

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření synchronizace stereoskopických kamer

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš BERAN**
Osobní číslo: **E10B0284P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Měření synchronizace stereoskopických kamer**
Zadávatel katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte možnosti měření časové synchronizace stereoskopických kamer.
2. Změřte a statisticky vyhodnoťte odchylku synchronizace stereoskopických kamer spouštěných společným ovladačem.
3. Natočte vzorové stereoskopické záběry s pohyblivým objektem o známé rychlosti a uměle aplikujte chybu synchronizace při střihu videomateriálů.
4. Pomocí subjektivních testů zhodnoťte dopad rychlosti pohybu objektů na kvalitu při různé míře desynchronizace kamer.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ivo Veřtát, Ph.D.


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjaceslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

V úvodu této bakalářské práce, která je zaměřena na měření synchronizace stereoskopických kamer, nalezneme stručný popis stereoskopie a možnosti měření synchronizace stereoskopických kamer. Dále je zde změřena a statisticky vyhodnocena odchylka synchronizace běžných kamer ve stereoskopické montáži bez speciálního synchronizačního vstupu spouštěných společným dálkovým ovladačem. Hlavní část této práce se zabývá natočením vzorových stereoskopických záběrů s pohyblivým objektem o známé rychlosti, u těchto záběrů byla při střihu uměle aplikována chyba synchronizace. Pomocí subjektivních testů byl zhodnocen dopad rychlosti pohybu objektů na kvalitu při různé míře desynchronizace.

Klíčová slova

Stereoskopie, synchronizace kamer, subjektivní hodnocení kvality stereoskopického videa

Abstract

In the introduction of this bachelor thesis, there is mentioned a brief description of the stereoscopy and synchronization measurement options. In the next part, there is measured and statistically evaluated the error of the synchronisation of common cameras in a stereoscopic installation without any special synchronisation input and initiated by the common remote control. The main part of this work deals with recording samples of stereoscopic shots with object moving at a known speed. Considering these shots, there was applied the mistake of synchronization. There were carried out subjective tests in order to evaluate the impact of the speed of the object movements on the quality in a various level of desynchronization.

Key words

Stereoscopies, camera synchronization, quality evaluation of stereoscopic video by subjective methods

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.2014

.....

Lukáš Beran

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ivo Veřtátovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, zapůjčení kamer, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 STEREOSKOPIE	11
1.1 HISTORIE STEREOSKOPIE	11
1.2 MODERNÍ METODY STEREOSKOPICKÉHO ZÁZNAMU	13
1.3 MODERNÍ METODY STEREOSKOPICKÉ PROJEKCE	14
1.3.1 Pasivní 3D projekce	14
1.3.2 Aktivní 3D projekce	14
1.3.3 Autostereoskopické monitory	15
2 SYNCHRONIZACE	15
2.1 MĚŘENÍ SYNCHRONIZACE POMOCÍ CRT MONITORU	16
2.2 MĚŘENÍ SYNCHRONIZACE POMOCÍ ZVUKOVÉ STOPY	17
3 SPOUŠTĚNÍ KAMER	17
3.1 LANC PROTOKOL	17
3.2 SPOLEČNÝ BEZDRÁTOVÝ OVLADAČ	18
4 MĚŘENÍ ODCHYLKY SYNCHRONIZACE	19
4.1 POSTUP MĚŘENÍ SYNCHRONIZACE POMOCÍ CRT MONITORU	19
4.2 VÝPOČET ODCHYLKY SYNCHRONIZACE	20
4.3 NAMĚŘENÉ ODCHYLKY SYNCHRONIZACE A JEJICH ZHODNOCENÍ	21
5 VLIV SYNCHRONIZACE NA KVALITU ZÁBĚRŮ	22
5.1 POSTUP PŘI POŘIZOVÁNÍ VZOROVÝCH ZÁBĚRŮ	22
5.2 SUBJEKTIVNÍ TESTY PŘI RŮZNÉ MÍŘE DESYNCHRONIZACI KAMER	25
5.2.1 Postup při hodnocení	25
5.3 VÝSLEDKY SUBJEKTIVNÍCH TESTŮ A JEJICH ZHODNOCENÍ	27
ZÁVĚR	30
POUŽITÁ LITERATURA	31
PŘÍLOHY	1

Úvod

V dnešní době se můžeme setkat s mnoha filmy, které jsou natočeny ve stereoskopickém formátu. Je to především kvůli tomu, aby měl divák lepší požitek ze sledování dané scény. Proto se na trhu objevuje více zařízení pro zobrazení stereoskopických záběrů a výrobcům jde především o to, aby měl divák co největší prožitek při sledování dané scény.

Se stereoskopií se dnes nesetkáme jen u 3D filmů, ale využití lze také nalézt v různých technických odvětvích. Jeden z příkladů využití je u dálkového řízení robotů či různých manipulátorů. Kamery jsou umístěny na zařízení a osobě, která jej ovládá, se obraz z kamer zobrazí prostorově a díky tomu má lepší přehled o tom, co se se zařízením děje. Další využití prostorového zobrazení lze nalézt v moderní vědě, kde má lékař provádějící složitý zákrok možnost danou situaci podrobně nastudovat a poté má lepší přehled o problému. V lékařství existují technologie, které umožňují provést lékařský zákrok na dálku, v tomto případě lékař potřebuje mít přesně vyobrazenou danou situaci a díky prostorovému zobrazení má lepší představu o daném stavu.

Pokud se rozhodneme pro pořízení stereoskopických záběrů, lze zakoupit jedno záznamové zařízení, které bude obsahovat dva objektivy nebo 3D předsádku. Ovšem s tímto typem záznamového zařízení nelze získat kvalitní stereoskopický záznam ve full HD rozlišení. Pokud chceme pořídit kvalitní stereoskopické záběry ve skutečném 3D full HD rozlišení je zapotřebí použít dvojici shodných záznamových zařízení.

V případě, že se rozhodneme záznam pořídit s dvojicí kamer, tak je zapotřebí upevnit kamery na speciální stativ, aby byly umístěny vedle sebe. Většina výrobců kamer dnes již dodává bezdrátový ovladač, kterým je možné dvojici kamer ovládat najednou. Zde ovšem nastává problém, v případě zaznamenávání pohyblivé scény může dojít k degradaci kvality záběrů chybnou synchronizací a možnost jejich korektní synchronizace chybí vzhledem k absenci synchronizačních vstupů na domácích kamerách.

Cílem této práce je změřit chyby synchronizace běžných domácích kamer spouštěných společným dálkovým ovladačem a posoudit vliv těchto chyb na vnímanou kvalitu záběrů při různé velikosti desynchronizace videosekvencí.

Seznam symbolů

$t_{\text{řádku}}$ [ms].....	Doba vykreslení jednoho řádku na CRT monitoru
$t_{\text{snímku}}$ [ms].....	Doba vykreslení jednoho snímku na CRT monitoru
t_{odch} [ms]	Časová odchylka synchronizace kamer
t_{odchcelk} [ms]	Celková časová odchylka synchronizace kamer
$r_{1,2}$ [-].....	Číslo řádky prvního, druhého snímku
$v_{1,2}$ [-].....	Počet vertikálních čar testovacího obrazce
f_{hor} [Hz].....	Horizontální frekvence CRT monitoru
f_{vert} [Hz].....	Vertikální frekvence CRT monitoru
ltr [-].....	Pohyb objektu z levé strany do pravé
rtl [-].....	Pohyb objektu z pravé strany do levé

1 Stereoskopie

Stereoskopie je označení pro technologii, která nám umožňuje vnímat dvojrozměrné scény prostorově - trojrozměrně. Pro správné vnímání trojrozměrného prostoru je potřeba dodat pro každé oko odlišný, prostorově posunutý obraz. Mozek tyto dva rozdílné obrazy vyhodnotí a získá z nich trojrozměrný obraz obsahující informaci s hloubkou obrazu.

1.1 Historie stereoskopie

V roce 1832 Angličan Charles Wheatstone zkonstruoval zrcadlové zařízení, které umožňovalo zobrazit vložený výkres prostorově, toto zařízení nazval „stereoskop“. O šest let později Charles Wheatstone publikoval teorii binokulárního vidění, tedy že se obrazy vnímané simultánně oběma očima spojí v jeden a umožní vnímat hloubku prostoru.

David Brewster v roce 1844 vynalezl stereoskop, který byl menší, jednodušší než Wheatstonův a umožňoval jednoduché vložení karty s natištěnou předlohou. Vložená předloha se pozorovateli zobrazila prostorově a pomocí optického hranolu byla zvětšena. Brewster s Francouzským optikem Jules Duboscq v roce 1850 umožnili veřejnosti pořídit si první 3D fotografii pomocí lentikulárního stereoskopu. V roce 1851 popularita stereoskopů prudce stoupala, stereoskopické karty zobrazovaly vzdálené země, jako Egypt a světová hlavní města, například New York, Paříž a San Francisco. Jeden z nejpůvodnějších stereoskopů byl vynalezen Američanem Oliverem Wendell Holmesem v roce 1860, lidé si tento stereoskop velmi oblíbili díky jeho jednoduchosti.



Obr. 1 Stereoskop vynalezený Charlesem Wheatstonem – převzato z [7].



Obr. 2 Stereoskop vynalezený Oliverem Wendell Holmesem – převzato z [10].

V roce 1858 Charles d'Almeida doporučil používat červenou a modrou barvu filtrů na čočky dvou projektorů a následně se na promítnutý obraz dívat s brýlemi, které měli stejné filtry. Fotograf Louis Ducos du Hauron se tímto doporučením inspiroval a v roce 1891 objevil metodu pro tisknutí dvou barevných obrazů na stejný fotografický papír. Toto umožnilo vidět 3D obrazy pouze s barevnými brýlemi jako s jediným doplňkem. Komericializace tohoto objevu začala kolem roku 1920 a o dva roky později to bylo poprvé použito v kině, při promítání 3D snímku *The Power Of Love*. Ve dvacátých a třicátých letech minulého století zájem o 3D filmy pomalu upadal, ale poté nastal zlatý věk 3D.

V 50. letech Arch Oboler natočil film *Bwana Devil* který se v USA promítal ve více než v 5000 kinech, dále natočil film *House of Wax*, tento film měl poprvé stereo zvuk. Jelikož se filmy promítaly naráz ze dvou promítaček, tak často docházelo k desynchronizaci a výsledný 3D efekt byl velmi špatný. V 60. letech Arch Onoler přišel s metodou *Space-Vision*, tato metoda používala dva různé záběry nad sebou na jednom filmu a na promítačce byla speciální čočka, která tyto záběry sloučila v jeden. Dále vznikla metoda *Stereovision*, snímky byly umístěny vedle sebe a film se promítal přes speciální filtr, který oba snímky sloučil do jednoho a vznikl prostorový efekt.

V roce 1986 na světové výstavě EXPO v Kanadě byla světu představena technologie IMAX 3D. Od té doby se tato technologie zdokonalila až do dnešní podoby, kdy nabízí nejlepší 3D zážitek na světě. Tato kapitola byla čerpána z [1].

1.2 Moderní metody stereoskopického záznamu

Pro vnímání trojrozměrného prostoru potřebujeme pořídit dva horizontálně posunuté snímky. Tyto dva horizontálně posunuté snímky lze pořídit jedním záznamovým zařízením, které musí obsahovat dva objektivy nebo 3D předsádku. U tohoto typu záznamového zařízení nastává problém se stereobází, tedy se vzdáleností mezi objektivy, která bývá zpravidla malá a poskytuje pouze omezenou hloubku obrazu. Dalším problémem při pořizování záběrů jedním záznamovým zařízením s 3D předsádkou je rozlišení, jelikož se pro každý snímek použije pouze polovina plochy snímacího prvku kamery. Tedy pokud máme kameru, která nahrává v rozlišení 1920x1080, tak výsledné snímky budou maximálně v rozlišení 960x1080, reálně však ještě méně. Obraz také trpí geometrickým zkreslením způsobeným nepřesným optickým zúžením levého a pravého obrazu na poloviční šířku.



Obr. 3 Kamera Panasonic s 3D předsádkou – převzato z [8].

Pro natáčení složitějších scén se používají dvě horizontálně posunutá záznamová zařízení. Tato záznamová zařízení jsou umístěna vedle sebe na speciálním nástavci, na němž si můžeme měnit stereobázi závisle na dané scéně. Je zde zachované plné rozlišení obrazu, kterým daná záznamová zařízení disponují a nedochází ke zkreslení geometrie obrazu vlastní 3D předsádkou. Nastává zde však problém při snímání rychlého pohybu s nepřesnou synchronizací kamer, tj. s pořizování levého a pravého snímku v mírně jiném časovém okamžiku.



Obr. 4 Kamery a stereoskopický nástavec.

1.3 Moderní metody stereoskopické projekce

Metody stereoskopické projekce jsou založeny na principu ošálení lidského oka, respektive mozku ve vztahu vnímání hloubky obrazu na dvojrozměrné ploše. Všechny existující metody pracují na podobném principu a to, že se snaží podat každému oku odlišný obraz, ten pak náš mozek vyhodnotí jako prostorový.

1.3.1 Pasivní 3D projekce

Pro pasivní 3D projekci existují dvě metody. První metoda využívá dva synchronně pracující projektory. Obraz z připojeného zdroje signálu se synchronně přivádí oddělený pro levé oko do jednoho projektoru a pro pravé oko do druhého projektoru. Před první projektor je umístěn polarizační filtr propouštějící světlo pouze ve vertikální polarizační rovině, u druhého projektoru je polarizační filtr, který propouští světlo v horizontální polarizační rovině. Obrazy z obou projektorů se promítnou na stejnou projekční plochu, tato plocha je vyrobena ze speciálního materiálu, který zachovává polarizaci odraženého světla. Pozorovatel musí mít správné brýle s polarizačními filtry, aby do každého oka dopadl příslušný obraz.

Tato metoda se využívá převážně na místech, kde se promítá prostorový obraz více lidem, jelikož brýle pro pasivní projekci jsou levné a na údržbu nenáročné. Nevýhodou této metody je, že k promítnutí potřebujeme dva projektory a speciální projekční plátno.

Druhou metodou pro pasivní 3D projekci je metoda, která také funguje na polarizaci světla v určitém směru. Na 3D televizi nebo 3D monitor je umístěna speciální prokládaná maska složená z polarizačních proužků, které procházející světlo propouštějí v odlišných rovinách. Pozorovatel musí mít polarizační brýle, které propouštějí světlo v odlišných rovinách a tím se docílí toho, že se do každého oka dostane odlišný obraz.

Bohužel tato metoda dokáže zobrazit obraz pro každé oko v polovičním rozlišení a možnost sledování ve vertikálním úhlu je velmi omezená [2].

1.3.2 Aktivní 3D projekce

Pro aktivní 3D projekci je zapotřebí zobrazovací zařízení pracující s dvakrát vyšší snímkovou frekvencí než zobrazovací zařízení pro 2D projekci. Snímky jsou vysílány za sebou pro levé a pravé oko s frekvencí nejméně 120 snímků za sekundu. Zdroj obrazu pomocí emitoru IrDA nebo Bluetooth synchronizuje 3D aktivní brýle. Aktivní 3D brýle na základě synchronizačního signálu stmívají očníci pro levé nebo pravé oko. Výsledkem je, že každý lichý snímek vidí divák jedním okem a sudý snímek druhým okem [3].

1.3.3 Autostereoskopické monitory

Autostereoskopické monitory mají výhodu oproti výše uvedeným technologiím, že nevyžadují pro pozorování scény speciální 3D brýle. Pixely na obrazovce jsou rozděleny tak, aby část z nich byla vidět levým okem a zbytek pravým okem. Poté zdroj signálu vyše dva odlišné snímky a ty se pozorovateli zobrazí prostorově.

Rozdělení pixelů lze docílit tím, že se před monitor umístí paralaxní bariéra. Jde o filtr, který pro každé oko odstíní konkrétní sloupec pixelů. Pravé oko vidí například pouze pixely v sudém sloupci a levé oko vidí pixely pouze v lichém sloupci.

Další možností jak dodat každému oku odlišný obraz je použít lentikulární čočky. Lentikulární čočky lámou světlo pod určitým úhlem a tím se docílí toho, že se do každého oka dostane odlišný obraz. Díky zaoblenému povrchu mají lentikulární čočky širší rozsah, což je výhoda oproti paralaxní bariéře.

Bohužel tyto dvě varianty může použít pouze jeden divák, pro více lidí jsou tyto varianty nepoužitelné. Dále je zde problém, že si člověk musí najít správnou pozici před monitorem, kde prostorový efekt funguje a vidí ho dobře. Tento problém se dá vyřešit systémem pro sledování pohybu hlavy pozorovatele.

Autostereoskopický monitor se systémem pro sledování hlavy je vybaven kamerovým systémem. Ten sleduje hlavu pozorovatele a fyzicky posouvá optický filtr před monitorem tak, aby se pozorovací zóny měnily v závislosti na pozici diváka před monitorem [9].

2 Synchronizace

Pokud je záznam pořízen jedním zařízením, které má dva objektivy nebo 3D předsádku, odpadá problém se synchronizací, protože oba obrazy se promítají na společný snímací prvek. V případě pořizování záznamu dvojicí kamer je důležité, aby tyto dvě kamery pracovaly zcela synchronně. Po spuštění nahrávání se obě kamery musí spustit ve stejný čas, pokud by se jedna kamera opozdila a natáčela se pohyblivá scéna, výsledný 3D obraz bude mít špatnou hloubku nebo bude daný objekt rozdvojený.

Například automobil jedoucí rychlostí 100 km/h urazí za milisekundu přibližně 3 centimetry. 3 centimetry na vzdálenost 10 metrů tvoří přibližně 0.3% zorného pole. Pokud levá kamera natočí automobil milisekundu před pravou kamerou, tak paralaxa vytvořená synchronizační chybou může být 5 nebo 6 pixelů velká. Tato chyba je implementována jako hloubkový rozdíl několik metrů [1].

Běžné domácí kamery dnes již postrádají synchronizační vstupy, a proto je další část této práce zaměřena na zjištění velikosti časové nesynchronnosti kamer, pokud jsou spouštěny jedním dálkovým ovladačem a na posouzení vlivu na vnímanou kvalitu záběrů.

2.1 Měření synchronizace pomocí CRT monitoru

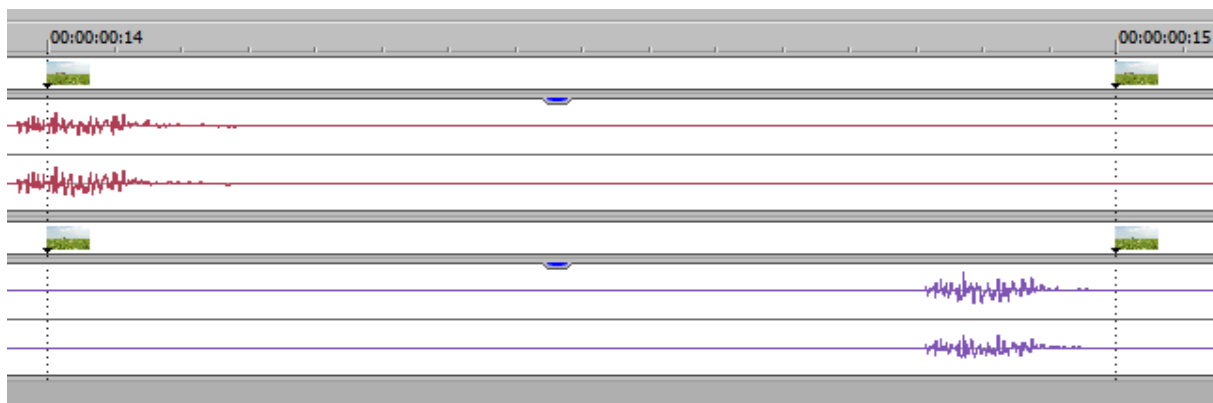
Při tomto měření se využívá elektronový paprsek CRT monitoru jako referenční pohyb o známé rychlosti a PC, na kterém je spuštěný software Camera Sync Tester (dostupný z: www.3dtv.at). Pomocí tohoto softwaru je možné vypočítat odchylku synchronizace kamer. Kamery umístěné před CRT monitor je zapotřebí spustit ve stejnou dobu, k tomu se využívá například společné dálkové ovládání. Pro výpočet je zapotřebí znát vertikální a horizontální kmitočet CRT monitoru, který je nastaven v programu pro měření synchronizace a správně odečíst čísla řádků z pořízených nahrávek. Více o této metodě synchronizace stereoskopických kamer naleznete ve čtvrté kapitole.



Obr. 5 Měření synchronizace pomocí CRT monitoru.

2.2 Měření synchronizace pomocí zvukové stopy

Při tomto druhu měření synchronizace je zapotřebí využít software, který umožňuje zobrazit zvukovou a video stopu odděleně. Na začátku nahrávání je zapotřebí zaznamenat zvuk, způsobený například klapkou nebo tlesknutím. V programu pro střih videa si zobrazíme audio stopu a pomocí kurzorů najdeme začátek námi vydaného zvukového efektu v záznamu levé i pravé kamery. Poté na časové ose odečteme čas u první audio stopy a u druhé audio stopy. Rozdíl těchto časových intervalů je výsledná odchylka synchronizace kamer.



Obr. 6 Audio stopa a desynchronizace kamer.

3 Spouštění kamer

V případě pořizování stereoskopického záznamu pomocí dvou kamer je zapotřebí, aby obě kamery spustily záznam ve stejnou dobu. Pro toto spouštění je možné využít u kamer pracujících s LANC protokolem drátový ovládač Ste-Fra LANC. K moderním kamerám je možné zakoupit bezdrátový ovládač a pomocí něho ovládat danou dvojici kamer.

3.1 LANC protokol

LANC protokol byl vyvinut firmou Sony pro vzájemnou komunikaci a ovládání dvou záznamových zařízení. Jedná se o obousměrnou sériovou komunikaci po jednom vodiči s otevřeným kolektorem. Vzájemně propojená zařízení mohou mezi sebou komunikovat a vysílat informace o stavu, ve kterém se momentálně nachází, nebo lze použít zařízení, které bude sloužit k obsluze záznamových zařízení.

Ovládaný přístroj generuje rámeček, který je tvořen jedním start bitem a osmi datovými bity, tento rámeček se opakuje v jednom komunikačním cyklu celkem osmkrát. Doba trvání jednoho bitu je 104 μ s, to odpovídá rychlosti 9600 Bd. Doba mezi start bity jednotlivých rámečků se pohybuje mezi 1200 μ s až 1400 μ s, tato doba se liší v závislosti na záznamovém zařízení. Celý komunikační cyklus je dlouhý 20 ms pro PAL/625 a 16,6 ms pro NTSC/525.

Některé rámce v komunikačním cyklu jsou určeny pro ovládání záznamových zařízení a jiné rámce generuje ovládané zařízení pro informaci o svém stavu [4].

Ste-Fra LANC ovladač je doplněk určený především pro kamery značky SONY. LANC ovladač se ke kameře připojuje pomocí kabelu do konektoru JACK 2,5mm nebo u novějších kamer lze tento ovladač připojit pomocí konektoru A/V R. Umožňuje především spustit kamery ve stejný čas a to až na tisíciny sekundy přesně. Ovladač disponuje sedmi segmentovým displejem, na kterém je zobrazena časová odchylka synchronizace mezi dvěma kamerami. Na ovladači jsou tlačítka: zapnutí/vypnutí kamer, zapnutí/vypnutí záznamu, zoom, pořízení fotografie, autofocus a další, záleží na verzi a výrobci daného ovladače[5].



Obr. 7 Ste-Fra LANC ovladač - převzato z [5].

3.2 Společný bezdrátový ovladač

Součástí balení u nových kamer v dnešní době bývá bezdrátový ovladač. Ovladač na sobě má tlačítka, která umožňují kompletní ovládání kamer a pokud potřebujeme ovládat dvě kamery současně je to nejsnazší a nejrychlejší řešení.

Lze spustit nahrávání u obou kamer současně, bohužel tato metoda spuštění není tak přesná, jako kdybychom spouštěli kamery pomocí Ste-Fra LANC ovládání a dochází zde k desynchronizaci kamer. Dále je zde nevýhoda pokud chceme kamery ovládat v otevřeném prostoru (například venku), kamery často nereagují na stisk tlačítka na ovladači. Je to způsobeno tím, že kamery mají přijímač signálu od dálkového ovládání umístěný v přední části a signál zachytí jen z určitého úhlu.



Obr. 8 Ovladač pro kameru Panasonic.

4 Měření odchyly synchronizace

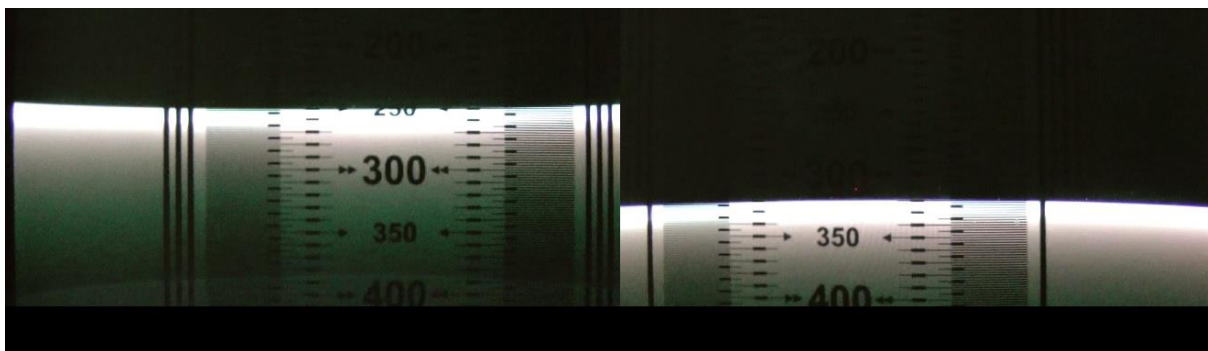
V této kapitole se budu podrobně zabývat metodou pro měření odchyly synchronizace pomocí CRT monitoru. Je zapotřebí pro tento typ měření použít CRT monitor, jelikož elektronový paprsek je zde užít jako referenční pohyb. Tato metoda není funkční s jinými typy zobrazovacích zařízení, jako například s LCD monitorem.

4.1 Postup měření synchronizace pomocí CRT monitoru

Na počítači spustíme program Camera Sync Tester (dostupný z: www.3dtv.at) s parametrem, který nastaví rozlišení a obnovovací frekvenci. Ve vlastnostech programu upravíme parametry testovacího obrazce, přidáním parametrů: -x (horizontální rozlišení), -y (vertikální rozlišení), -f (vertikální frekvence). Například pokud cíl upravíme takto: Syncctest.exe -x640 -y480 -r60, tak se program spustí v rozlišení 640x480 s vertikální frekvencí 60 Hz.

U kamer upevněných ve speciálním nástavci nastavíme stereobázi, která přibližně odpovídá rozteči očí tedy 7 cm. Kamery umístíme před CRT monitor do takové vzdálenosti, aby na displeji u kamer byly dobře vidět horizontální pruhy, v případě tohoto měření byly kamery umístěny 20 cm před CRT monitorem. Pokud jsou horizontální pruhy špatně viditelné je zapotřebí v nastavení kamer upravit čas závěrky, v případě tohoto měření byl čas závěrky po celou dobu nastaven na 1/4000. Poté společným ovládním spustíme záznam.

Pořízené videosekvence překopírujeme do počítače a spustíme v programu pro přehrávání 3D videa například Stereoscopic Player (dostupný z: www.3dtv.at).



Obr. 9 Ukázka videosekvencí pro výpočet synchronizační odchyly.

V každém snímku je vidět pozice elektronového paprsku CRT monitoru, tato pozice se obvykle liší pro levou a pravou kameru. To znamená, že zde vznikla synchronizační odchylka. Z prvního snímku pořízeného kamerou umístěnou vlevo odečteme číslo řádky, to odpovídá v tomto případě hodnotě 250 a počet vertikálních čar je zde 3. Z druhého snímku pořízeného kamerou umístěnou vpravo odečteme číslo řádky 320 a počet vertikálních čar 1. Dále je nutné zjistit horizontální frekvenci monitoru, tuto frekvenci lze zjistit v menu nastavení pro CRT monitor.

4.2 Výpočet odchylky synchronizace

Označení	Název	Hodnota
r_1	číslo řádky prvního snímku	250
r_2	číslo řádky druhého snímku	320
v_1	počet vertikálních čar u prvního snímku	3
v_2	počet vertikálních čar u druhého snímku	1
f_{hor}	horizontální frekvence	31600 Hz
f_{vert}	vertikální frekvence	60 Hz

Tab. 1 Hodnoty pro výpočet odchylky synchronizace.

Doba, za kterou elektronový paprsek vykreslí jeden řádek:

$$t_{\text{řádku}} = \frac{1}{f_{hor}} = \frac{1}{31600} = 0.0317 \text{ ms} \quad (1)$$

Doba, za kterou elektronový paprsek vykreslí jeden snímek:

$$t_{\text{snímku}} = \frac{1}{f_{vert}} = \frac{1}{60} = 16.66 \text{ ms} \quad (2)$$

Pro výpočet časové odchylky t_{odch} je zapotřebí dobu potřebnou pro vykreslení jednoho řádku vynásobit rozdílem čísel řádek.

$$t_{odch} = \frac{(r_2 - r_1)}{f_{hor}} = \frac{(320 - 250)}{31600} = 2.22 \text{ ms} \quad (3)$$

Pokud na prvním a na druhém snímku není zobrazen stejný počet vertikálních čar, pak je synchronizační odchylka větší než doba trvání jednoho cyklu obnovy obrazovky. Je zapotřebí k časové odchylce t_{odch} přičíst čas jednoho snímku vynásobený rozdílem

vertikálních čar. Poté je výsledek absolutní hodnota z celkové synchronizační odchylky t_{odchcelk} .

$$t_{\text{odchcelk}} = \left| \frac{(r_2 - r_1)}{f_{\text{hor}}} + \frac{(v_2 - v_1)}{f_{\text{vert}}} \right| = \left| \frac{(320 - 250)}{31600} + \frac{(3 - 1)}{60} \right| = 31.12 \text{ ms} \quad (4)$$

4.3 Naměřené odchylky synchronizace a jejich zhodnocení

Cílem měření je změřit časovou desynchronizaci kamer spouštěných jedním dálkovým ovladačem a také zda je časová desynchronizace závislá na intervalu vypnutí kamer. Je tedy zapotřebí pořídít více videosekvencí o minimální délce pěti sekund. Videosekvence je nutné pořídít neprodleně za sebou nebo mezi jednotlivými videosekvencemi kamery vypnout a zapnout. Kamery mají uvnitř svoje vlastní hodiny, a tím že se vypnou a zapnou, dojde k opětovnému spuštění vnitřních hodin od začátku.

Následující tabulka zobrazuje část vypočtených hodnot odchylky synchronizace. V prvním sloupci jsou vypočteny hodnoty ze vzorových záběrů pořizovaných neprodleně za sebou, je zde vidět, že po každém spuštění záznamu došlo k desynchronizaci. V druhém a třetím sloupci jsou vypočteny hodnoty ze vzorových záběrů, mezi nimi docházelo k vypnutí kamer.

Bez vypnutí kamer	Vypnutí kamer po každém záznamu	Vypnutí kamer po 5 záznamu
12,222	0,317	0,000
50,635	0,317	0,000
21,111	0,000	0,000
12,222	0,317	0,000
8,889	0,317	0,317
21,111	50,317	0,317
4,444	33,016	5,397
17,302	0,317	15,397
11,905	8,413	0,000
17,619	0,000	0,000

Tab. 2 Ukázka vypočtených hodnot v [ms].

Z vypočtených hodnot vyplívá, že desynchronizace kamer je náhodná a tedy pokud by se kamery spouštěné společným dálkovým ovladačem používaly pro natáčení pohybu, je zapotřebí videosekvence v programu pro střih videa synchronizovat.

Dále pokud vezmeme v potaz počet snímků zaznamenaných kamerami za sekundu, v tomto případě každá z kamer zaznamenávala 25 snímků za sekundu, tak doba jednoho snímku je 40ms. Z vypočtených hodnot tedy vyplývá, že došlo často k desynchronizaci větší než jeden snímek.

V případě že je levá a pravá videosekvence výrazně desynchronizovaná, vzniká zde problém při sledování dané stereoskopické scény s kvalitou pohyblivého objektu. Proto je nutné výsledné nahrávky s pohybujícím se objektem synchronizovat softwarově při stříhu videomateriálů. Takto lze částečně snížit desynchronizaci kamer větší než doba trvání poloviny snímku. Např. změřenou desynchronizaci 50,317ms lze kompenzovat vzájemným posunem záběrů levé a pravé kamery o dobu jednoho snímku při stříhu, výsledná desynchronizace po kompenzaci pak bude 10,317ms. Obdobně lze desynchronizaci 33,016ms kompenzovat na -6,984ms, kde změna znaménka desynchronizace značí změnu v předbíhání záběru pořízeného levou nebo pravou kamerou oproti původnímu záběru.

5 Vliv synchronizace na kvalitu záběrů

Při snímání pohyblivého objektu je zapotřebí spustit kamery současně, jelikož při pohyblivé scéně je míra desynchronizace značně viditelná. Desynchronizované záběry působí na pozorovatele dané scény špatným prostorovým vjemem a pohyblivý objekt může být rozdvojený nebo může mít špatnou hloubku obrazu. V následující části práce proto budou natočeny vzorové videozáběry s pohybujícím se objektem, určena časová desynchronizace záběrů a záběry podrobeny subjektivním testům vnímané kvality.

5.1 Postup při pořizování vzorových záběrů

Vzorové záběry pro posouzení vlivu desynchronizace kamer na hloubku obrazu a celkový prostorový vjem dané scény je zapotřebí pořizovat na objektu, který se pohybuje známou rychlostí.

V mém případě byly záběry pořízeny na pohyblivém automobilu, který projížděl z pravé strany do levé a naopak konstantní rychlostí 50 km/h. Záběry byly pořizovány z různých vzdáleností od pohybujícího se automobilu, nejprve ze vzdálenosti 10 metrů, poté ze vzdálenosti 15 metrů a 20 metrů. Změna vzdálenosti kamer od pohybujícího se objektu je zapotřebí, jelikož se změní perspektiva pohyblivého objektu v dané scéně a jeho relativní rychlost posunu v obrazovém poli. Stejná časová nesynchronnost kamer může mít v takovýchto případech jiný výsledný 3D efekt a jeho případné poškození.



Obr. 10 Ukázka videosekvencí pro levé a pravé oko ze vzdálenosti 10m.



Obr. 11 Ukázka videosekvencí pro levé a pravé oko ze vzdálenosti 15m.



Obr. 12 Ukázka videosekvencí pro levé a pravé oko ze vzdálenosti 20m.

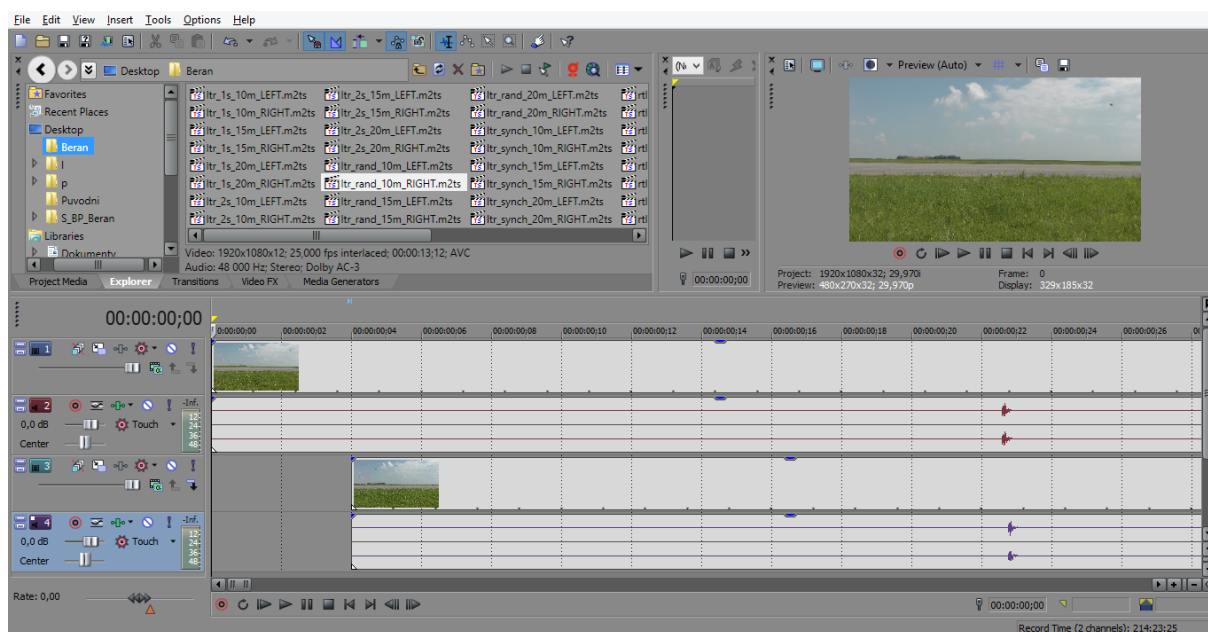
Spouštění kamer bylo prováděno pomocí společného bezdrátového ovladače, který byl dodán od výrobce kamer. Bohužel nastal problém s ovládáním kamer, jelikož kamery špatně reagují v otevřeném prostoru na signál od ovladače. Proto bylo nutné ovladač držet těsně před přední částí kamer, poté kamery reagovaly poměrně přesně. Při každém spuštění záznamu bylo zapotřebí vydat zvuk, aby bylo možné v programu pro stříh videa rozpoznat, jak velká je synchronizační odchylka.

Každou videosekvenci je zapotřebí importovat do programu, který je určen pro stříh videa a lze v něm pomocí zvukové stopy rozpoznat, zda byly videosekvence pořízeny synchronně nebo zda při záznamu došlo k desynchronizaci kamer. Dále videosekvence byly

editovány pro využití v subjektivních testech, kde bylo zapotřebí vytvořit zpoždění mezi videosekvencemi.

Pro editaci videosekvencí byl využit program Sony Vegas, v tomto programu lze poměrně jednoduše realizovat zpoždění mezi videosekvencí určenou pro levé oko a pravou videosekvencí určenou pro pravé oko, popřípadě upravit synchronizační odchylku a výsledné videosekvence exportovat do mnoha formátů, které program nabízí.

Videosekvence určené pro editaci je zapotřebí importovat do programu, videosekvenci určenou pro levé oko umístíme do první stopy a videosekvenci určenou pro pravé oko do druhé stopy. Po umístění jednotlivých videosekvencí do programu dojde k vykreslení zvukové stopy, na níž lze nalézt zvukovou špičku vytvořenou tlesknutím a pomocí ní lze poznat, o kolik snímků jsou videosekvence desynchronizované. Pokud je zapotřebí videosekvence synchronizovat stačí jednu videosekvenci posunout tak, aby byly zvukové špičky nad sebou, jak je zobrazeno na obrázku 13. Podobným způsobem lze realizovat zpoždění o jeden, dva či více snímků.



Obr. 13 Synchronizace pomocí programu Sony Vegas.

Pokud jsou úpravy kompletní, je zapotřebí v nastavení programu zvolit, o jaký mód 3D se jedná. V našem případě bylo zvoleno Side by side. Dále je zapotřebí označit videosekvence a v kontextové nabídce zvolit možnost: Pair as Stereoscopic 3D Subclip, tato volba složí obě videosekvence do jedné. Nakonec stačí vybrat v menu možnost Render As a nastavit si výchozí formát, ve kterém chceme mít dané video uložené, v tomto případě byl zvolen formát *.m2ts [6].

5.2 Subjektivní testy při různé míře desynchronizaci kamer

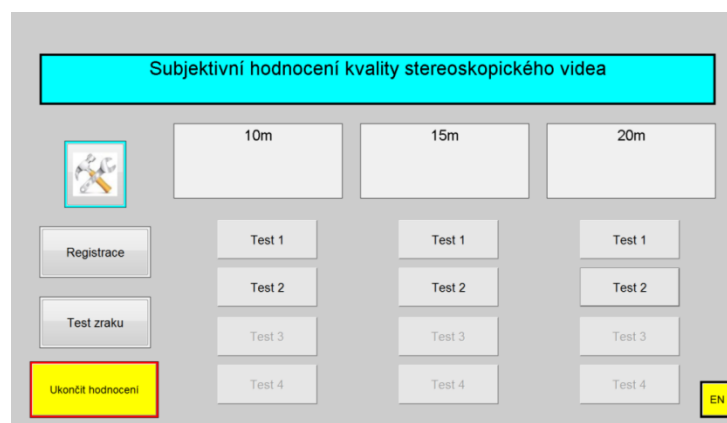
Pomocí subjektivních testů lze zhodnotit dopad míry desynchronizace videosekvencí na vnímání kvality pohyblivého objektu. V další části uvedu postup pro hodnocení pomocí subjektivních testů a zhodnotím celkové výsledky testů.

5.2.1 Postup při hodnocení

Subjektivní hodnocení kvality stereoskopických videosekvencí se provádí v testovací temné komoře, kde je umístěn 3D televizor Panasonic, konkrétně model TX-P42UT50B. Na televizoru je přehrána příslušná videosekvence a na počítači je hodnotícímu člověku spuštěn program pro zaznamenávání výsledků hodnocení vnímané kvality.

Při hodnocení se postupuje dle doporučení ITU-R BT.2021. Toto doporučení přesně stanovuje několik metodik určených pro hodnocení kvality stereoskopického videa. Tyto metodiky testování vycházejí z doporučení ITU-R BT.500, které je určeno pro subjektivní hodnocení kvality 2D obrazu a úspěšně se používá mnoho let pro hodnocení kvality obrazu, kvality hloubky a vizuálního komfortu [11].

V tomto případě byla použita metoda Single-Stimulus tedy bez referenční metoda, neboť neexistuje referenční záběr s ideální synchronizací. Celkové hodnocení je tvořeno několika testy, které jsou dále rozděleny do více testovaných videosekvencí. Testované videosekvence byly rozděleny do tří kategorií, dle vzdálenosti od pohybujícího se objektu. První kategorie obsahovala záběry pořízené ze vzdálenosti 10 metrů od pohybujícího se objektu. Ve druhé kategorii byly videosekvence pořízeny ze vzdálenosti 15 metrů od pohybujícího se objektu a v poslední kategorii byly videosekvence pořízeny ze vzdálenosti 20 metrů od pohybujícího se objektu. Dále každá z těchto kategorií byla rozdělena na dvě podkategorie. V první podkategorii se pohyblivý předmět pohyboval z pravé strany do levé a ve druhé podkategorii se pohyblivý předmět pohyboval z levé strany do pravé. Každá z podkategorií obsahuje celkem 5 videosekvencí, z toho jedna je trénovací a následující čtyři jsou hodnoceny.



Obr. 14 Ukázka testovacího rozhraní.

Hodnotícímu člověku se na začátku každého testu přehraje trénovací videosekvence, tato videosekvence není hodnocena a slouží pouze pro to, aby hodnotící získal představu jak má daná scéna správně vypadat. Po trénovací videosekvenci následuje první videosekvence, která je hodnocená, tato videosekvence je softwarově synchronizována, a tedy vliv desynchronizace je zde nejmenší, protože může nabývat hodnoty maximálně poloviny trvání jednoho snímku. Po přehrání první videosekvence je hodnotící vyzván pro ohodnocení kvality vizuálního komfortu. Je mu zobrazena stupnice od jedné do pěti, kde jedna znamená, že sledování dané scény bylo silně nepohodlné a pět zde znamená, že sledování bylo velice pohodlné. Následuje videosekvence, která není nijak upravená a míra desynchronizace je dána pouze reakcí kamer. Po přehrání této videosekvence následuje opět hodnocení. Na další dvě testovací videosekvence je uměle aplikovaná chyba synchronizace. Na první videosekvenci je chyba synchronizace o velikosti jednoho snímku, tato chyba odpovídá hodnotě 40ms. Na druhé videosekvenci je chyba synchronizace o jeden snímek větší, je zde tedy chyba synchronizace o velikosti dvou snímků, což odpovídá hodnotě 80ms.

Pro hodnocení kvality stereoskopického obrazu bylo vybráno 13 osob a každý hodnotící zhodnotil celkově 16 videosekvencí. Ze získaných výsledků od všech hodnotících byl udělán průměr, který se nazývá „Mean Opinion Score“ (MOS). Dále byla u každé videosekvence změřena velikost desynchronizace za pomoci zvukové stopy podle popisu v kapitole 2.2.

Z těchto získaných dat byla pomocí softwaru MS Excel vypočtena a graficky znázorněna závislost desynchronizace na kvalitu vizuálního komfortu. V následující kapitole jsou tyto hodnoty graficky zobrazeny.

5.3 Výsledky subjektivních testů a jejich zhodnocení

V následujících třech grafech, které se liší vzdáleností kamer od pohybujícího se objektu, jsou zobrazeny výsledky subjektivních testů. Na vodorovné ose je u každého grafu vyjádřena časová odchylka synchronizace, kladná hodnota znamená, že pravá kamera začala snímat danou scénu dříve než levá. V případě, že je časová odchylka vyjádřena záporně znamená to, že levá kamera začala snímat danou scénu dříve než pravá.

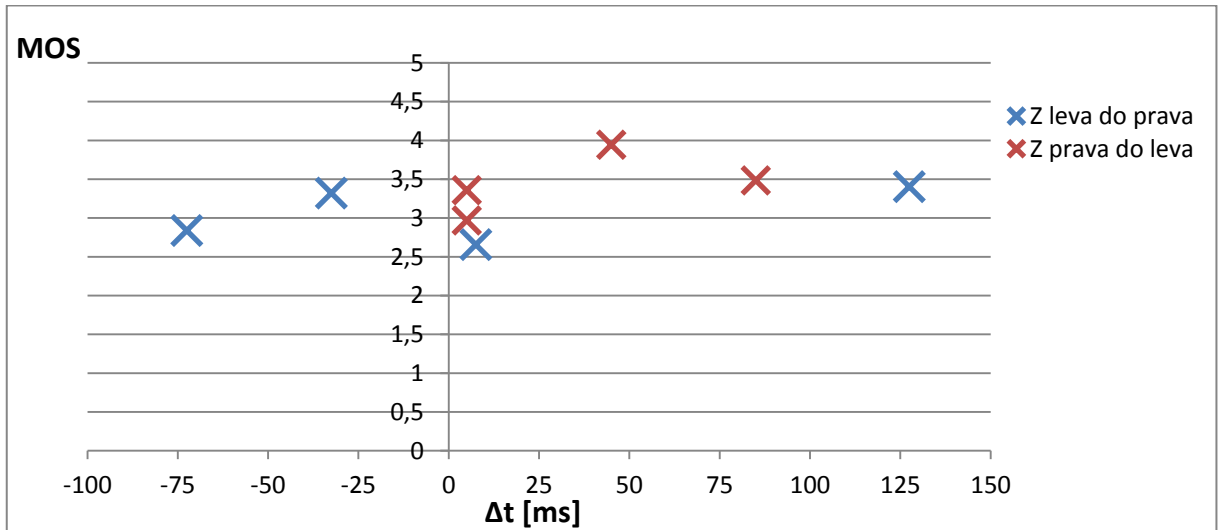
Na svislé ose je průměrná hodnota výsledků testů kvality vizuálního komfortu od všech hodnotících, již zmiňované „Mean Opinion Score“ (MOS).

Barevně odlišené body v grafu značí směr pohybu zaznamenávaného objektu. Tedy pokud je značka modrá, znamená to, že objekt se pohyboval z levé strany do pravé. Pokud je značka červená, tak se objekt pohyboval z pravé strany do levé.

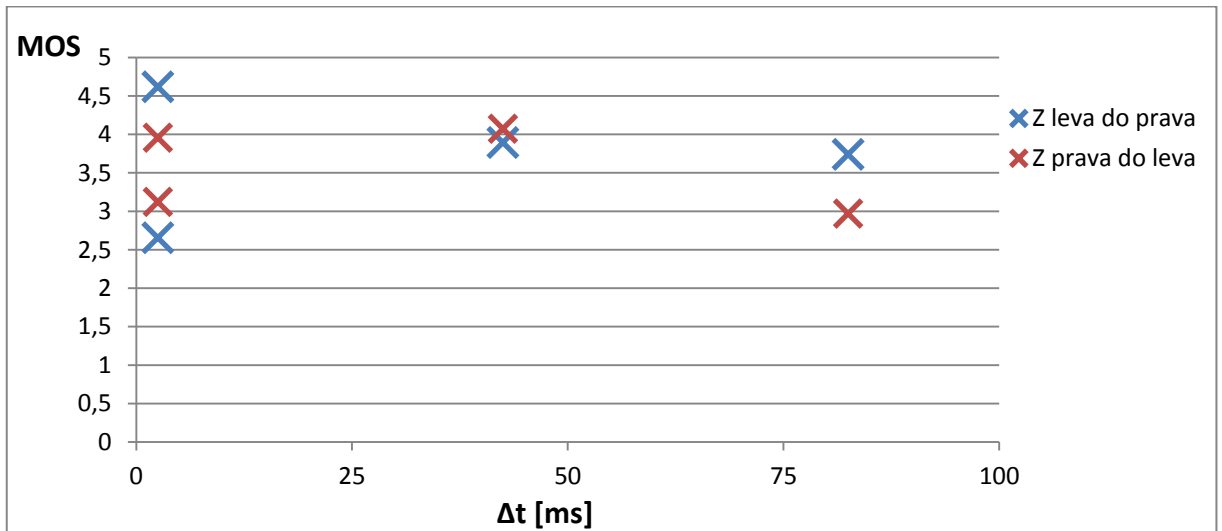
ltr – 10 metrů	Δt	MOS	rtl – 10 metrů	Δt	MOS	ltr – 15 metrů	Δt	MOS
neupraveno	127,5	3,4	neupraveno	5	3,4	neupraveno	2,5	2,7
synchronizováno	7,5	2,7	synchronizováno	5	3,0	synchronizováno	2,5	4,6
1 snímek	-32,5	3,3	1 snímek	45	3,9	1 snímek	42,5	3,9
2 snímky	-72,5	2,8	2 snímky	85	3,5	2 snímky	82,5	3,7

rtl – 15 metrů	Δt	MOS	ltr – 20 metrů	Δt	MOS	rtl – 20 metrů	Δt	MOS
neupraveno	2,5	4,0	neupraveno	5	3,5	neupraveno	-35	3,7
synchronizováno	2,5	3,1	synchronizováno	5	4,8	synchronizováno	5	3,2
1 snímek	42,5	4,1	1 snímek	45	3,7	1 snímek	45	3,6
2 snímky	82,5	3,0	2 snímky	85	3,9	2 snímky	85	3,4

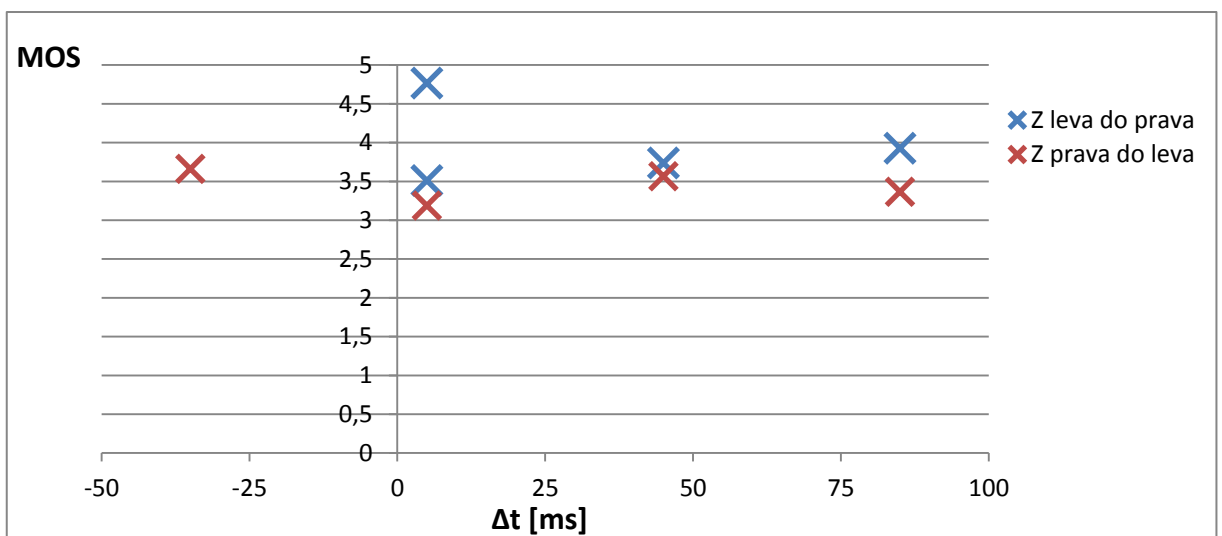
Tab. 3 Velikost desynchronizace a MOS



Graf 1 10m od pohybujícího se předmětu a závislost kvality visuálního komfortu na velikosti zpoždění.



Graf 2 15m od pohybujícího se předmětu a závislost kvality visuálního komfortu na velikosti zpoždění.



Graf 3 20m od pohybujícího se předmětu a závislost kvality visuálního komfortu na velikosti zpoždění.

Z grafů je patrné, že ve většině případů se spustila pravá kamera dříve než levá. Dále pokud jsou kamery blíže k pohybuujícímu se objektu, tak má synchronizační odchylka větší dopad na kvalitu vizuálního komfortu, než když je daný pohyblivý objekt dále od kamer. Je to způsobeno tím, že pohyblivý objekt umístěný dále má menší perspektivu a tudíž je chyba synchronizace méně viditelná.

Dle teoretických předpokladů by se dalo očekávat, že synchronizované videosekvence budou nejlépe hodnoceny, ovšem v případě těchto testů se prokázalo, že i desynchronizované nahrávky mohou působit lépe vizuálně než synchronizované. To může být způsobeno tím, že daná scéna působí na diváka lepším prostorovým dojmem změnou paralaxy, než by tomu bylo v případě natočení záběru synchronně. U synchronizovaných záběrů byla velikost paralaxy ve vzdálenosti 10 metrů od pohybuujícího se objektu 15 pixelů, ve vzdálenosti 15 metrů 11 pixelů a nejmenší velikost paralaxy byla ve vzdálenosti 20 metrů a to 9 pixelů. V tomto případě velmi záleží i na směru pohybu daného objektu a na znaménku časové nesynchronizace kamer (pořadí pořízení snímku levou a pravou kamerou).

Ze získaných výsledků je patrné, že hodnocení stejných videosekvencí se může velmi lišit mezi jednotlivými hodnotícími, každý hodnotící vnímal danou synchronizační odchylku trochu odlišně. To může být způsobeno individuálním vnímáním prostorového obrazu, ale také nahodilým hlasováním nesoustředěného hodnotícího.

Závěr

V první kapitole jsem popsal možnosti pořízení stereoskopických záběrů a technologie umožňující zobrazení stereoskopických záběrů. Stereoskopické systémy jsou technologie, které mají velký potenciál do budoucna, ale bohužel zatím mají menší problémy. Například při pozorování je stále zapotřebí mít speciální brýle. Sice existují autostereoskopické monitory, ovšem jejich pořizovací cena je vysoká a i sledování ve více lidech je omezené.

V následující kapitole jsem popsal možnosti pro změření desynchronizační odchylky. Z těchto možností se zdá, že metoda měření synchronizace využívající CRT monitor je nejpřesnější, co se týče přesnosti změření desynchronizace kamer. Tato metoda nelze použít pro běžné záběry, u nich je zapotřebí provést synchronizaci pomocí zvukové stopy.

Ve třetí kapitole jsou uvedeny možnosti spuštění dvou kamer, jako nejlepší se zdá metoda používající Ste – Fra LANC ovladač, ovšem dnešní běžné domácí kamery postrádají vstup pro připojení tohoto ovladače. Tudíž u běžných kamer je zapotřebí pro spuštění využít bezdrátový ovladač, ovšem při pořizování vzorových záběrů se spuštění bezdrátovým ovladačem neukázalo jako nejlepší. Kamery někdy nereagovaly na stisk tlačítka, protože mají přijímač signálu v přední části a signál přijímají v malém úhlu. Proto bylo zapotřebí bezdrátový ovladač přiblížit co nejblíže k přední části kamer, ovšem i toto nebylo zárukou bezproblémového spuštění, jelikož se mnohokrát stalo, že se spustila jen jedna kamera. Ovšem i při okamžité reakci obou kamer synchronizace není zcela dokonalá.

Následující dvě kapitoly se zabývají možnostmi pro změření desynchronizace. Je zde uvedeno jak postupovat v případě měření desynchronizace pomocí CRT monitoru. Využití CRT monitoru pro zjištění velikosti desynchronizace se zdá být nejpřesnější, ovšem tato metoda nemůže být využita vždy. Jelikož v případě této metody je zapotřebí oběma kamerami snímat CRT monitor a tudíž tato metoda nelze použít pro jakékoliv jiné záběry.

V poslední kapitole byl zhodnocen vliv synchronizace na kvalitu dané scény. Při tomto postupu jsem využil zvukové stopy k zjištění velikosti desynchronizace a následně tyto záběry byly zhodnoceny. Z hodnocení je patrné že desynchronizované záběry nemají vždy nejhorší vliv na kvalitu vizuálního komfortu, protože desynchronizace ovlivňuje paralaxu záběrů a v některých případech může být tato nepřírozená změna paralaxy pozitivně hodnocená zvýrazněním prostorového efektu záběru.

Použitá literatura

- [1] MICHEL, Benoît. *Digital stereoscopy: scene to screen 3D production workflow*. Sprimont, Belgium: StereoscopyNews, 2013. ISBN 978-148-0157-095.
- [2] *GALI-3D| Pasivní 3D stereoskopie* [online]. © 2005-2011 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-pasivni-3d/>
- [3] BENEDIKOVIČ, Josef. Jak funguje 3D technologie. *Cinemo.cz* [online]. 2011 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://cinemo.cz/3d-technologie>
- [4] BOEHMEL, Manfred. The SONY LANC protocol. *Versatile Video* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.boehmel.de/lanc.htm>
- [5] LANC-Controller. *3D-Filmen für Einsteiger* [online]. 2013 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.weir3d.de/film/lanc-controller>
- [6] SONY Vegas Pro 12 Manual. *Sony Creative Software* [online]. 2012 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://dspcdn.sonycreativesoftware.com/manuals/vegaspro12.0.670_manual_enu.pdf
- [7] Science and Society Picture Library. [online]. 2013 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.ssplprints.com/image/129529/reflecting-stereoscope-originally-used-by-charles-wheatstone-19th-century>
- [8] Panasonic HDC-SDT750 . *Videozone. Recenze* [online]. 2011 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.video-zone.cz/recenze/panasonic-hdc-sdt750-t19.html>
- [9] Technologie 3D zobrazení. *AV Návodů převodů videa a zvuku* [online]. 2012 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: http://www.avnavody.cz/?sekce=vrch_jaknaav-3d
- [10] The Stereoscope. *Luminous-Lint* [online]. 2009 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.luminous-lint.com/IaW/public/5/2/4/9/0/20/T/>
- [11] Subjective methods for the assessment of stereoscopic 3DTV systems. *ITU: Committed to connecting the world* [online]. 2012 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2021-0-201208-I!!PDF-E.pdf

Přílohy

1x DVD