Obsah

[1. ÚVOD 2](#_Toc463373708)

[1.1 Předchozí práce 3](#_Toc463373709)

[2. PŘEHLED 4](#_Toc463373710)

[2.1 User Experience 5](#_Toc463373711)

[3. KALIBRACE 6](#_Toc463373712)

[3.1 Wide základní 3D rekonstrukce 6](#_Toc463373713)

[3.2 Referenční kamera 7](#_Toc463373714)

[3.2.1 Principal odhad bod 7](#_Toc463373715)

[4. REAL-TIME USER GUIDANCE 8](#_Toc463373716)

[4.1 Robustní Camera Pose Odhad 8](#_Toc463373717)

[4.1.1 Korespondence Odhad 8](#_Toc463373718)

[4.1.2 Essential Matrix Odhad 9](#_Toc463373719)

[4.2 Real-time kamera Pose Odhad 9](#_Toc463373720)

[4.3 Interleaved Scheme 10](#_Toc463373721)

[4.3.1 Sanity testování 10](#_Toc463373722)

[4.4 Měřítko Odhad 11](#_Toc463373723)

[4.5 Rotace Stabilizace 11](#_Toc463373724)

[5. VISUALIZATION 11](#_Toc463373725)

[6. VÝSLEDKY 12](#_Toc463373726)

[6.2 Vyhodnocení Uživatelské rozhraní 14](#_Toc463373727)

[6.2.1 První studie pilot uživatel 14](#_Toc463373728)

[6.2.2 Druhá studie pilot uživatel 14](#_Toc463373729)

[6.2.3 První Poslední studie uživatel 15](#_Toc463373730)

[6.2.4 Druhý Poslední studie uživatel 15](#_Toc463373731)

[6.3 Výsledky na historických fotografiích 17](#_Toc463373732)

[6.4 Diskuse 17](#_Toc463373733)

[7. ZÁVĚR 17](#_Toc463373734)

Cílem re-fotografie je zachytit existující fotografii ze stejného pohledu. Historický snímek spárované s dobře zarovnanou moderní re-fotografií může sloužit jako pozoruhodná vizualizace průběhem času. Avšak proces re-fotografie je zdlouhavý a často nepřesné, protože reprodukovat pohled původní fotografie je náročné. Re-fotograf musí jednoznačně rozhodnout mezi šesti stupni volnosti 3D překlad a rotace a matoucí podobnost mezi ohniskem kamery a čočky.

Představujeme současnou oceňovanou a vizualizační techniku ​​pro re-fotografie, která uživatelům umožňuje dosáhnout požadované stanoviska během snímání. Vstupem do naší techniky je referenční obraz z požadovaného hlediska. Uživatel se pohybuje přes scénu s kamerou a řídí se naši vizualizací k dosažení požadované stanoviska. Využíváme techniky počítačového zpracování obrazu pro výpočet relativní rozdíl hlediska. Vedeme 3D pohyb pomocí dvou 2D šipek. Demonstrujeme úspěch naší techniku ​​re-fotografování historických obrazů a provádění studií uživatelů.

# 1. ÚVOD

Re-fotografie je děj opakovaného fotografování; zachycovat fotografii na téže scény ze stejného pohledu existující fotografie, která je obvykle mnohem starší. Obraz re-fotografa může poskytnout přesvědčivé pohled na "tehdy a teď" s odstupem času. Re-fotografie je mocný nástroj pro studium historie. Známé příklady zahrnují *Second Pohled [Klett et al. 1990]* (a re-fotografie průzkumu krajiny o americkém západě), *New York Změna* [Levere et al. 2004], a série čtyřiceti knih *Then & Now*, které každý re-fotograv hlavním světovým městem (např. [McNulty 2002]). Z historie, re-fotografie je také použity za účelem doložení ledovcového tání jako důkaz globálního oteplování [Gore 2006], a sledování geologické eroze a změny[Hall 2002].

Když fotografii a její re-fotograf vyfotografují dobře, digitální cross-fade mezi nimi je pozoruhodný artefakt; desetiletí jet mrknutí oka, a je zřejmé, které scénických prvků jsou zachovány, a které se změnily v průběhu času. Vytvořit věrná re-fotografii, z hlediska původní fotografie musí být pečlivě reprodukovány v okamžiku zachycování. Však, jak jsme potvrdili pomocí uživatelské studie, přesně to odpovídá fotografii "od oka", která je docela náročná; re-fotograf musí rozhodovat mezi šesti stupni volnosti 3D rozměrů a rotace, a zejména, je matoucí podobnost mezi účinky ohniska kamery a čočky. Existují digitální techniky pro posun pohledu po vyfotografování [Kang a Shum 2002], ale jsou stále křehké a komplikované, a závisí na řešení několika klasických i náročných počítačových problémů vidění.

V tomto článku prezentujeme interaktivní, výpočetní techniku pro re-fotografování, která se zaměřuje na úkol odpovídající pohledu referenčního snímku v okamžiku snímání. Očekáváme, že naše nástroj poběží přímo na digitálním fotoaparátu; ale protože tyto platformy jsou v současné době uzavřené, a přesto nemají dostatek zpracování energie, náš prototyp se skládá z digitálního fotoaparátu připojeného k notebooku. Uživatel jednoduše zapojí fotoaparát na scéně líčen v referenčním snímku, a naše odhady a technika vizualizuje pohyb kamery potřebnou k dosažení požadovaného hledisko v reálném čase. Algoritmicky, stavíme na stávajících počítači vidění algoritmy pro výpočet relativní pózu mezi dvěma fotografiemi [Stew'enius et al. 2007; Hartley 1992] pomocí detekce a odpovídající funkci [Lowe 2004] společnou pro oba obrazy.

Hlavním přínosem naší práce je vývoj prvního interaktivního nástroje pro re-fotografie. Tento nástroj zahrnuje řada nových metod, jako je metoda pro kalibraci historického fotoaparátu bez fyzického přístupu k němu tím, že fotografuje stejné scény s moderní, kalibrovaným fotoaparátem. Také přítomný stabilizační technika, která podstatně snižuje stupeň svobody, která uživatel potřebuje, aby prozkoumala, zatímco po pohybu navrhl našeho nástroje. Demonstrujeme úspěchy naší techniky podle re-fotografování historických obrazů a provádění studií s uživateli.

## 1.1 Předchozí práce

Podle našeho nejlepšího vědomí, jsme první naimplementovali interaktivní nástroj, který řídí osoba, která má podobu referenčního snímku. Nicméně odhad polohy kamery a scén struktur z několika snímků je již dlouho základním problémem v počítačové komunitě [Faugeras 1993; Heyden a Sparr 1999; Hartley 1992; Hartley a Zisserman 2000].

Nasměrujeme uživatele na správnou pohledu v okamžiku snímání. Jednou z alternativ k našemu přístupu by bylo zachytit nedaleké hledisko a ohnout do požadovaného pohledu po vyfotografování [Chen a Williams 1993; Werner et al. 1995; Písek a Teller 2004]. Avšak, paralaxa a komplexní geometrie scény může být náročné pro tyto algoritmy, a možnost nepřesnosti znamená, že výsledkem nemusí být považován za věrnou dokumentace pohledu pro vědecké nebo historické účely.

Naše technika souvisí s vizuálním naváděcím výzkumem v robotice, kde je robot zaměřen na požadovanou 3D umístění (např nabíjení Stanice) určené fotografii zachycen z tohoto místa. Vizuální naváděcí přístup Basri et al. [1999] rovněž využívá funkci odpovídající relativní představovou; Hlavní rozdíl je, že roboti mohou reagovat na přesných parametrů pohybu, zatímco lidé lépe reagují na vizualizací v procesu pokus a omylu. Více nedávná práce existuje v reálném čase algoritmy, které zotavit 3D pohyb a struktura [Pollefeys et al. 2008; Davison et al. 2007], ale oni nemají za cíl vést lidi. Existují rozšířené reality systémů [Scheuering et al. 2002], se snadnou navigací. Nicméně oni předpokládají že 3D model je dán, zatímco jediný vstup do naší techniky je stará fotografie pořízená neznámého kamerou. Nejsme první, kdo využívají sílu historických fotografií. Projekt 4D Cities (www.cc.gatech.edu/4d-cities) doufá, že stavět časově proměnný 3D model měst a fotografický cestovního ruchu [Snavelyet al. 2006] nacházející starší snímky v prostorovém kontextu novější; ani projekt, nicméně, pomáhal uživatel zachytit nové fotografie z hlediska historie. Nedávné digitální fotoaparáty a mobilní telefony zaměstnávají určitý počet pokročilé techniky počítačového zpracování obrazu, jako je například detekce obličejů, hledáček Vyrovnání Adams et al. [2008], funkce párování a sledovat na mobilních telefonech [Wagner et al. 2008; Takacs et al. 2008], a Panoramatický hledáček Baudisch et al. [2005]. Panoramatický hledáček nejvíce souvisí s naší technikou, ačkoliv její zaměření je současný náhled na pokrytí panorama bez paralaxy. Provádění odpovídajících a sledovacích algoritmů na mobilních telefonech je komplementární k naší technikou. My se zaměříme na rozvoj interaktivní způsobu vizualizace na základě podobných nástrojů.

# 2. PŘEHLED

Navrhli jsme uživatelské rozhraní a technický přístup našich nástrojů pro re-fotografii po provedení dvou počátečních experimentů, které nám pomohly porozumět výzvám re-fotografie. V naší první studii pilot uživatel (§ 6.2.1), jsme se obrátili na zřejmou otázku: jak těžké je manuální re-fotografie? Zjistili jsme, že uživatelé netrénovaný v re-fotografie nebyly schopný reprodukovat hledisko odkazu obrázku úspěšné i za pomoci jednoduchých vizualizací, jako je například side-by-side vizualizaci proudu a reference pohledů nebo lineární směs ze dvou pohledů.

V další studii (§ 6.2.2) jsme zavedli standardní příbuznou nadstavbu algoritmu [Stew'enius et al. 2007], a vizualizovat ve 3D, obnovená kamera komolých jehlanů současných a referenčních výhledem pro uživatele vždy, když zachytil novou fotografii (obrázek 11 (a)). Znovu jsme zjistili, že uživatelé byly neúspěšné, protože oni měli obtíže tlumočnické vizualizaci do samostatného překladu a otáčení akce a byly napadány nedostatkem reálném čase zpětná vazba.

Tyto dva pilotní uživatelské studie, spolu s našimi vlastními experimenty pomocí funkce vykonávat historickou re-fotografie, nám pomohl identifikovat pět hlavních výzev v oblasti výpočetní re-fotografie:

1. Je náročné komunikovat jak 3D překlad a rotaci pro uživatele, protože tento pohyb má šest stupňů volnosti. Zoom fotoaparátu přidává sedmý stupeň.

2. I s kalibrovanými kamer, 3D rekonstrukce z obrazů sám trpí nejasností globálním měřítku. Tato nejednoznačnost ztěžuje komunikaci, jak blízko je uživatel na požadovaný hledisko, nebo zachovat rozsah pohybu sděleny Uživatel konzistentní iterací.

3. Relativní představovat algoritmy trpí degenerací v případě nulového pohybu mezi kamerami [Pa et al. 1999], který je přesně náš cíl. Tato degenerace znamená, že odhad stane nestabilní, jako uživatel dosáhne referenční názor.

4. Historické obrazy se mohou objevit velmi odlišné od nových fotografiích protože architektonických úprav, odlišný filmu odezva, stárnutí, počasí, time-of-day, atd., tyto dramatické rozdíly může dělat to náročné pro dokonce state-of-the art funkce popisovače najít shody potřebné pro výpočet relativní pózy.

5. A konečně, historické obrazy jsou zachyceny pomocí kamer neznámý kalibrace, např., ohnisková vzdálenost a hlavní bod. Kromě toho, historické architektonické fotografie byly často zachyceny non-centrální hlavních bodů pomocí kamer prohlížet, aby byl svislé čáry stavební vertikální v obraze.

Jsme řešit tyto problémy s kombinací interakce s uživatelem a algoritmy. Náš přístup má řadu klíčových funkcí, který můžeme označit ve zbytku tohoto dokumentu. Prvním z nich je náš přístup na kalibraci neznámého kamery slouží k zachycení historické image (§ 3), to znamená výzvu 5. Požadujeme, aby uživatel zaznamenával dva obrazy scény s širokou základní linie (obrázek 2). Uživatel je instruován, aby zachytit první rám a druhý rám s hrubě 20 stupni úhlu o hlavní scény objekt s tím, že druhý snímek jako nejlepší aproximace eyeballed uživatelova požadované hledisko. Pak jsme rekonstruovat scénu ve 3D a použíli struktura pro kalibraci historický fotoaparát poté, co žádají, aby uživatel manuálně identifikovat několik korespondence s historickým obrazem (Výzva 4). My také použít tuto širokou základní linie k vyřešení úkolu 3 by provádění odhadu představovat vzhledem k prvnímu rámu, nikoli referenční pohled, který pomáhá zabránit degeneraci. Vypočítaný 3D struktura nám také pomáhá spočítat konzistentní 3D úrovních v celé iterací (Výzva 2). Konečně, naše kalibrace Způsob také obsahuje volitelný interaktivní přístup ke kalibraci non-centrální jistiny bod (bod 3.2.1), který požádá uživatele k identifikaci sady paralelní linky ve scéně.

Dalším klíčovým aspektem našeho přístupu je real-time vizuální vedení který směruje uživatele k požadovanému pohledu (oddíl 4). Tato zpětná vazba zahrnuje vizualizaci potřebných 3D překladu referenční pohled vypočítán prokládání pomalejší, robustní příbuzného představovat algoritmus (bod 4.1) s rychlejší, lehké aktualizace (Viz kapitola 4.2). My také použít vypočtenou relativní pózu provést rotaci stabilizace (bod 4.5); To znamená, že ukazují aktuální pohled pro uživatele po deformaci se s nekonečným homography [Hartley a Zisserman 2000] fit s referenčním pohledu, což může představovat pro otáčení fotoaparátu a zoom. Vzhledem k této stabilizace uživatel se nemusí starat o přesné otáčení fotoaparátu, a může zaměřit se na následující pokyny překlad 3D od našeho nástroje (výzva 1).

Poté, co přehled o uživatelské zkušenosti našich re-fotografie nástroj, zbytek tohoto příspěvku popisuje technické detaily náš přístup, hodnotí ji s několika uživatelskými studiemi a prezentuje výsledky pomocí našeho nástroje pro provádění historického re-fotografie.

## 2.1 User Experience

I když jsme nakonec chtěli použit náš nástroj úplně na kameru, naše současná implementace spoléhá na přenosný počítač připojený ke kameře, jak je znázorněno na obrázku 3. hledáčku snímků z fotoaparátu se přesunou k přenosnému počítači, který provádí výpočet pro vizualizaci potřebné pohyby uživatele.

Uživatel začíná vložením referenčního snímek. V případě, že uživatel podezřelých že obraz byl zastřelen s non-centrální hlavním bodem (například vertikální čáry na vysokých budov ve svislé poloze v historickém snímku), ona může volitelně kalibrovat hlavní bod identifikace tři sady rovnoběžných čar v referenčním snímku. My umožňujeme použít ke kvantitativní lupě obrazovky pro to, aby čáry viditelnější. Identifikace těchto linek je obvykle snadno fotografiemi staveb, což je nejběžnější scénář, ve kterém fotograf rozhodne pro manipulaci hlavním bodem pomocí dohledem kamery nebo tilt-shift objektivu.

Uživatel je vedle instruován střílet obraz, který se otáčí zhruba 20 stupňů ve vzdálenosti od referenčního hlediska. Aktuální množství otáčení je nedůležité a je specifikován pouze pro zjednodušení instrukce; to je jen důležité, aby výchozí od referenčního hledisko být dostatečně široká. Nazýváme tento obrázek "první frame ". Dále uživatel přejde ke svému nejlepšímu odhadu odkazu hledisko, a střílí "druhý snímek." Systém počítá 3D strukturu z těchto dvou rámů, a pak se zeptá uživatele ke kliknutí šest korespondence mezi referenčním obrazem a 3D struktury promítnuta druhého rámce. Poté, co dělá tak, real-time zpětná vazba začíná a šípy směrovat uživatele k cíli. Vedle šipky ukážeme natočení stabilizovaný dnešního pohledu. Uživatel může přepínat mezi několika vizualizací (oddíl 5), jako je například překryv okrajů zjištěných z referenčního obrazu na aktuální hledisko, které mohou pomoci uživateli při vyhodnocení, zda současný názor je úspěšný re-fotograf. Jakmile je uživatel spokojen s hlediska, dokáže zachytit její finální re-fotografii.

# 3. KALIBRACE

Prvním krokem našeho výpočtu re-fotografického nástroje je kalibraci kamery a zjištění parametrů neznámého historického fotoaparátu. Provedeme řídkou 3D rekonstrukci scény na nichž byla historická fotka pořízena. Uživatel pořídí dva snímky, poté je provedena optimalizace parametrů neznámé fotoaparát, aby se minimalizovala projekční chyba manuální funkce odpovídající uživateli. Také volitelně umožňují uživateli pro kalibraci non-ústřední hlavní bod zadáním sad paralelní scény linky v historickém snímku. Tento proces je znázorněn na Obrázek 4.

## 3.1 Wide základní 3D rekonstrukce

Uživatel začíná tím, že zachytí dva obrazy s širokou základní linie (obrázek 2); široký základ zlepšuje přesnost a stabilita 3D rekonstrukce. Předpokládáme, že současná kamera je kalibrována (používáme bouguet je kalibrační soubor nástrojů [2007]), a poté se provede SFM, což registruje dvě kamery a rekonstruuje 3D strukturu. Konkrétně, využíváme robustní algoritmus pro odhad pózy, je popsán v oddíle 4.1. Stručně řečeno, používáme algoritmus Stewenius et al. [2007], který vypočítá relativní představu dané pozice získanou ze SIFTu [Lowe 2004], korespondence mezi těmito dvěma pohledy v robustní vzorkovací smyčce se vypočte pomoci RANSAC [Fischler a Bolles 1981]. Pak, vzhledem k projekci matice dvěma kamerami, můžeme rekonstruovat 3D souřadnic každá korespondence pomocí triangulace [Hartley a Zisserman 2000]. Tyto 3D body se pak promítá do druhého pohledu, a zobrazí uživateli podél referenčního snímku. Uživatel je vyzván ke kliknutí 6-8 bodů. Tyto body se používají k registraci referenční kamery v dalším kroku registrace

## 3.2 Referenční kamera

Dále se nás týká referenční snímek na rekonstruované scéně z první dvě fotografie pořízené uživatelem, vzhledem zápasy mezi referenční a druhý pohled. K tomu, usuzujeme vnitřní a příměsové parametry referenčního fotoaparátu pomocí Levenberg-Marquardt optimalizace (konkrétně Lourakis v LM Balíček [2004]), čímž se minimalizuje součet čtverců chyb projekčních porovnaných bodů. Předpokládáme nulové překroutit a optimalizovat devět stupňů svobody: jeden pro ohniskovou vzdáleností, dva pro hlavní bod, tři pro otáčení a tři pro překlad. Inicializujeme rotaci matice k matici identity, překlad matice na nulu, a ohnisková vzdálenost na ohniskové vzdálenosti aktuální kamery. My inicializovat hlavní bod analýzou mizející body je popsáno v kapitole 3.2.1.

Ačkoli toto není inicializační blízko k zemi pravdou, my konstatovat, že algoritmus Levenberg-Marquardt konverguje k správná odpověď, protože jsme povolit pouze devět stupňů volnosti a matice rotace má tendenci být v blízkosti identity matrice pro re-fotografie.

3.2.1 Principal odhad bod. Hlavním bodem je křižovatka optické osy se do obrazové roviny. V případě pohybu řadicí se nanáší na čočku, aby se vertikály paralelně nebo v případě, že obraz je oříznutí, hlavní bod není ve středu snímku, a musí být vypočítána. Analýza mizející bodů poskytuje silné podněty pro odvozování umístění hlavního bodu. Pod perspektivní promítání, rovnoběžné linie ve vesmíru Zdá se setkají v jediný bod v rovině obrazu; tento bod je úběžník z řádky. Vzhledem k mizející body tří kolmých směrech, hlavní bod je umístěn na orthocenter trojúhelníku, jehož vrcholy jsou mizející body [Hartley a Zisserman 2000], jak je znázorněno na obrázku 5.

Žádáme uživatele ke kliknutí na třech paralelních linek ve stejném směru; i když dvě paralelní linky jsou dostatečně pro výpočet jsme požádat o tři ke zlepšení robustnosti. Počítáme průsečíky z rovnoběžek. My lokalizovat jednotlivé úběžník na základě váženého průměr tří křižovatek. Hmotnost je úměrná úhlu mezi dvěma řádky [Caprile a Torre 1990], poněvadž umístění z úběžníku stává méně spolehlivý při menších úhlech. My vyřadit úběžný bod, pokud je součet těchto tří úhlů nižší než 5 stupňů.

Během Levenberg-Marquardt nelineární optimalizace, inicializujeme a omezit hlavní bod jako orthocenter, vzhledem k tomu, tři konečné Vanishing bodů. Máme-li jeden konečný a dva nekonečné mizející body, my inicializovat a omezit hlavní bod jako konečných Mizející bod. Se dvěma konečných mizející body, máme omezit Hlavním bodem, aby se na mizející čáry, která spojuje konečné Vanishing bodů.

V souhrnu lze konstatovat, je výsledek z výše uvedených metod je 3D rekonstrukce scény z prvního a druhého rámce, stejně jako kalibrace referenčního zobrazení a jeho relativní představovat od prvního pohled. Tato informace je pak použita v dalším stupni, což vede uživateli hlediska sledovaného obrazu.

# 4. VEDENÍ UŽIVATELE V REÁLNÉM ČASE

Náš re-fotografický nástroj poskytuje uživateli v reálném čase navádění směrem k referenčnímu hledisku. K tomu počítáme s relativní představou mezi aktuálním pohledem a referenčním pohledem a s vizualizací potřebnou pro 3D překlad a pro uživatele v podobě dvou šipek, jak je znázorněno na obrázku 9. Ukážeme aktuální pohled na uživatele až po nejlepším vyrovnání rotace mezi aktuálním pohledu a odkazem pohled, který byl použit. Tato rotační stabilizace umožňuje uživateli zaměřit se na 3D překladu a vyhnout se starostí s přesnou rotací fotoaparátu. K dosažení výkonu v reálném čase, budeme prokládat hrubým odhadem, ale relativní představují výpočty s rychlejší, lehké aktualizace schéma. Schéma našeho poradenského přístupu v reálném čase jak je znázorněno na obrázku 6.

## 4.1 Silná pozice fotoaparátu

V našem procesu hrubého odhadu, odhadujeme fotografickou relativní představu na první snímek namísto odkazu, aby se zabránilo degenerace v odhadu, kdy uživatel přiblíží požadovaný hledisko. Protože víme, referenční umístění kamery vzhledem k první snímku [R10 | T10] můžeme odvodit relativní pozici mezi aktuální a referenční fotografií. [Rij | Tij] je j-tý kamera umístěná vzhledem k umístění i-tý kamery. R je jeho rotační složka a T je jeho translační složku. U každého rámce n, my výpočet aktuální pozice kamery vzhledem k prvnímu umístění kamery [R 1N | T1n]. Translační složka T0n proudu kamery umístěné vzhledem k referenčnímu fotoaparátu.

T0n = T1n - R 1N \* R? 10 \* T10.

V naší případě, budeme prokládat tento hrubý odhad s lehkým odhadem. Představujeme podrobnosti v kapitole 4.2.

4.1.1 Korespondence odhadu. Chcete-li zjistit shodu mezi první a aktuální fotografií, používáme funkci určenou pro detekci bodů. SIFT je navržen tak, aby byl neměnný v měřítku změny a lineární změny jasu. To je také částečně neměnný na pohledu změny. Pro rychlost, používáme implementaci GPU [Sinha et al. 2006]. Vstupní obrazy mají kolem jednoho megapixelu a náš downsample obrazy od dvou na rychlost. Pro pře vzorkování obrazu, SIFT detekuje kolem jednoho tisíce hraných bodů. Používáme přibližný vyhledávání metoda ANN [Arya et al. 1998] k nalezení shody. Stanovili jsme práh testu druhé poměr [Lowe 2004] poměrně striktně na 0,6 udržovat pouze důvěryhodné korespondence.

4.1.2 Essential Matrix Odhad. Nyní vypočítáme relativní fotoaparát představovat mezi prvním pohledu a aktuálního rámce, protože základní je široká, což zabraňuje pohybu degeneraci, když uživatel dosáhne cíle. Vzhledem k tomu, kamera uživatele je již kalibrován, my jediné, co potřebujete odhadnout základní matrici, která se týká kalibrovanou obrazů. Používáme algoritmus Stew'enius je pětibodový [2007], který odhaduje základní matrice mezi dvěma kalibrovaných kamer v reálném čase. Jezdíme MSAC (m-odhadce vzorek konsenzuální) [Torr a Zisserman 2000] najít inliers a nejlepší padnoucí základní matrici. MSAC je podobný RANSAC, ale modifikuje nákladové funkce tak, že extrémy jsou uvedeny pevnou trest, zatímco inliers jsou zaznamenány na, jak dobře se hodí data. Přesnost MSAC se nachází v blízkosti MLESAC (Maximum likelihood konsensus) bez ztráty rychlosti [Torr a Zisserman 2000] WE opravit počet iterací při 1000. Určíme inliers a nejlépe padnoucí zásadní matice s použitím

symetrické epipolární vzdálenost [Hartley a Zisserman 2000]. Náš prahová hodnota je 0,01 za normalizovaných souřadnic bodu.

## 4.2 Real-time kamera Pose Odhad

Chceme poskytovat spolehlivé výsledky, ale také komunikovat s uživateli reálný čas. Naše robustní odhad poskytuje spolehlivé výsledky, ale jeho výpočet je drahý a trvá jen pár sekund. Poskytovat v reálném čase zpětná vazba, budeme prokládat náš hrubý odhad s lehkým odhadem, což není tak silný, ale levné. V našem lehkém odhadu, nebudeme aktualizovat korespondence, ale sledovat generovaný nejnovější sady inliers pomocí funkce sledování a přepočítat relativní kamery představují v jednom průchodu.

Používáme Birchfield v KLT implementační [2007] sledovat funkci body. Provede se kontrola konzistence afinní [Shi a Tomasi 1994] a provádí sledování více škálových, který je vynikající vlastnost bod místa z hrubé až jemné rozlišení.

Naše robustní odhad a lehký odhad jsou prokládány, jak je znázorněno na obrázku 7. robustní odhad rozpozná funkci body, najde zápalky, a odhaduje novou sadu inliers a epipolární geometrii použitím robustní statistiky. To trvá kolem dvou sekund, zatímco Naše lehký odhad běží na více než 10 snímků za sekundu. Tento proces umožňuje prokládané přesnost inliers být zachovány a poskytuje uživatelům s aktualizací v reálném čase.

## 4.3 Interleaved Scheme

Naše proložený potrubí je realizován ve třech závitech: jeden komunikuje s fotoaparátem, druhá vede robustní odhad, a další provádí lehké odhad. Na konci každého robustní odhad, sada inliers je předán do lehkého odhadu vlákno. Uložíme následných rámců klíčového rám, na němž robustní odhad počítá inliers. Když světlo odhad je aktualizována s inlier sady z robustního odhadu, začíná sledování z dalšího snímku klíčového snímku místo proudu frame fotoaparátu. Vzhledem k tomu, lehký odhad používá optický tok pro dynamické body, tam by neměl být velký rozdíl mezi klíčové rámem, kde jsou inliers počítán a první snímek při sledování se spustí. Je-li sada inlier obnoví s novým hrubým odhadem uživatelského výsledku, lze pozorovat jednu sekundu zpoždění. Nicméně, to je zanedbatelné ve srovnání se celý proces re-fotografie, a to dělá, nemá vliv na výkon uživatele nebo výsledné kvality re-fotografie. Naše prokládané verze funguje jako na obrázku 8.

4.3.1 Sanity testování. U každé výsledné pozice provádíme tři testy, abychom se ujistili, že naše vizualizace je spolehlivá. Porovnáváme 3D struktura rekonstruován z každého snímku s naší počáteční 3D rekonstrukce z prvních dvou snímků. Měříme chybu 3D všech bodů a ignorovat odhad představovat, pokud je medián 3D chyba je více než 10%. Typicky je střední chyba menší než 5%.

Kromě toho se kontroluje, zda aktuální kamera představuje konzistentní výsledek s těmi předchozími. Zjistili jsme, že jednoduchý filtr funguje, ačkoli Kalmanův filtr [Kalman 1960] by pravděpodobně generovat dobrý výsledek stejně. Měříme průměr a směrodatná odchylka z míst fotoaparát na předchozích deseti rámců a Potvrzení že současná odhadovaná umístění fotoaparátu do 4 standardních odchylek od střední hodnoty. Předpokládáme, že pohyb kamery je hladký a představované variace jsou malé. Výše uvedené dva testy obvykle detekují špatnou odpověď zhruba jednou za 100 snímků.

A konečně, testujeme strukturu degenerace způsobenou, když všechny inliers pocházejí z jedné jediné rovině ve scéně. Najdeme bestfitting homography pomocí RANSAC s 1,5 pixelu průměrnou mapování chyby do 500 iterací. V případě, že počet homography inliers je více než 70% epipolární inliers geometrie, ignorujeme pózy výsledku odhadu. Vzhledem k tomu, používáme velký, dostatečně výchozí stav, Tato chyba se nevyskytuje často.

Když náš odhad výsledku neprojde výše uvedených testů, my prostě neaktualizujeme vizualizaci. Vzhledem k tomu, že špatné odpovědi se nevyskytují často, nemá to žádný výrazný vliv na uživatelský komfort.

## 4.4 Měřítko odhadu

Po výpočtu relativní pozice, problém zůstává: Měřítko překladu mezi současným rámem a prvním snímkem je nejednoznačný. Proto měřítko je zachovat soulad mezi iterací. V počátečním kroku kalibrace jsme zrekonstruovaná 3D struktura mezi prvním a druhým snímkem pomocí triangulace. V následné iteraci n jsme zrekonstruovali 3D strukturu mezi prvním a druhým rámem. Měřítko mezi těmito dvěma rekonstrukcemi by měla být odlišný konstantní faktor. My můžeme váhy konzistence odhadu měřítka, který způsobuje, že vzdálenost mezi první kamerou a 3D scénou jsou rovnocenné mezi těmito dvěma rekonstrukcemi. K tomu, klademe první fotoaparát na původu pro obě rekonstrukce. Pak jsme vypočítat střední poměr vzdálenosti původu pro každý bod v 3D rekonstrukci první a n-té rekonstrukce. Nakonec jsme násobili délku překladu vektoru podle poměru, což umožní, že délka naší šipky z vizualizace je smysluplná a konzistentní napříč rámy.

## 4.5 Rotace a stabilizace

Používáme také výsledek relativního odhadu představující rotaci před zobrazením pro stabilizaci aktuálního snímku. Vzhledem k tomu, uživatelé ji najít náročné současně řídit se pokyny, což naznačuje, jak translační a rotační pohyby, my místo toho jen komunikovat překlad pro uživatele. My automaticky vypočítat nejlepší kameru rotace mezi aktuální a referenční názory, a platí to rotace jako osnovu před zobrazením aktuální snímek. Tato rotace uspořádání umožňuje uživateli soustředit se na překládání fotoaparát správný směr, aniž by se snažil držet fotoaparát v právu orientace.

Účinek 3D natočení kamery a zoom mohou být popsány s nekonečným homografem [Hartley a Zisserman 2000]. Nekonečný homograf je podtřídou obecného homografu, as ním je omezena na tuhé rotace kamery a zoom. Používáme algoritmus Brown a kol. [2007] počítat nekonečné homografy, které se hodí všechny epipolární geometrie inliers se metoda nejmenších čtverců chyby.

# 5. VISUALIZATION

Srovnáme-li reference a aktuální obrázku vedle sebe nemá smysl poskytovat přesné informace o hledisku rozdílu. V naší pilotní uživatel studii jsme za předpokladu lineárního-Blend reference a proudu obraz, a uživatelé nemohli odhadnout požadované hledisko tím, že zkoumá rozdíl pixelů. V následném testu jsme ukázaly, že relativní představovat informace ve 3D (viz obrázek 11 (a)). Stále jsme zjistili, že to bylo těžké pro uživatele interpretovat 3D informace. V našem finále vizualizace design, jsme vizualizovat relativní kamera představují ve dvou 2D roviny: Jedním z nich je směr patrné z pohledu shora a další je kolmá k optické ose, jak je znázorněno na obrázku 9. V naší konečné studii uživatelů, uživatelé našli naši šipku vizualizace snadno a snadno se učí ji následovat.

Kromě toho jsme představit vyrovnání mezi referenční a aktuální pohledy, které pomáhají uživatelům zpřesnit a potvrdit konečné stanovisko. Vzhledem k potenciálně velkým rozdílům mezi vzhled historické a současné obrazy, jsme zjistili, že lineární-Blend starého referenčního snímku a aktuální scény být matoucí. Experimentovali jsme s třemi alternativními vizualizací: hranu vizualizace, vizualizace obracející a vizualizace s referenční kamery promítnuta aktuálního rámce. Ve vizualizaci hrany jsme překrýt hrany extrahované z referenční obraz přes aktuálního rámce. Ve vizualizaci mizerný, Uživatelé mohou rychle otočit mezi referenčním snímku a aktuální snímek.

V obou okrajem a obracející vizualizací, jsme warp aktuální snímek pomocí nejlépe padnoucí nekonečné homograf (Bod 4.5), která není zvláště užitečné, když se uživatel je daleko od požadovaného pohledu, protože proud a referenční pohledy nemohou být spřízněný nekonečným homograf, ale velmi užitečný pro malé překladů. Vzhledem k tomu, translační složka stává nulovou, rotační složka je dobře vyřešen homography. A konečně za třetí vizualizace jednoduše promítat 3D model referenčního kamery do aktuálního rámce, aby vizuální cíl pro uživatele. Během uživatelských studií se nám umožňují uživatelům zvolit mezi třemi vizualizací. Všichni uživatelé si vybrali vizualizaci okraj, protože jejich přednostní vizuální zpětná vazba. Uživatelé, kteří používali obracející vizualizaci pouze na závěrečný hledisko potvrdit stanovisko. Uživatelé shledali referenci kamery za velmi užitečnou. Obrázek 9 ukazuje naši poslední vizualizační konstrukci.

# 6. VÝSLEDKY

V našem prototypu odhadujeme relativní pozici pomocí výstupu, který dostaneme z pohledu fotoaparátu. My pomocí živého obrazu Canon 1D Mark III, který výstupy 5-10 snímků za sekundu. Každý robustní odhad bere cca 2 sekundy na 2.4GHz notebook s NVIDIA GeForce 8600M GT, zatímco lehká odhad sleduje inliers, odhaduje, že relativní představovat, a vizualizuje šipek na 10-20 snímků za sekundu. S multi-threading, GPU-SIFT trvá jednu sekundu a přibližný nejbližších sousedů (ANN) trvá jednu sekundu. Vyhodnocení 6,1 předběžná registrace budeme analyzovat přesnost našeho odhadu hlavního bodu a kamera představovat pomocí dvou syntetických obrazů. Nejprve jsme zhodnotit robustnost našeho odhadu na vstup uživatele chybou. Obrázek 10 ukazuje syntetický našich testovacích případů: kostka (a) má své hlavní místo na obrázek centrum, a kostka (b) má své hlavní bod přesunut do obrazu dno. Velikost krychle 3x3x3, a vzdálenost mezi krychli a fotoaparát je kolem 6. vstupní formát obrazu je 512 x 340.

V prvním testu jsme simulovali chyby způsobené uživatelem náhodně přidáním nebo odečtením up-to 2 pixely na vstup pozic pozemní pravdy pro hlavní bodového odhadu a představují odhad. Vstupy naším hlavním odhad bod 18 bodů za tři rovnoběžek ve třech kolmých směrech. Vstupy představují odhad 6 bodů. Odhadujeme hlavní bod a představovat 100 krát a průměrný chybu. Tabulka I ukazuje výsledky. Průměrný Chyby jsou vyhlídkové 0,001 pro krychli (a) a 0,016 pro krychli (b), které jsou 0,02% a 0,25% vzdálenosti kamery. Průměrný Chyby hlavní bod je 0,2 bodů a 1,8 pixelů, respektive, což je 0,05% a 0,4% velikosti obrazu. To ukazuje, že našim hlavním bodem odhadu je robustní proti uživatelského vstupu chyba.

U druhého testu, přidáme k chybám do 3D souřadnic používá nelineární optimalizaci kromě vstupu od uživatele chyby. My porovnat dva případy: (1) hlavní bod je omezena našeho odhadu Způsob použití mizející body, a (2) hlavní bod Odhaduje se spoléhat pouze na Levenberg-Marquardt nelineární optimalizace. Tabulka II ukazuje výsledky. S naším odhadem úběžník, průměrné chyby odhadovaných hlavních bodech, které jsou 17 pixelů na krychli (A) a 13 pixelů na krychli (b), a průměrné pohledu Chyby jsou 0,26 a 0,24. Tato čísla jsou 4% a 3% z velikost obrazu, a 3% vzdálenosti fotoaparátu. Naproti tomu pokud se budeme spoléhat jen na Levenberg-Marquardt nelineární optimalizace pro odhad Hlavním bodem i hledisko, chyby hlavních bodů jsou 153 pixelů a 126 pixelů v průměru, resp. Tyto chyby jsou 36% a 30% velikosti obrazu, více než 9 krát větší než chyby používající mizející body. Průměrné chyby Viewpoint jsou 3,75 a 3,8 v tomto pořadí, které jsou téměř 50% vzdálenosti kamery. Levenberg-Marquardt nelineární optimalizace je místní sestup přiblížit a závisí na řádné inicializaci. Když významný měření hluku je přítomen v inicializaci, může se sbíhat na nesprávné lokálním minimu. Kromě toho chyby v předpovědích nejsou dost diskriminační určit hledisko a jistiny bod, ve stejnou dobu. Existují nejasnosti mezi změnou hlavním bodem a pohybu fotoaparátu. To je snížena mizející metodu bodu.

Nakonec jsme se analyzovat vliv různých ohniskové vzdálenosti chvíli změnou vzdálenosti kamery. V důsledku toho, velikost promítaný kostka zůstane stejný, ale rotace kamery a hlavní modifikace bod stále těžší desambiguace. Ohniskové vzdálenosti jsou použité 400, 600, 800, a 1000. 400 se rovná 20 mm, a 1000 ekvivalent k 50 mm na 35 mm film. Chyby prodlužuje se ohnisková vzdálenost a zvýšení kamera vzdálenost. Hlavním bodem Chyby jsou 13, 27, 45, a 66 pixelů v uvedeném pořadí, které jsou 3%, 6%, 11% a 15% velikosti obrazu. Chyby Viewpoint jsou 0,4, 0,6, 1,15 a 1,86, což je 5%, 5%, 7% a 9% z kamery vzdálenost. Čím více se přiblížit, tím více nejednoznačná odhad stane. To souvisí s tím, že došlo k chybě výstupek, je nižší diskriminační pro fotografie pořízené teleobjektivem, protože účinek 3D rotace, a že z 2D překladu stát podobné.

## 6.2 Vyhodnocení Uživatelské rozhraní

Provedli jsme několik studií pilot uživatelských před dokončením design našeho uživatelského rozhraní. Studie zahrnovaly osm žen a Osm mužů ve věkovém rozmezí od 22 do 35 let podílelo jen jeden z nich v několika studiích. Rekrutoval jsem účastníky přes osobní kontakty; osm z ich mělo informatické zázemím, zatímco druhá osm ne.

6.2.1 První studie pilot uživatel. V naší první pilotní uživatelské studii jsme chtěl vyzkoušet, zda by lidé by měl být schopen odhadnout pohledu Rozdíly pouhým porovnání dvou fotografií. Postup. Zeptali jsme se uživatelům odhadnout hledisko odkazu Fotografie jeho porovnáním s výstupem fotoaparátu hledáček, zatímco oni se pohybovali fotoaparátu. Poskytli jsme dva uživatele se třemi různými zobrazovacími technikami: reference a proudem obrázek vedle sebe, lineární, směs referenční a proudu image a barevně kódované lineární směs odkazu v červené a Současný obraz v modré barvě. Zeptali jsme se uživatelé otázky po jeho skončení úkolu.

Výsledky a závěry. Srovnáme-li referenční a aktuální obraz bok po boku Nezdálo se, že by poskytovaly informace o pohledu rozdíly; obě závěrečná rephotographs uživatele byly chudé. Ačkoli Uživatelé přednost lineární-Blend mezi třemi vizualizace, uživatelé mohli ještě nemůže odhadnout požadovanou hledisko tím, že zkoumá paralaxa. To vede k našemu prvnímu vizualizace návrhu.

6.2.2 Druhá studie pilot uživatel. V našem prvním vizualizaci návrhu, Ukázali jsme relativní údaje představují v 3D a aktualizován Kamera pyramida každé 3 sekundy (viz obrázek 11 (a)). V pilotním uživatele Studie, jsme chtěli otestovat, zda uživatelé budou moci užívat více přesné rephotographs využívající 3D naši představovat vizualizaci než při použití lineární-směs vizualizace.

Kromě zobrazení 3D pyramidy fotoaparátu, jsme za předpokladu, že Uživatel s ní vzdálenosti na požadovanou hlediska vzhledem ke scéna vzdálenost. Mezi rekonstruovaných scénických bodů, jsme vybrali jeden bod zhruba ve směru uživatel potřeboval k pohybu a jí řekl, jak daleko se od požadovaného hlediska vzhledem ke scéna bod. Ptali jsme se, zda uživatelé těchto doplňujících informací byla užitečná po dokončení úkolu. Postup. Vzhledem k tomu, referenční fotografie pořízené stejnou kamera, jsme se zeptali šest uživatelům dosáhnout hledisko, kde se nachází referenční Fotografie byla pořízena. Všimněte si, že tento úkol bylo snazší než

Typický refotografie: nebyl velký rozdíl vzhled, a uživatelé nepotřeboval odhadnout ohniskovou vzdálenost. Testovali jsme 4 krytých scény. Každý účastník zažil všechny scény a oba techniky, ale každá scéna byl párován s pouze jediným refotografie Technika pro tohoto účastníka. Měřili jsme přesnost z rephotographs porovnáním rozdílů obrazových bodů mezi

reference a výsledné rephotographs. Výsledky a závěry. Pozorovali jsme, že ani 3D pyramida vizualizace ani vizualizace lineární směs pomohla uživatelům trvat přesné rephotographs. Obrázek 11 ukazuje výsledné rephotographs.

Co se týče rozdílů obrazových bodů, uživatelé také menší chybu s tímto 3D vizualizace, konkrétně 70% chyby s lineárním-směsi. Nicméně, jsme si uvědomili, že srovnávání rozdílů pixel nebyl Vhodnou metrikou. Rozhodli jsme se měřit vzdálenost od uživatelů "konečné umístění kamery na zem-pravdy v dalších studiích.

V pyramidy vizualizace kamery, uživatelé zjistil, že je obtížné interpretovat 3D informace; většina měla zabrat oddělující překlad a rotace. Kromě toho, uživatelé nenašel indikátor vzdálenost užitečné. Obecně platí, že uživatelé přednost jednoduché vizualizaci; má jeden Okno vizualizace pomohl uživatelům soustředit se na úkolu. Uživatelé se stal unavený a ztratil, když museli přecházet mezi různými vizualizace windows. Kromě toho mohou uživatelé požádal o real-time zpětnou vazbu.

6.2.3 První Poslední studie uživatel. V našem závěrečném odhadu a vizualizaci, Nyní vypočítáme relativní kamery představují v reálném čase a přehlídku směr pohybovat pomocí dvou 2D šipek (viz obrázek 9) WE provedena dva další uživatel studie k ověření naši techniku.

V první studii konečné uživatele, jsme chtěli srovnávat naše šipkou vizualizace Technika s vizualizací lineární směsi. Kromě toho, jsme zařadili ohniskové odhad délky: museli uživatelé ručně odhadnout nastavení zoomu objektivu pomocí odhad lineární prolnutí, zatímco naše vizualizace automaticky vyřešen ohniskovou rozdíl. Hodnotili jsme přesnost, měřeno podle vzdálenosti mezi referenční a nové fotoaparáty. Postup. Vzhledem k tomu, referenční fotografie pořízené jiný Kamera jsme položili čtyři uživatelé dosáhnout hledisko kde se nachází referenční Fotografie byla pořízena s 3 minuty testovaného časového limit.We na dva kryté scény. Každý účastník zažil obě scény a techniky, ale každá scéna byl párován s pouze jediným refotografie Technika pro tohoto účastníka. Označený jsme referenční fotoaparát Poloha na mapě a měří vzdálenost od uživatelů "konečné umístění kamery na zem-pravdě. Jsme nežádali uživatelům vyberte první a druhou názory; které byly stanoveny mezi všemi uživatele.

Výsledky a závěry. Tabulka III ukazuje průměrnou vzdálenost mezi půda pravda a konečná místa, kde čtyři uživatelé vzali že rephotographs na dvou zkušebních případů. Chyba s naší metody byl méně než 8% chyby s lineárním směsi. Uživatelé zjistili, že naše 2D šípy byly snadno se učit a následovat. Obrázek 12 porovnává dva Výsledky rephotograph využívající obě techniky. V každém případě test, uživatelé vzal přesnější rephotographs s naším šipkou vizualizací než s lineárním vizualizací směsi.

6.2.4 Druhý Poslední studie uživatel. V naší studii konečné uživatele, my chtěl vyzkoušet naše programy interakce s uživatelem, včetně poskytování široký základní, kliknutím na zápasy a porovnání dvou fotografií s velkými rozdíly vzhled. Srovnávali jsme přesnosti výsledných re-fotografií pomocí našeho techniku ​​proti ty s naivní vizualizace. Zejména jsme se snažili porovnat přesnost hlediska lokalizace.

Postup. Srovnávali jsme naši techniku ​​s naivní vizualizace a použité referenční obrazy, pro něž umístění pozemní pravda je známo. Chcete-li scénář realističtější, budeme simulovat letitý vzhled na referenčních fotografiích, které jsme zajali: jsme převedli tonální aspekty ze vzorků staré fotografie na referenční fotografie [Bae et al. 2006], jak je znázorněno na obrázku 13. V důsledku toho, že referenční fotografie měly velkou vzhled odlišnosti od běžných fotografií. Zeptali jsme se šest uživatelům dosáhnout hledisko, kde byl referenční vyfotografovat do 10 minut. My testovali, tři venkovních scén. Každý účastník zkušený všechny scény a obě techniky, ale každá scéna spárována s jen jedna technika pro tohoto účastníka.

Pro obě metody, všichni uživatelé začal ze stejného výchozího místa. S naší technikou, jen jsme opravili první hledisko (jak počáteční místo), a požádal uživatelům zvolit druhou hledisko. Kromě toho, Uživatelé za předpokladu vzájemné shody mezi referencí a druhý snímek klepnutím na šest zápasů. V naivní vizualizace metoda jsme ukázali, jak lineární kombinaci a side-by-side vizualizací odkazu a aktuálního rámce, jelikož lineární směsi trpěl velkých vzhledových rozdílů mezi referenční a aktuální fotografie. Opět platí, že uživatelé museli ručně odhadnout nastavení zoomu objektivu pomocí naivní vizualizaci, zatímco naše vizualizace automaticky vyřešen délku rozdíl ohniskové vzdálenosti. Před každý uživatel studie, jsme poskytli uživatelům rychlý tutoriál obojího metody.

Výsledky a závěry. V každém případě test, uživatelé se přesnější re-fotografie s naším šipky vizualizací, než se naivní vizualizace. Obrázky 14 a 15 porovnat re-fotografie přijatá s naší technikou a ti, kteří využívají naivní vizualizaci. Zbývající paralaxa ve výsledcích re-fotograf pomocí naivní vizualizace je poměrně velká, zatímco naše metoda umožnila uživatelům, aby se minimalizovalo paralaxa.

Tabulka IV ukazuje průměrnou vzdálenost mezi vozovkou pravdě a konečné lokality, kde šest uživatelů vzal re-fotografie pro tři zkušební případy. Průměrná chyba s naší metody je 40% Průměrná chyba s lineárním směsi. Rozdíl vzdálenost stal menší, než je vnitřní případech. Ve vnitřních scénách, paralaxa byl subtilní, ale na venkovních scénách, uživatelé mohli všimnout několik důležitých podněty, jako je, zda staveb byl uzavřen, nebo ne. Ještě pořád mnoho lidí nemůže přijít na to, jak se pohybovat fotoaparátem k vyřešení paralaxy. S naivní směsi, uživatelé museli odhadovat Umístění a ohnisková vzdálenost referenčního kameru sami. S naší metody, uživatelé potřeba pouze následovat našeho šipkou vizualizace zatímco naše technika automaticky odhadl umístění a ohnisková vzdálenost referenční kamery.

## 6.3 Výsledky na historických fotografiích

Obrázky 16, 17, 18 a 19 ukazují naše výsledky re-fotografie historických fotografie pořízené neznámých kamerami. Obvykle to trvalo 15-30 minuty k dosažení požadované stanovisko. Zapotřebí tento úkol více rozsáhlý čas, protože jsme často museli chodit 50-100 metrů s notebookem a stativ, a křížové frekventovaných silnic. Na obrázku 19, aplikujeme styl přenést z odkazu na re-fotografie [Bae et al. 2006]. Tím, že odpovídá tónové aspekty, se stává ještě zřetelnější, které scény prvky jsou zachovány a které se změnily v průběhu času. Věrné re-fotografie odhalit změny, střech, oken, a celková sousedství.

## 6.4 Diskuse

Převážná část notebooku v současné době omezuje přenosnost a doufáme, že open-platformní digitální fotoaparáty s doplňkovým výpočetního výkonu Umožní re-fotografie přímo z fotoaparátu.

Náš odhad relativní pozice funguje nejlépe, když existuje dostatečná paralaxa mezi obrazy. Když se blíží hledisko, uživatel typicky spoléhá více na vyrovnávací směsi, které mohou omezit finále přesnost. Naše technika vyžaduje přiměřený počet funkcí body (kolem 20), a mohou trpět ve scénách s malým texturou. Scéna musí předložit dostatek 3D strukturu, aby se odhad bodu pohledu dobře položená. V případě, že scéna je většinou rovinný, může homography vyhovoval všem pár názorů a hledisko nelze dovodit.

Kromě toho přesnost výsledné re-fotografie závisí na tolerance uživatele k chybě. Například, uživatelé obvykle zaměřují Na památek ve středu obrazu, a nemusí všimnout, že Funkce směrem k obvodu nejsou dobře zarovnány. V případě, že uživatel jen kontroly zarovnání v centru, paralaxa směrem k obvodu může, není třeba vyřešit, jak je na obrázcích 15 a 17.

Sdílíme řadu omezení s tradičním re-fotografie: Je-li to žádoucí hledisko není k dispozici nebo je scéna occluded a nemůže být vidět na požadovaném pohledu, re-fotografie je nemožné. Nicméně, naše technika může ještě pomoci uživatelům uvědomit, že hledisko již není k dispozici.

Zvukový signál je přirozeným rozšířením naší vizualizaci, že Doufáme, že k prozkoumání v budoucnu.

# 7. ZÁVĚR

V tomto článku jsme popsali v reálném čase představující odhad a vizualizace Technika pro vedení uživatele při provádění re-fotografie. Naše metoda zahrnuje přístup ke kalibraci historické Kamera tím, že několik fotografií stejné scény, je wide-základní rekonstrukci, který se vyhýbá relativní odhad představovat degenerace, když uživatel dosáhne požadovaného cíle, a vizualizace Technika, která vede uživatele se dvěma 2D šipky a rotačně stabilizované aktuální pohled.

Jsme přesvědčeni, že naše práce ukazuje na vzrušující dlouhodobém horizontu Směr - vkládání více výpočty v kamerách na podporu složitější interakce v době záchytu, než nabízí současný komoditní hardware. Zatímco naše prototyp vyžaduje Přenosný počítač připojený ke kameře, doufáme, že další otevřené platformy kamer jsou vyvinuty v budoucnosti, které umožní větší experimentování v projektování nové uživatelské rozhraní, které lze spustit na kameru.

Poděkování Děkujeme MIT Computer Graphics Group, Adobe Advanced Technology Labs, anonymní recenzenti a pre-recenzenti, a Noah Snavely za jejich připomínky. Tento Práce byla podpořena dotací z Quanta, Shell a Adobe. Díky vydavatelům na refotografie knih pro jejich obrazy.