8 je vidět průměrný horizontální pohyb ve snímku 120 sekvence MOUNT, který obsahuje jediný světlý principiální vertikální škrábánek. Černě jsou vyznačeny falešné detekce detektoru Wavelet s vysokou citlivostí (prahová hodnota 140). Červeně je vyznačena jediná detekce, kterou časový detektor uznal za skutečný vertikální škrábánek. V její oblasti je skutečně minimální horizontální pohyb.

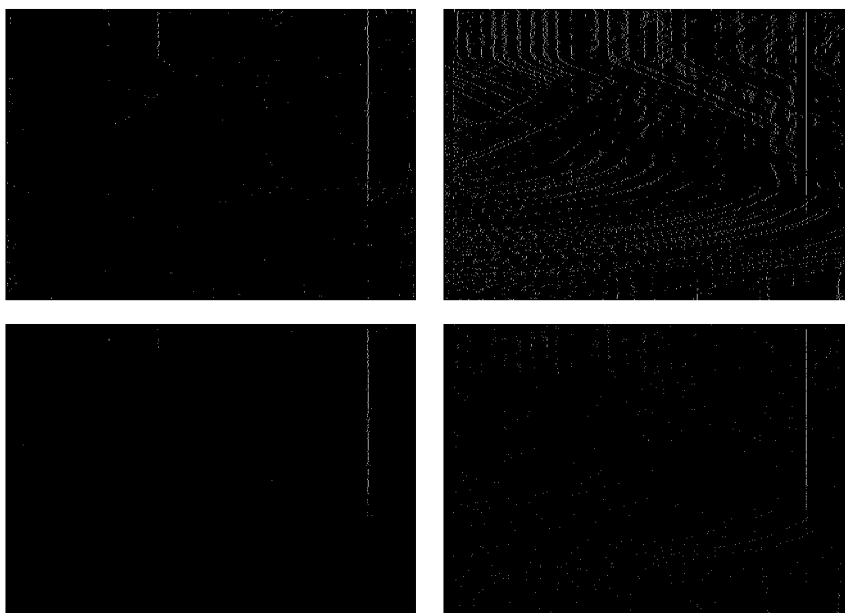


Obr. 6.8 – Průměrný horizontální pohyb ve snímku 120 sekvence MOUNT.

Výsledky časového detektoru jsou nejlépe vidět na časové mapě detekcí, což je binární obrázek, který označuje horizontální polohy detekovaných vertikálních škrábanců v čase. Vertikální osa obrázku představuje časovou osu (jednotlivé snímky), horizontální osa představuje horizontální pozici v obrázku a jedničky představují detekované škrábance. Na Obr. 6.9 jsou vidět mapy detekcí v sekvenci MOUNT pro jednotlivé detektory. V horní části obrázku jsou mapy detekcí prostorových detektorů Bruni a Wavelet nastaveným na vysokou citlivost (prahová hodnota 140). Potencionální škrábance označené těmito detektory jsou pak zkoumány časovým detektorem. Výsledné mapy jsou v dolní části obrázku. Je vidět, že počet falešných detekcí díky časovému detektoru výrazně poklesl zejména v případě Wavelet detektoru nastaveného na velkou citlivost. Zároveň ale na některých snímcích došlo k označení skutečného škrábance za falešný poplach. V sekvenci MOUNT, kde se za celou dobu vyskytuje pouze jediný světlý vertikální škrábánek ve sloupci 566, lze číselně vyjádřit o kolik časový detektor snížil počet správných i falešných detekcí prostorových detektorů. Výsledky ukazuje Tab. 6.2. Snížení počtu falešných detekcí je žádoucí, aby při rekonstrukci obrázku nedošlo ke zkreslení oblastí, které žádný artefakt neobsahují. Snížení počtu správných detekcí ale způsobí nepříjemné problikávání škrábance v rekonstruované sekvenci.

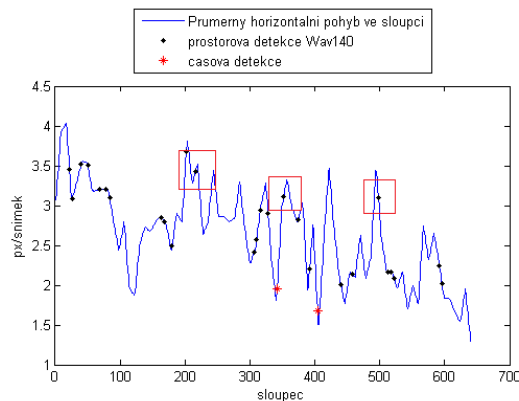
	správně	nesprávně
Bruni	195	405
Bruni-časový	152	77
Wavelet 140	303	6506
Wavelet-časový	238	501

Tab. 6.2 – Počet správných a falešných detekcí v sekvenci MOUNT prostorových detektorů bez použití časového detektoru a s použitím časového detektoru.

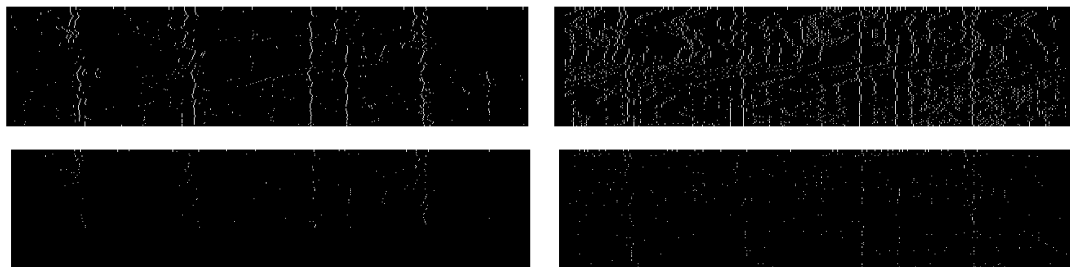


Obr. 6.9 – sekvence MOUNT. Levý sloupec: Mapa detekcí prostorového detektoru Bruni (nahore), následně zpracování časovým detektorem (dole). Pravý sloupec: Mapa detekcí prostorového detektoru Wavelet s citlivostí 140 (nahore), následně zpracování časovým detektorem (dole).

Sekvence WAR není vhodná pro filtraci tímto časovým detektorem, protože škrábance v této sekvenci nejsou statické. Pohybují se a proto je časový detektor nemůže odhalit, protože průměrný horizontální pohyb v daném sloupci obsahujícím škrábanec je třeba i větší, než v okolí škrábance. Obr. 6.10 ukazuje průměrný horizontální pohyb mezi snímky 45 a 46 sekvence WAR. Černě jsou vyznačeny detekce prostorového detektoru, kterým byl v tomto případě Wavelet s prahovou hodnotou 140. Prostorový detektor označil spoustu falešných detekcí, ale i skutečné škrábance. Některé z nich jsou v obrázku červeně ohraničeny. Jejich průměrný horizontální pohyb však není menší, než pohyb v jejich okolí, protože se pohybují. To, že pozice potenciálních škrábanců neodpovídají přímo lokálním extrémům průměrného horizontálního pohybu je způsobeno lineární interpolací pole pohybových vektorů tak, aby měl každý pixel svůj vlastní vektor. Na 6.11 jsou vidět mapy detekcí prostorových detektorů pro sekvenci WAR. Je vidět, že jsou škrábance v pohybu, protože jejich horizontální poloha v po sobě jdoucích snímcích není stejná. Na 6.11 jsou vidět také příslušné detekční mapy následně filtrace časovým detektorem. Časový detektor v tomto případě eliminoval velké množství správných detekcí.



Obr. 6.10 – Průměrný horizontální pohyb ve snímku 45 sekvence WAR. Červený čtvereček označuje prostorové detekce, které představují skutečný škrábanec, který koná pohyb, (vypozorováno ze sekvence).

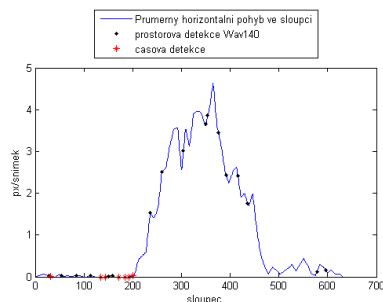


Obr. 6.11 – Sekvence WAR. Levý sloupec: Mapa detekcí prostorového detektoru Bruni (nahore), následně zpracování časovým detektorem (dole). Pravý sloupec: Mapa detekcí prostorového detektoru Wavelet s citlivostí 140 (nahore), následně zpracování časovým detektorem (dole).

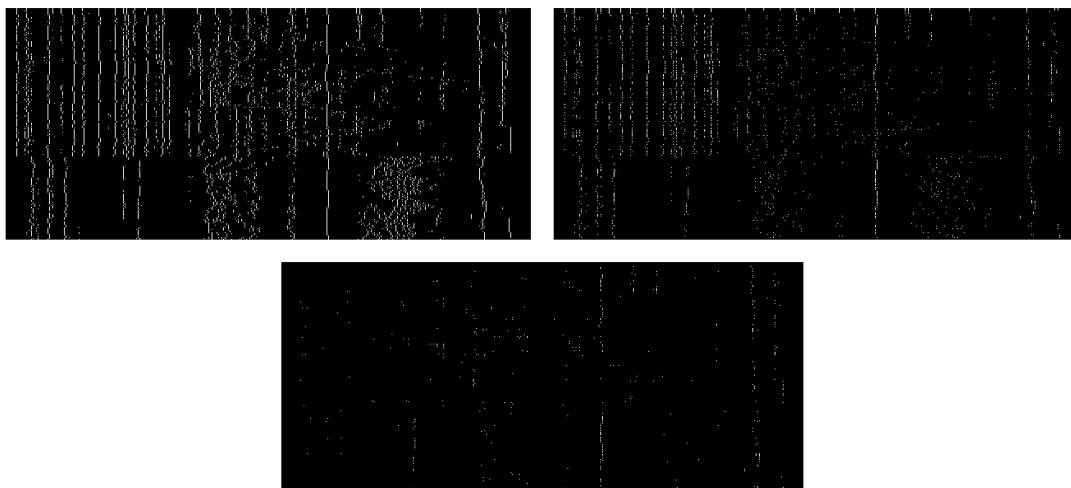
Sekvence MAPLE byla pro časový detektor také zajímavá, protože v určitých úsecích na části snímku skoro nedochází k pohybu. Časový detektor je nastaven tak, že pokud průměrný horizontální pohyb okolí potencionálních škrábanců nepřesáhne hodnotu 0,2 pixelů/snimek, nelze rozhodnout, zda je škrábanec skutečný, nebo ne. Na Obr. 6.12 je vidět průměrný horizontální pohyb ve scéně mezi snímky 45 a 46 sekvence MAPLE. Hýbe se tu pouze vědro, ze kterého chlapec pije. Strom, v jehož oblasti je díky kůře detektorem Wavelet nastaveným na vysokou citlivost 140, detekováno spoustu falešných detekcí, se ale nehýbe vůbec. Okolí škrábanců nesplňuje podmínku minimálního průměrného horizontálního pohybu 0,2 pixelů/snimek a proto detektor tyto falešné detekce označí za skutečné škrábance, protože nemůže rozhodnout, zda jsou skutečné, nebo ne. Zároveň je zde vidět skutečný škrábanec, který je ale časovým detektorem označen za falešnou detekci, protože nesplňuje podmínku alespoň 70 % pohybu svého okolí. To se stalo ve více snímcích sekvence MAPLE. Ve většině z nich by stačilo zvýšit potřebnou hodnotu minimálního průměrného horizontálního pohybu škrábance na 80 % pohybu svého okolí. To by však přineslo větší míru falešných detekcí časového detektoru.

Na Obr. 6.13 jsou vidět mapy detekcí pro prostorový detektor Wavelet 140 a pro jeho následné zpracování časovým detektorem. Spoustu falešných detekcí v sekvenci zůstalo. Ve druhé řadě Obr. 6.13 je také mapa detekcí pro časový detektor použitý na škrábance detekované prostorovým detektorem Wavelet 140, tentokrát je však časový detektor nastaven tak, aby odstranil všechny potencionální škrábance, jejichž okolí nemá průměrný horizontální pohyb větší, než 0,2

pixelů na snímek. Tento obrázek slouží pouze pro ilustraci toho, kolik z falešných detekcí prostorového detektoru je označeno za skutečné škrábance díky nedostatku pohybu ve scéně. V praxi takové nastavení samozřejmě použít nejde, protože detektor nemůže potencionální škrábanec označit za falešnou detekci jen proto, že se nedokáže rozhodnout.



Obr. 6.12 – MAPLE45, průměrný horizontální pohyb.



Obr. 6.13 – Mapa detekcí sekvence MAPLE. Nahoře vlevo: Prostorový detektor Wavelet140; Nahoře vpravo: Následné zpracování časovým detektorem; Dole: Následné zpracování časovým detektorem, který odstraňuje detekce, jejichž okolí má průměrný horizontální pohyb menší, než 0,2 pixelů/snímek

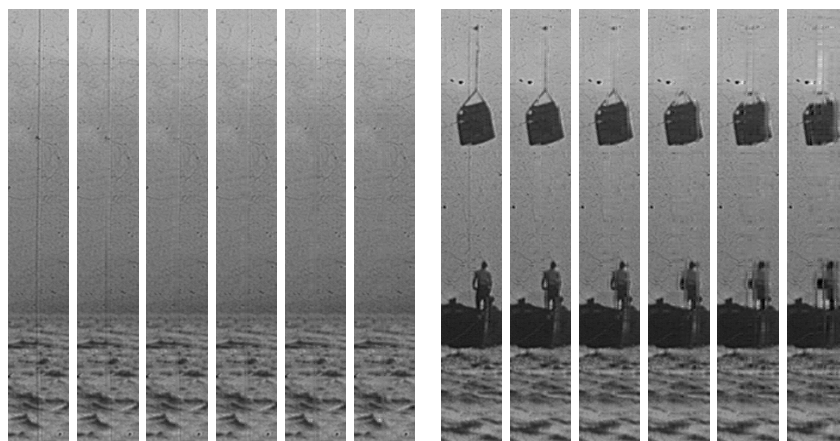
Pro zajímavost byla vytvořena tabulka (Tab. 6.3) počtu správných a falešných detekcí časového detektoru ve snímcích testovaných sekvencí, které byly použity i pro testování prostorových detektorů. Ve srovnání s tabulkou Tab. 6.1 došlo díky použití časového detektoru k odstranění většiny falešných detekcí. Zároveň se ale také výrazně snížil počet správných detekcí. A tak lze shrnout účinnost testovaného časového detektoru. Je účinný v potlačení falešných detekcí v sekvencích, kde dochází k pohybu. Eliminuje ale také výraznou část detekcí správných. Navíc není možné použít ho k detekci pohybujících se škrábanců.

	skutečně	bruní+časový		wav140+časový		wav170+časový		wav200+časový	
		správně	špatně	správně	špatně	správně	špatně	správně	špatně
WAR130	15	1	0	1	0	1	0	1	0
MOUNT60	1	1	0	1	2	1	0	1	0
MAPLE50	3	0	0	0	1	0	0	0	0

Tab. 6.3 – Počet vertikálních škrábanců detekovaných prostorovými detektory následovanými časovým detektorem

6.2 Potlačení vertikálních škrábanců

Implementovaná metoda pro rekonstrukci obrazové informace v oblasti detekovaných vertikálních škrábanců popsaná v Sekci 4.2, byla použita na snímky WAR130, MAPLE50, MOUNT60 a SITDOWN. Parametrem, který se u této metody nastavuje, je poloměr škrábance. Šířka škrábance je rovna dvojnásobku poloměru zvětšenému o jedničku. Závisí na něm jak velká část obrázku v okolí detekované pozice středu škrábance bude interpolovaná a z jak rozsáhlého okolí této oblasti bude použita informace k této interpolaci. Výsledky rekonstrukce obrazové informace v oblasti škrábance na pozici 220 ve snímku SITDOWN pro různé poloměry jsou vidět na Obr. 6.14. Protože je škrábanec křivý, je zcela odstraněn až při velké hodnotě nastaveného poloměru 5 pixelů. To znamená, že 11 sloupcům obrázku bude změněna jasová hodnota na základě hodnoty dvou jejich sousedních pixelů a pět horizontálně sousedních pixelů z každé strany bude použito pro úpravu jasové hodnoty v interpolované oblasti, za účelem méně vyhlazeného vzhledu. V oblastech obrázku bez textury tak velký poloměr rekonstrukce nevadí. Tam, kde se vyskytují detaily pak ale dojde ke zkreslení původní obrazové informace, což je vidět v druhé části Obr. 6.14. Je zde rekonstruována část snímku SITDOWN, ve které jsou detekovány hned dva škrábance vedle sebe. Jeden z nich je však falešný, protože jde o lano, které patří do obrázku. Je dosti tlusté, takže při poloměru rekonstrukce 1 pixel ještě nedojde k jeho odstranění a skutečný škrábanec, který je tenký, bude odstraněn. Při zvyšování poloměru však dochází ke zkreslení předmětu, který lano drží, i člověka stojícího na lodi. Při poloměru 5 pixelů už dokonce dojde ke kolizi obou interpolovaných oblastí a v obrázku se objevují nečekané jasové hodnoty. Malý poloměr tedy zkreslí méně čisté obrazové informace, ale na křivé, nebo tlusté škrábance nemusí stačit.



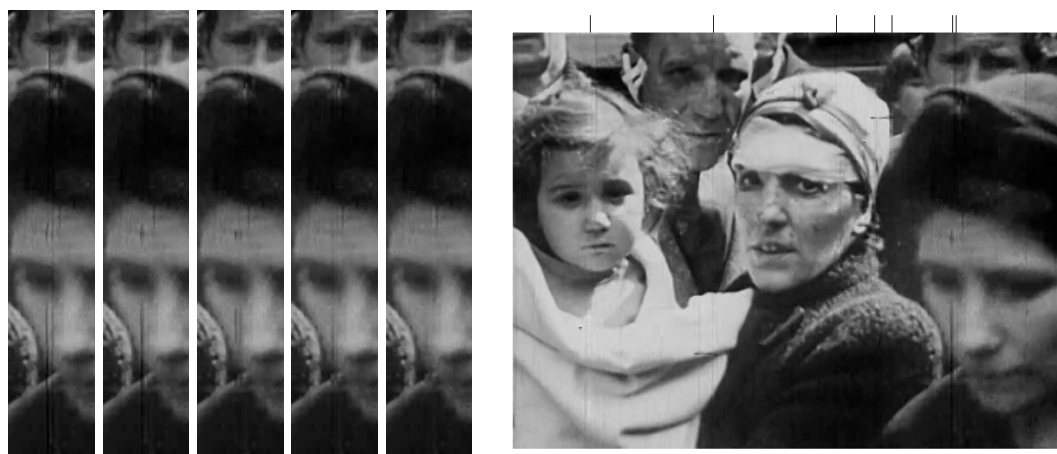
Obr. 6.14 – Rekonstrukce obrazové informace v oblastech dvou různých vertikálních škrábanců detekovaných ve snímku SITDOWN. První je vždy originální zkreslená část snímku a následují rekonstrukce s poloměrem nastaveným postupně na 1, 2, 3, 4 a 5 pixelů.

V sekvenci MAPLE byl vždy správně detekován jediný tmavý vertikální škrábanec, s jehož odstraněním neměla metoda problém. Pouze ve výšce hlavy chlapce ovlivňují rekonstruovanou oblast tmavé jasové hodnoty pixelů představujících čepici a proto se v této oblasti i po rekonstrukci objevuje oblast připomínající krátký vertikální škrábanec (viz Obr. 6.15).



Obr. 6.15 – Vlevo: část snímku MAPLE50 s detekovaným škrábancem. První je originální bez rekonstrukce, následující jsou rekonstruované s poloměrem nastaveným postupně na 1, 2, 3 a 4 pixely. Vpravo: Snímek MAPLE50 rekonstruovaný s poloměrem nastaveným na 2 pixely.

Ve snímku WAR130 se vyskytly podobné problémy jako v SITDOWN. Tenké škrábance byly nejlépe odstraněny s malým poloměrem, při němž však v obrázku zůstaly tlusté nebo sobě blízké škrábance. Se zvýšením poloměru sice byly odstraněny, zvýšila se ale také míra zkreslení obrázku v oblastech tenkých škrábanců. V tomto snímku jsou dva sekundární vertikální škrábance blízko sebe. Dochází zde k zajímavé situaci (viz. Obr. 6.16), kdy je při rekonstrukci každého ze škrábanců využíváno informace toho druhého. Škrábance se tak při menších poloměrech spojí v jeden tlustý škrábanec. Odstraněny jsou až při poloměru 4.



Obr. 6.16 – Vlevo: část snímku WAR130 s detekovanými dvěma škrábanci. První je originální bez rekonstrukce, následující jsou rekonstruované s poloměrem nastaveným postupně na 1, 2, 3 a 4 pixely. Vpravo: Snímek WAR130 rekonstruovaný s poloměrem nastaveným na 1 pixel.

Snímek MOUNT60 obsahuje jediný světlý vertikální škrábanec. V oblasti kolejí je odstraněn uspokojivě už s poloměrem škrábance 1 pixel (Obr. 6.17). V oblasti nebe ale při tak malém poloměru rekonstrukce zůstává tmavý postranní lalok škrábance vzniklý díky difrakci světla na škrábanci (viz Sekci 4.1.1). Ten je odstraněn až při poloměru 3 pixely, kdy už zase dojde k velkému zkreslení obrazové informace v oblasti kolejí.



Obr. 6.17 – Vlevo: část snímku MOUNT60 s detekovaným světlým škrábancem. První je originální bez rekonstrukce, následující jsou rekonstruované s poloměrem nastaveným postupně na 1, 2 a 3 pixely. Vpravo: Snímek MOUNT60 rekonstruovaný s poloměrem nastaveným na 1 pixel.

Kapitola 7

Databáze

V rámci praktické části této práce byla vytvořena databáze krátkých sekvencí digitalizovaných filmových záznamů, které obsahují typické obrazové artefakty. Všechny sekvence pocházejí z Prelinger archivu [41] starých filmových záznamů, který vytvořil Rick Prelinger v roce 1983. Obsahuje skoro 5000 reklamních, vzdělávacích či domácích filmových záznamů, jejichž digitalizované verze jsou k dispozici v internetovém archivu [42] k volnému stažení a vlastnímu použití. Z tohoto archivu byly staženy zajímavé filmové záznamy, z nichž byly vystřiženy vhodné krátké úseky obsahující daný typ zkreslení. Nejčastěji se vyskytujícím artefaktem byly přilnuté nečistoty, náhodné škrábance a odřenininy (v databázi označeny anglickým *blotches*), které nechybí ve skoro žádné ze 185 sekvencí obsažených v databázi. Sekvence jsou rozděleny podle tří úrovní četnosti výskytu a tří úrovní velikosti těchto artefaktů. Druhým nejčastějším artefaktem byly vertikální škrábance v databázi označené anglickým výrazem *line scratches*. Sekvence, ve kterých se objevují, jsou rozděleny podle barvy, délky, pohybu a četnosti škrábanců. Dále je často viděným artefaktem špatně ošetřený střih (*bad cut*), který se může projevit buď jako nečistota způsobená odchlíplou lepenkou, viditelný střih a nebo nepřírozený skok pohybu ve scéně. U sekvencí, v nichž se špatně ošetřený střih objevuje, je zaznamenán čas, ve kterém k této události dojde. Sekvence také často trpí kolísáním pozice obrazu, které je v databázi označeno anglickým *unsteadiness*. Jedná se buď o periodický pohyb celého obrazu, nebo o cestování obrazu díky skluzům způsobeným smrštěnými perforačními otvory. Dále se v sekvencích vyskytuje také kolísání intenzity, šum, trhance, modré vertikální škrábance, chemické vady, vymizení barev apod.

Databáze je vytvořena v MS Excel. U každé sekvence v databázi je zaznamenán rok výroby (pokud je známý), producent a odkaz na internetový archiv, kde je k dispozici celé video, ze kterého byla daná sekvence vybraná. Všechny sekvence jsou k dispozici na přiloženém CD ve složce Databáze, proto je v databázi také název souboru, ve kterém je sekvence k nalezení. Ačkoliv se tato práce nezabývá potlačením artefaktů na barevných digitalizovaných filmových záznamech, obsahuje databáze i barevné sekvence. U každé sekvence je proto uvedeno, zda je barevná (*color*), nebo černobílá (*bw*).

Většinou se v žádné sekvenci nevyskytuje pouze jeden artefakt. U každé sekvence je proto uvedeno artefaktů více. Ve sloupci *hlavní zkreslení* je zaznamenán artefakt, který je v dané sekvenci nejzajímavější. V dalších sloupcích jsou jeho vlastnosti. Například pro vertikální škrábance je v následujících sloupcích barva, délka, pohyb a četnost. Ve sloupci *vedlejší zkreslení* jsou zaznamenány další výrazné artefakty, které se v sekvenci objevují. Jejich vlastnosti už jsou popsány stručně v rámci přehlednosti databáze. Například po málu se vyskytující středně velké přilnuté nečistoty, náhodné škrábance a odřenininy jsou zde označeny jako *blotches21*, kde 2 označuje střední velikost a 1 nízkou četnost.

Při vytváření databáze se vyskytl problém se snímkovou frekvencí, která u všech stažených

videí byla podle normy NTSC 29,976 snímků za sekundu. Snímková frekvence filmu je však 24 snímků za sekundu a dříve bývala nižší (16 snímků za sekundu). Při zvětšení snímkové frekvence skenovaných filmů poskytovaných v internetovém archivu očividně došlo k interpolaci jednotlivých snímků, což způsobilo, že se jednosnímkové artefakty často vyskytují na více než jednom snímku. Všechny v této práci popsané metody pro detekci jednosnímkových artefaktů by tak na těchto sekvencích selhaly. Při testování algoritmů pro potlačení jednosnímkových artefaktů v těchto sekvencích je tak třeba počítat s tímto problémem a vyřešit ho například převedením na nižší snímkovou frekvenci. Dojde tak k vypuštění určité obrazové informace, ale jednosnímkové artefakty budou skutečně jen na jednom snímku.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou archivních záznamů na filmovém materiálu. V první kapitole byla popsána struktura filmového materiálu a způsob, jakým je na něj uložena obrazová informace. Vyplynulo z toho, jak snadno může dojít k jejímu zkreslení, které vede k typickým obrazovým artefaktům, vyskytujícím se v digitalizovaných filmových záznamech. Přehled těchto artefaktů byl vytvořen ve druhé kapitole. Byly zde popsány příčiny vzniku i charakteristické vlastnosti jednotlivých artefaktů, které jsou využívány k jejich detekci a následnému potlačení.

Ve třetí a čtvrté kapitole byly zkoumány principy různých metod pro detekci a potlačení jednosnímkových artefaktů a vertikálních škrábanců, což jsou obrazové artefakty, které se v digitalizovaných záznamech vyskytují nejčastěji. Různé metody detekce mají různou účinnost. Často může být tato účinnost ovlivňována nastavením citlivosti detektoru. Pro vyšší citlivost pak detektor odhalí větší počet artefaktů, zároveň však označí za artefakt i nezkreslené oblasti obrázku, díky čemuž může při rekonstrukci snímku dojít k přídavnému zkreslení. Při nižší nastavené citlivosti však v obrázku zůstanou některé artefakty i po rekonstrukci. Tato problematika byla diskutována v páté kapitole hodnotící implementované metody pro detekci a potlačení jednosnímkových artefaktů. Detektory Storey, SDIa, SDIp, ROD a sROD zde byly porovnávány na dvou uměle zkreslených sekvencích pomocí ROC křivek. Na sekvenci s malou mírou pohybu podával nejlepší výsledky překvapivě detektor Storey, který je nejméně výpočetně náročný, protože nepracuje s pohybově kompenzovanými snímky. Úplně však selhal na sekvenci, kde byl pohyb výraznější. Nejmenšího počtu falešných detekcí dosáhl vždy sROD detektor. Zároveň ale detekoval i nejmenší procento skutečných artefaktů. Různé metody následného zpracování by však mohly toto procento zvýšit a udělat tak z sROD nejúčinnější detektor. Detekované artefakty byly odstraněny pomocí ML3Dex filtru, na jehož výsledcích byl zdůrazněn vliv nesprávně kompenzovaného pohybu scény na potlačení jednosnímkových artefaktů ve zkreslené sekvenci.

Sedmá kapitola byla věnována zhodnocení účinnosti implementovaných detektorů vertikálních škrábanců. Byly zde porovnány dva prostorové detektory Bruni a Wavelet. Bruni je automatický detektor, jehož výsledky nemohou být ovlivněny žádným parametrem. Přestože byly nalezeny situace, ve kterých selhal, celkově vzato podával velmi dobré výsledky. Detektoru Wavelet bylo třeba nastavovat vhodnou citlivost. Docházelo tak ke stejným problémům jako u detektorů jednosnímkových artefaktů. Vyšší citlivost odhalila více skutečných škrábanců, ale také větší počet falešných detekcí. Tyto falešné detekce způsobené výraznými vertikálními strukturami ve scéně byly v některých sekvencích celkem úspěšně eliminovány implementovaným časovým detektorem. Bylo však také ukázáno, že kromě falešných detekcí eliminoval detektor i velkou část detekcí správných. Navíc bylo zjištěno, že ho nelze použít na sekvence bez pohybu a na sekvence s pohybujícími se škrábanci. Obrazová informace v oblastech detekovaných škrábanců byla rekonstruována implementovanou metodou a byly diskutovány výsledky pro různá

nastavení. V rámci této práce vznikla také databáze desítek digitalizovaných filmových záznamů obsahujících typické obrazové artefakty.

Literatura

- [1] The Brava Project [online]. BRAVA. [vid. 13.4.2014]. Dostupné z: <http://brava.ina.fr/>
- [2] Preservation towards storage and access. Standardised Practices for Audiovisual Contents in Europe. [online]. PrestoSpace. [vid. 13.4.2014]. Dostupné z: <http://www.prestospace.org/>
- [3] DIAMANT Suite- Digital film restoration system [online]. Diamant [vid. 1.12.2013] Dostupné z: <http://diamant.joanneum.at/>
- [4] Byung Tae Oh; Shaw-Min Lei; Kuo, C.-C.J., "Advanced Film Grain Noise Extraction and Synthesis for High-Definition Video Coding," Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on , vol.19, no.12, pp.1717-1729, Dec. 2009
- [5] Reilly, J.M.. "IPI Storage Guide for Acetate Film: Instructions for Using the Wheel, Graphs, and Table : Basic Strategy for Film Preservation", Rochester Institute of Technology. Image Permanence Institute, 2009.
- [6] Timeline of Historical Film Colors [online]. Zauberklang [vid. 10.11.2013] Dostupné z: <http://zauberklang.ch/filmcolors/timeline-entry/1214//>
- [7] Fabulous Technicolor! [online]. In70mm [vid. 10.11.2013] Dostupné z: <http://www.in70mm.com/news/2010/technicolor/>
- [8] Černobílý film [online]. Jaroslav Reichl. [vid. 20.2.2014]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/511-chernobily-film>
- [9] Šmok, Pecák, Tausk. Barevná fotografie. 2. upravené vydání. Praha, SNTL, 1978
- [10] Film Restoration [online]. Diamant [vid. 1.12.2013] Dostupné z: http://diamant.joanneum.ac.at/film_restoration/
- [11] Lucia Maddalena, Alfredo Petrosino , "Restoration of blue scratches in digital image sequences", ICER CNR , 2009
- [12] Gusev, K., "Image unsteadiness correction in archive film scanners," Consumer Electronics (ICCE), 2013 IEEE International Conference on , pp.118-120, 11-14 Jan. 2013
- [13] Forbin, G.; Vlachos, T., "Nonlinear Flicker Compensation for Archived Film Sequences Using Motion-Compensated Graylevel Tracing," Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on , vol.18, no.6, pp.803-816, June 2008
- [14] T. Vlachos and G. A. Thomas, "Motion estimation for the correction of twin-lens telecine flicker," Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing, vol. 1, pp. 109–112, 1996.
- [15] D. Sidorov and A. Kokaram, "Suppression of moiré patterns via spectral analysis," Proc. SPIE, vol. 4671, pp. 895–906, Jan. 2002

- [16] Corrigan, D.; Kokaram, A.; Harte, N., "Algorithms for the Digital Restoration of Torn Films," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol.21, no.2, pp.573-587, Feb. 2012
- [17] Kevin Shaw, *Color Restoration for Film*, Finalcolor inc, Kevin Shaw, 2002 [10.11.2013]
Dostupné z <http://www.finalcolor.com/acrobat/ColorRestorfc.pdf>
- [18] D. Tzovaras, M. G. Strintzis, and H. Sahinolu, "Evaluation of multiresolution block matching techniques for motion and disparity estimation," *Signal Processing: Image Commun.*, vol. 6, pp. 56–67, 1994
- [19] A. Rares, J. T. Reinders, J. Biemond. Statistical Analysis of Pathological Motion Areas. *IEEE Seminar on Digital Restoration of Film and Video Archives*, 2001.
- [20] P. Schallauer, A. Pinz, W. Haas, Automatic restoration algorithms for 35mm film, *J. Comput. Vision Res.* 1 (3) (1999) 59–85.
- [21] A.C. Kokaram, *Motion Picture Restoration*, Springer- Verlag, Berlin, Germany, 1998.
- [22] R.C. Hardie, C.G. Boncelet, LUM filters: a class of rankorder- based filters for smoothing and sharpening, *IEEE Trans. Signal Process.* 41 (3) (1993) 1061–1076.
- [23] A. Nieminen, P. Heinonen, Y. Neuvo, A new class of detail preserving filters for image processing, *IEEE Trans. PAMI* 9 (1) (1987) 74–90.
- [24] G.R. Arce, Multistage order statistic filters for image sequence processing, *IEEE Trans. Signal Process.* 39 (5) (1991) 1146–1163.
- [25] O. Buisson, B. Besserer, S. Boukir, F. Helt. Deterioration Detection for Digital Film Restoration. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, pp. 78-84.
- [26] A. C. Kokaram, Robin D. Morris, W. J. Fitzgerald, P. J. W. Rayner. Detection of Missing Data in Image Sequences. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, pp. 1496-1508.
- [27] H. Ammar-Badri, A. Benazza-Benyahia. Wavelet-based Blotch Detection in Old Movies. *Image Processing Theory, Tool and Applications*. 2008, pp. 1-7.
- [28] P. M. B. van Roosmalen. Restoration of Archived Film and Video. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 1999.
- [29] Kokaram, A.C.; Morris, R.D.; Fitzgerald, W.J.; Rayner, P. J W, "Interpolation of missing data in image sequences," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol.4, no.11, pp.1509-1519, Nov 1995
- [30] R. Storey, Electronic detection and concealment of film dirt, *J. SMPTE* 94 (June 1985) pp.642–647.
- [26] A. C. Kokaram, "Detection and removal of line scratches in degraded motion picture Sequences" in *Proc. Signal Processing VIII*, vol. 1, Trieste, Italy, pp. 5-8, Sept. 1996
- [27] Bruni, V.; Vitulano, D.; Kokaram, A., "Line scratches detection and restoration via light diffraction," *Image and Signal Processing and Analysis*, 2003. ISPA 2003. Proceedings of the 3rd International Symposium on , vol.1, pp. 18-20, Sept. 2003
- [28] Bruni, V., Vitulano, D., "A generalized model for scratch detection," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 13, no.1, pp. 44-50, Jan. 2004
- [29] A. Kokaram, F. Pitie, D. Corrigan, D. Vitulano, V. Bruni, and A. Crawford, "Advances in Automated Restoration of Archived Material", Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011

- [30] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, "Digital Image Processing", 3rd ed, Upper Saddle River: Pearson Education, 2008.
- [31] Kyung-tai Kim; Eun-Yi Kim, "Film line scratch detection using neural network and morphological filter," Cybernetics and Intelligent Systems, 2008 IEEE Conference on, pp. 21-24, Sept. 2008
- [32] Nie Shiliang; Zhang Hongying; Zhang Liping; Fan Yang; Brost, V., "Vertical scratches detection based on edge detection for old film," Industrial and Information Systems (IIS), 2010 2nd International Conference on, vol.1, pp. 10-11, July 2010
- [33] T. Bretschneider and O. Kao and P. J. Bones, "Removal of vertical scratches in digitised historical film sequences using wavelet decomposition", Proceedings of the Image and Vision Computing New Zealand, pp. 38-43, 2000
- [34] Newson, A.; Almansa, A.; Gousseau, Y.; Perez, P., "Robust Automatic Line Scratch Detection in Films," Image Processing, IEEE Transactions on , vol.23, no.3, pp.1240-1254, March 2014
- [35] Agnès Desolneux and Lionel Moisan and Jean-michel Morel, „Edge Detection by Helmholtz Principle“, Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol.14, pp. 271-284, 2001
- [36] Gullu, M. K.; Urhan, O.; Erturk, S., "Scratch detection via temporal coherency analysis and removal using edge priority based interpolation," Circuits and Systems, 2006. ISCAS 2006. Proceedings. 2006 IEEE International Symposium on, pp. 21-24, May 2006
- [37] Muller, S.; Buhler, J.; Weitbruch, S.; Thebault, C.; Doser, I.; Neisse, O., "Scratch detection supported by coherency analysis of motion vector fields," Image Processing (ICIP), 2009 16th IEEE International Conference on , pp. 89-92, 7-10 Nov. 2009
- [38] L. Joyeux, O. Buisson, B. Besserer, and S. Boukir. "Detection and Removal of Line Scratches in Motion Picture Films", CVPR'99, IEEE Int. Conf On Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, Colorado, June 1999, pp. 548-553.
- [39] Morris, R.D.; Fitzgerald, W.J.; Kokaram, A.C., "A sampling based approach to line scratch removal from motion picture frames," Image Processing, 1996. Proceedings., International Conference on , vol.1, no., pp.801,804 vol.1, 16-19 Sep 199
- [31] Maddalena, L., "Efficient methods for scratch removal in image sequences," Image Analysis and Processing, 2001. Proceedings. 11th International Conference on , pp.547-552, 26-28 Sep 2001
- [41] www.prelinger.com [online]. Rick Prelinger. [vid. 20.4.2014]. Dostupné z: <http://www.prelinger.com/>
- [42] Prelinger Archives [online]. Internet Archive. [vid. 20.4.2014]. Dostupné z: <https://archive.org/details/prelinger>
- [01] Nitrate base deterioration. In: Library of Congress [online]. Library of Congress [10.11.2013]. Dostupné z: http://www.loc.gov/film/images/ozfilms1_med.jpg
- [02] Movies. In: gtresearchnews [online]. <http://gtresearchnews.gatech.edu/images/movies.gif> [10.11.2013]. Dostupné z: <http://gtresearchnews.gatech.edu/images/movies.gif>

- [03] Vinegar syndrome. In: Filmpreservation [online]. National Film Preservation Foundation [10.11.2013]. Dostupné z:
<http://www.filmpreservation.org/userfiles/image/preservation-basics/vinegar1.jpg>
- [05] Warner_Bros_Horror_Mystery_Double_Features_1-Find_the_Blackmailer-01946. In: Dvdbeaver [online] Dvdbeaver [1.12.2013]. Dostupné z:
http://www.dvdbeaver.com/film3/dvd_reviews52/warner_horror_mystery_double_features.htm
- [06] Crows_feet_nick In: In: nfsga [online]. National film and sound archive [1.12.2013]
Dostupné z: <http://www.nfsa.gov.au/preservation/glossary/perforation-damage>
- [07] Kokaram, A.C., "On missing data treatment for degraded video and film archives: a survey and a new Bayesian approach," Image Processing, IEEE Transactions on, vol.13, no.3, pp.397-415, March 2004

Příloha A

Obsah příloženého CD

\Database

- soubory s jednotlivými sekvencemi databáze
- database.xls - soubor s popisem databáze

\Implementace

- BDetROD.m - ROD detektor jednosnímkových artefaktů
- BDetSDIa.m - SDIa detektor jednosnímkových artefaktů
- BDetSDIp.m - SDIp detektor jednosnímkových artefaktů
- BDetsROD.m - sROD detektor jednosnímkových artefaktů
- BDetStorey.m - Storeyho detektor jednosnímkových artefaktů
- HierarchicalMotionEst.m - Hierarchický Block Matching pro kompenzaci pohybu
- LSDetBruni.m - Bruni detektor vertikálních škrábanců
- LSDetTemporal.m - Časový detektor vertikálních škrábanců
- LSDetWavelet.m - Wavelet detektor vertikálních škrábanců
- LSRestore.m - metoda pro rekonstrukci obrazové informace v oblasti vertikálních škrábanců
- ML3Dex.m - ML3Dex filtr pro potlačení jednosnímkových artefaktů
- MotEstExhaustiveSearch.m - Block Matching algoritmus s plným vyhledáváním

\TestSekv

- BLOTCHMASK.mp4 - binární mapy skvrn uměle přidáných do sekvencí FORD1 a FORD2
- FORD1.mp4 - uměle zkreslená sekvence FORD1
- FORD1original.mp4 - sekvence FORD1 bez uměle přidáných skvrn
- FORD2.mp4 - uměle zkreslená sekvence FORD2
- FORD2original.mp4 - sekvence FORD2 bez uměle přidáných skvrn
- \BLOTCHMASK - jednotlivé snímky sekvence BLOTCHMASK.mp4 ve formátu .jpg
- \FORD1original - jednotlivé snímky sekvence FORD1original.mp4 ve formátu .jpg
- \FORD2original - jednotlivé snímky sekvence FORD2original.mp4 ve formátu .jpg
- \SKVRNY - jednotlivé snímky se skvrnami přidány do sekvencí FORD1 a FORD2

\BakPDF

- Archivni_filmove_zaznamy_a_jejich_rekonstrukce.pdf - elektronická verze této práce