

**Univerzita Hradec Králové**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra fyziky**

**Propojení rychlokamery s dalšími měřicími systémy**

**Bakalářská práce**

Autor: Jan Průša

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika

Vedoucí práce: RNDr. Daniel Jezbera

Hradec Králové

Srpen 2016

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Propojení rychlokamery s dalšími měřicími systémy vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu.

V Hradci Králové dne 10.8.2016

*vlastnoruční podpis*  
Jan Průša

**Poděkování:**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce RNDr. Danielu Jezberovi, za metodické vedení, ochotu a poskytování dalších cenných rad při zpracování mé bakalářské práce.

## **Anotace**

PRŮŠA, J. Propojení rychlokamery s dalšími měřicími systémy. Hradec Králové, 2016. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Daniel Jezbera. 35s

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vysokorychlostní kamery a na jejich propojení s dalšími měřicími systémy. Práce se zabývá historickým vývojem kamer a charakteristikou kamery. V práci budou také rozebrány podmínky, které jsou nutné pro nahrání kvalitního záznamu. Další částí bude rozebrání programu Tracker a analýza dat videa v tomto programu. Hlavním cílem této práce bylo zajistit synchronizaci s ostatními systémy. V praktické části jsou ukázány a rozebrány konkrétní případy měření s pomocí synchronizace rychlokamery. Součástí bakalářské práce jsou i přílohy, které obsahují přesné návody pro synchronizaci vysokorychlostní kamery IDT MotionPro Y3-S1.

## **Klíčová slova**

rychllokamera, tracker, trigger, synchronizace, analýza

## **Annotation**

PRŮŠA, J. High-speed camera and their link with other measuring systems. Hradec Králové, 2016. Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Bachelor Thesis Supervisor RNDr. Daniel Jezbera. 35 p.

This bachelor's work is focused on high-speed cameras and their link with other measuring systems. Thesis looks into historical development of cameras and camera characteristics. There will be also discussed conditions that are necessary for high-quality recording. Another part will analyse Tracker software and video data analysis in the software. However, the main goal was to ensure synchronization with the other systems. In the practical part, there are shown and analysed concrete cases of measuring with the help of synchronization high-speed cameras. There are also supplements as a part of my work containing specific instructions for synchronization of IDT MotionPro Y3-S1 high-speed camera.

## **Keywords**

High-speed camera, tracker, trigger, synchronization, analysis

## Obsah

1 Úvod .....	1
2 Kamery .....	2
2.1 Historie kamer .....	2
2.2 Druhy kamer podle hlavního technického provedení .....	4
2.2.1 Jednočipová kamera .....	4
2.2.2 Tříčipová kamera .....	4
3 Vysokorychlostní kamery .....	5
3.1 Historie vysokorychlostních kamer .....	5
3.2 Vysokorychlostní kamera .....	7
3.3 Využití vysokorychlostních kamer .....	9
3.3.1 Využití ve vědě a výzkumu .....	9
3.3.2 Využití ve výrobě .....	10
3.3.3 Využití ve zkušebnictví .....	10
4 Tracker .....	12
5 Analýza pohybu a rozbor dat z videa .....	13
6 Praktická část .....	15
6.1 Specifikace použité školní kamery <i>IDT MotionPro Y3-S1</i> .....	15
6.2 Stručný manuál práce s kamerou .....	18
6.3 Synchronizace z rychlokamery (Sync Out) .....	20
6.4 Synchronizace rychlokamery z vnějšího měřicího systému (Sync In) .....	22
6.5 Spuštění záznamu pomocí externího triggeru (TRIG IN) .....	24
6.5.1 Nastavení externího hardwarového triggeru .....	24
6.5.2 Využití externího triggeru k synchronizaci rychlokamery a kyvadla spouštěných pomocí spínače .....	25
6.5.3 Využití externího triggeru k synchronizaci rychlokamery a kotvy spouštěných pomocí spínače .....	29
7 Závěr .....	35
8 Seznam použité literatury .....	36
Přílohy .....	38
Příloha 1 – Návod na synchronizaci z vysokorychlostní kamery .....	39
Příloha 2 – Synchronizace vysokorychlostní kamery z vnějšího měřicího systému .....	41

Příloha 3 – Návod na spouštění vysokorychlostní kamery pomocí externího triggeru .....	43
Příloha 4 – Nastavení pohybového triggeru vysokorychlostní kamery .....	45

# 1 Úvod

Na katedře fyziky vlastní a využívají již několik let vysokorychlostní kameru IDT MotionPro Y3-S1. Tato kamera umožňuje různé způsoby synchronizace s dalšími měřicími systémy, které však doposud nebyly využívány. A tím se pro mě naskytla velmi zajímavá situace. Byla mi nabídnuta možnost si s touto kamerou zkusit nějaké měření a to jsem nemohl odmítnout. Aby se nezkoušelo měření jen tak pro nic za nic, vznikl nápad, že bych právě já mohl být ten, kdo vyzkouší dosud nepoužívané možnosti synchronizace s dalšími měřicími systémy.

Rychlokamerou se míní kamera, která umožňuje zaznamenávat video, o snímkovací frekvenci vyšší než je běžných 30 snímků za sekundu. Správně se označuje jako vysokorychlostní kamera, ale vzhledem k vývoji českého jazyka i úspoře místa se v dalším textu bude používat název rychlokamera nebo kamera.

V teoretické části této práce bude nejprve rozebrána historie klasických kamer, a poté proberu alespoň jejich základní rozdělení. To ovšem nebude úplně hlavním tématem, a proto bude v další části navázáno vysokorychlostními kamerami. Nejprve probereme jejich historii, parametry, funkčnost a v neposlední řadě využití vysokorychlostních kamer v praxi. Využití vysokorychlostních kamer se v dnešní době velmi osvědčilo v mnoha odvětvích, a proto se mu v teoretické části této práce věnuje poměrně velký kus. Další část bude zaměřena na práci s Trackerem, a poté na analýzu dat z videa, která bude využita zejména v praktické části.

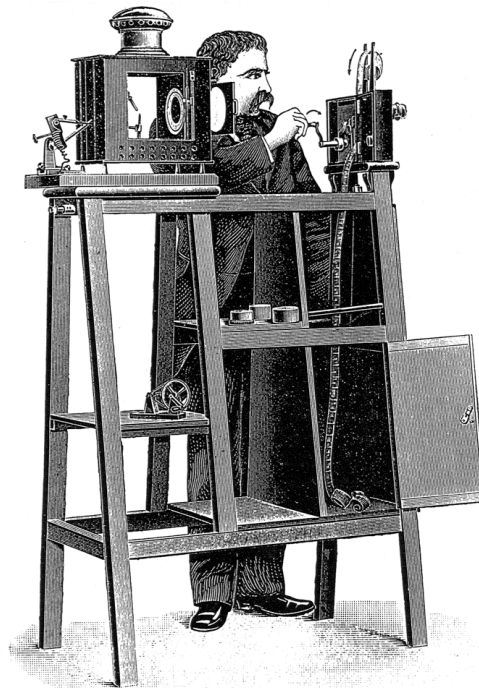
V praktické části proběhne samotné měření, díky kterému se vyzkoušejí synchronizace, ale i spouštění pomocí triggeru. Na začátku se nejprve seznámíme přímo se školní kamerou IDT MotionPro Y3-S1, a pak přijde na řadu samotné měření. Synchronizaci z kamery vyzkoušíme na přenastavování šířky pulzů. U synchronizace do kamery zjistíme, jestli se nám povede měnit nastavení kamery z jiného externího měřicího systému. A nakonec bude provedena synchronizace a spouštění měření pomocí triggeru.

Cílem bakalářské práce je ověřit a vyzkoušet možnosti synchronizace této kamery a vytvořit návody k vyzkoušenému nastavení synchronizací a triggerů. Vytvořené návody by poté měli být volně k nahlédnutí dalším uživatelům kamery pro urychlení jejich práce.

## 2 Kamery

### 2.1 Historie kamer

Prvním vynálezem, který byl využit k promítnutí filmu, je kinematograf. Ten umožňoval film nejenom promítnout, ale také natáčet a kopírovat. První přístroj byl vynalezen a patentován Léonem Boulym v roce 1892. Bouly byl kvůli nedostatku peněz nucen prodat práva ke svému vynálezu. Ty od něho koupili bratři Lumièrové, kteří ho postupně vylepšovali. Jejich kinematograf měl na rozdíl od Edisonova projektor. Byl velmi lehký, a proto se dal snadno přenášet, a na místo elektrického pohonu, který měl Edisonův vynález, se dal kinematograf bratří Lumièrů ovládat klikou. Dalším krokem kupředu bylo, že se film mohl promítat na obrazovce a mohlo ho tak shlédnout větší množství lidí. Na rozdíl od Edisona, kde mohla přes okulár sledovat obraz pouze jedna osoba.



*Le cinématographe Lumière: projection.*

Obr. 1: Jeden z bratří Lumièrů při ovládnání kinematografu [12]

Jejich první neveřejné představení se uskutečnilo 22. prosince roku 1895. Jen o pár dní později 28. prosince se uskutečnilo i první veřejné promítání v pařížském Grand Café. Do kavárny se vešlo pouze 33 osob, které při spuštění promítání užasle lapaly po dechu. Promítalo se 11 krátkých filmů, které trvaly okolo jedné minuty, což se v dnešní době nedá za film ani považovat. [5]

Poté pokračoval vývoj dál, až se objevil záznam zvuku. Ten se nejprve ukládal na gramofonové desky a poté se již opticky začal ukládat na okraj filmového pásu. Do



obrazu postupně přibyl i barevný obraz. Záznam na filmový pás se ovšem zcela neosvědčil a nebyl plně vyhovující, a proto musela přijít další změna.

Roku 1953 přichází společnost RCA s prvním magnetickým záznamem obrazu. To je zlomová chvíle, od které se kamery začínají rozdělovat na klasické filmové a na videokamery, které využívají zápis na magnetickou pásku. Záznam probíhal čistě analogově. Ani tento zápis na magnetickou pásku nebyl žádný zázrak, a tak roku 1975 uvedla japonská firma JVC systém VHS<sup>1</sup>. Poté firma své VHS ještě upravila do menší podoby, aby se s nimi u kamer lépe manipulovalo. Menší VHS se jmenovalo VHS-C a dodnes ho ještě někteří používají.[7]



Obr. 2: Rozdíl mezi velikosti u VHS a VHS-C [15]

První digitální záznam přišel ještě o rok dříve než VHS. Roku 1974 technici BBC vytvořili první digitální záznam zaznamenaný na magnetické páse. Až roku 1995 se objevil standardy digitálního videa vhodné i na domácí použití. První formáty byly DV a Digital8.

Základní rozdíl mezi digitálními a analogovými kamerami není v samotném snímání obrazu, ale mezi ukládáním obrazu. Analogová kamera zapisuje informace o obraze a zvuku proměnlivou intenzitou zmagnetizování povrchu pásky. Při zpátečním přehrání je přehrávána intenzita magnetického pole z pásky. U digitálního záznamu je obraz i zvuk převáděn do digitální podoby v podobě čísel ve dvojkové soustavě. Oproti analogovým kamerám můžeme říct, že je záznam vždy autentický bez přidaného šumu. To si můžeme například ukázat na vypalování záznamu na CD. Záznam se nám nikdy nezmění a zůstane vždy zachován ve stejné podobě.[7]

---

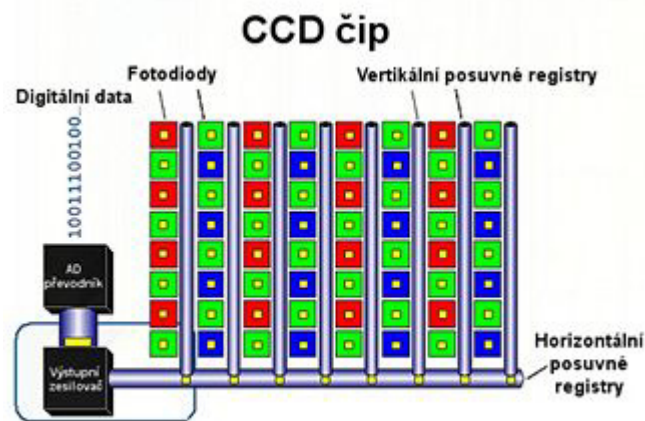
<sup>1</sup> VHS - Video Home System

## 2.2 Druhy kamer podle hlavního technického provedení

Srdcem každé kamery je CCD (Charge Coupled Devide). Tento prvek má za úkol zaostřený obraz rozložit do elektronické podoby. Na kvalitě prvku CCD velmi záleží, protože na čím více digitálních bodů je obraz převeden, tím kvalitnější bude. Poté je již obraz digitálně zpracován obvody kamery a ukládán. Existují dva základní typy kamer.[7]

### 2.2.1 Jednočipová kamera

Jednočipové systémy nejsou tak kvalitní a jsou převážně dávány do kamer pro domácí využití, kde se nehledí ani tak na kvalitu jako spíše na pořizovací cenu. Obraz, který projde objektivem a barevným filtrem dopadne na jediný CCD prvek, a poté se pomocí filtrace vytvoří skutečný obraz.[7] U tohoto uspořádání při horších světelných podmínkách začíná obraz šumět.



Obr. 3: Schéma CCD čipu [11]

### 2.2.2 Tříčipová kamera

Tříčipové systémy jsou sice o poznání nákladnější záležitostí, ovšem nabízejí obraz kvalitnější než jednočipy. Obraz z objektivu je opticky rozložen do tří složek, které samostatně procházejí filtry R, G a B (základní barvy: červená, zelená a modrá) a dopadají na tři CCD prvky. Každá barevná složka je zpracovávána samostatně a signál, ze všech tří, následně tvoří celkový plnohodnotný obraz. Výhoda tohoto systému spočívá v lepší kvalitě obrazu i při snížených světelných podmínkách a ve věrnějším barevném podání obrazu. V podstatě všechny profesionální videokamery (např. ve zpravodajství TV) jsou osazeny trojicí CCD prvků.[7]

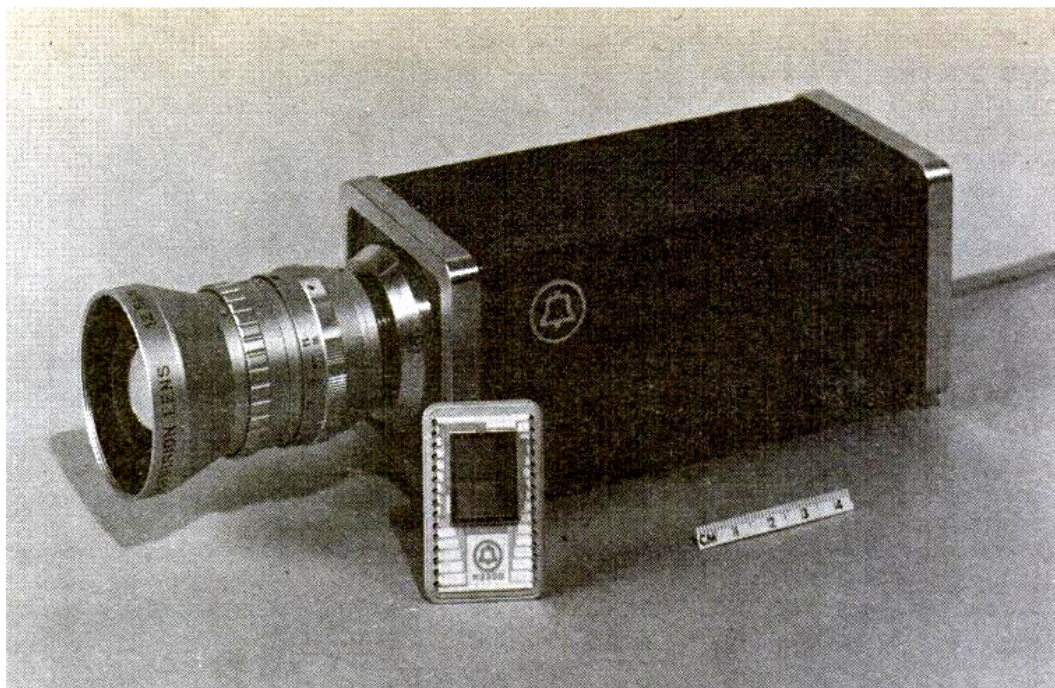
## 3 Vysokorychlostní kamery

### 3.1 Historie vysokorychlostních kamer

První vysokorychlostní kamery přišly na světlo světa roku 1930, kdy byl Bell Telephone Laboratories jedním z prvních zákazníků pro kamery vyvinuté firmou Kodak. Bell Labs nahrával na 16mm film a nahrávání bylo možné až rychlostí 1000 snímků za sekundu. Nahrávací kapacitu měl Bell Labs 30 metrů.

Poté přišel další model, který byl výkonnější. Byla to kamera od firmy Fastmax, také od firmy Bell Labs, která byla schopna nahrávat rychlostí až 5000 snímků za sekundu. Tuto kameru nakonec Bell Labs prodali do firmy Western Electronics a ta ji ještě přeprodala společnosti Wollensak Optica. Tato společnost velmi zapracovala na vývoji a povedlo se jí dosáhnout rychlosti nahrávání až 10000 snímků za sekundu.[8]

Dalším krokem kupředu, byl rok 1960, kdy firma Redlake Laboratories představila kameru s rotujícím hranolem, která nahrávala na 16mm film s frekvencí 10000 snímků za sekundu. V téže roce vyvinula také firma Foto – Sonics několik modelů, které byly schopné nahrávat na 35mm a 70mm film. Roku 1980 přišly na trh první kamery, které uměly nahrát barevný záznam. Jako první přišla s barevnou kamerou firma NAC, a poté přišla na řadu nám již velmi známá společnost Polaroid, která představila systém Makel 300, který byl schopný nahrávat barevný záznam s frekvencí až 300 snímků za sekundu.[8]



Obr. 4: Kamera firmy Bell Labs z roku 1975 [10]

### **Důležitá data vývoje vysokorychlostních kamer:**

- 1980 – První vysokorychlostní kamera využívající VHS záznam (HSV-200),
- 1983 – První vysokorychlostní kamera specializovaná na vojenské účely,
- 1985 – První vysokorychlostní kamera specializovaná pro využití ve vzduchu,
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající S-VHS záznam (HSV-1000),
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající technologii CMOS<sup>2</sup>,
- 1994 – První barevná vysokorychlostní digitální kamera (Memrecam Ci),
- 1994 – První vysokorychlostní digitální kamera využívající CMOS technologii,
- 1995 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera,
- 1997 – První vysokorychlostní kamerový systém schopný ukládat digitální i analogový záznam na pásku S-VHS,
- 2003 – První jednočipová vysokorychlostní digitální kamera s HD,
- 2005 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera s full HD.

---

<sup>2</sup> CMOS - Complementary MOS

## 3.2 Vysokorychlostní kamera

Je přenosné zařízení, které nám umožňuje tvorbu obrazového záznamu velmi vysokou frekvencí snímkování. Současné vysokorychlostní kamery jsou stejně jako klasické kamery digitální. Některé rychlokamery bývají i černobílé, a to z jednoho prostého důvodu. Objem zpracovaných a přenášených dat je u černobílého obrazu menší než u obrazu barevného. Obecně platí pravidlo, že čím horší vzhled rychlokamery, tím je lepší její vnitřek a rychlokamera je kvalitnější. Většina kvalitních rychlokamer používá ke svému nastavení a ovládání externí zařízení, jako například počítač, ze kterého se vše v kameře řídí. Vysoká frekvence snímání vyžaduje velké nároky na obrovské zpracování dat.[17]



Obr. 5: Školní vysokorychlostní kamera IDT MotionPro Y3-S1

Výraznou předností digitálního záznamu je, že je použitelný nejen ke kvalitativní analýze zobrazeného děje nebo jevu, ale umožňuje i analýzu kvantitativní, tj. hodnocení s využitím aktuálních hodnot fyzikálních veličin. Vzhledem k tomu, že k jednotlivým obrázkům záznamu lze přiřadit reálný relativní čas, je možné porovnáním sousedních obrázků stanovit vektory rychlosti a zrychlení pohybujících se prvků, rychlosti změny tvaru těles či vizuálních projevů zkoumaných jevů apod. Přesnost takto stanovených hodnot analyzovaných veličin je ovlivněna především rozlišením (kvalitou) záznamu, dále bitovou hloubkou záznamu, metodou kvantifikace dat a kvalitou použité optické soustavy (objektivu), která je zatížena vadami zobrazení (distorze, astigmatismus apod.). Pokud jsou použité objektivy kvalitní, vady jsou zanedbatelné. Pro přesná měření se používají speciálně kalibrované objektivy. Nezanedbatelnou roli hraje i správné zaostření objektivu na snímávaný objekt po celou dobu trvání záznamu, zejména při snímání pohybujícího se tělesa. [17] Digitální záznam z rychlokamery lze ihned po nahrání na externím monitoru prohlédnout, a pokud se nám záznam nelíbí, je možné nahrát záznam nový. Extrémně důležitým parametrem pro nahrávání záznamu rychlokamerou je osvětlení dané expozice. Nejlepším způsobem, jak toho docílit, je použít nějaké externí velmi výkonné osvětlení, které

nám zařídí dostatečné osvětlení. Pouze sluneční osvětlení za všedního dne povětšinou nestačí a obraz je tmavý. Pro velmi rychlé děje se osvědčilo osvětlení pomocí synchronizovaných výbojkových záblesků, které nám scénu osvětlí vždy, když je potřeba a tím se zamezí zbytečného zahřívání výbojky a sníží se i spotřeba její energie.

### 3.3 Využití vysokorychlostních kamer

V současné době, je ve velkých firmách kladen obrovský důraz na co nejefektivnější a nejrychlejší výrobu. Z těchto důvodů se do firem začínají dostávat vymoženosti této doby, jako jsou roboti nebo automatické linky. I tyto stroje však potřebují určitou kontrolu, aby někde nedocházel k poškození výrobků, ztrátě času nebo výkonu na výrobní lince. K takovéto kontrole se využívají vysokorychlostní kamery. Analýzou videozáznamu pak mohou firmy snadno odstranit nedostatky a zajistit si tak maximální kvalitu výroby.

#### 3.3.1 Využití ve vědě a výzkumu

Ve vědě a výzkumu jsou vysokorychlostní kamery využívány hlavně v případech, kde nejsme různé procesy a děje schopni zachytit pouhým okem ani klasickou kamerou. Možnosti využití ve vědě jsou tedy různé. Můžeme je využít při zkoumání pohybu zvířat, rychlosti světla nebo třeba v laboratorních podmínkách pro přesnou synchronizaci dvou systémů.

#### Využití v biologii

V biologii se vysokorychlostní kamery využívají velmi hojně. Hlavními zaměřením vysokorychlostních kamer v biologii je studium pohybu zvířat, ale také pohybů lidského těla. [13]

Velmi zajímavou analýzou v biologii je pohyb křídel kolibříka, díky jeho extrémně jemným pohybům. Tuto analýzu se poté vědci snaží využít v robotice.



Obr. 6: Pohyb křídel kolibříka nejde při fotografii zachytit. [13]

### **Využití v zaznamenávání rychlosti světla**

Vysokorychlostní kamery se dají použít i k snímání rychlosti světla. Takovýmito kamerám se však neříká vysokorychlostní, ale nazývají se ultra rychlé. Tyto kamery jsou schopné zaznamenat až miliardu snímků za sekundu.[16]

### **3.3.2 Využití ve výrobě**

#### **Využití ve výrobních linkách**

Vysokorychlostní kamery jsou v tomto odvětví využívány hlavně u automatizovaných linek. Výrobní linky v dnešní době v hodně případech nahrazují lidský faktor, protože jsou schopny pracovat efektivněji. I tyto linky však potřebují být optimalizovány. Jejich pohyby jsou velmi rychlé, přesné a navazují přesně na sebe. Proto je uplatnění vysokorychlostních kamer na linkách velmi obsáhle. Využívají se například k nastavení, seřizování a diagnostiku strojů a zařízení, dopravnících a etiketovacích strojích, na obráběcích, řezacích a stříhacích strojích.[18]

#### **Využití u strojového vidění**

Strojové vidění se využívá hlavně při kontrole prvků. Kamery jsou uzpůsobeny pro zaznamenávání různých vad na vyrobených produktech. Poté co tento systém zaznamená nějakou vadu, většinou automaticky vadný výrobek odstraní nebo upozorní obsluhu stroje na chybu. Největší výhodou je tedy vstupní a výstupní kontrola materiálu, díky níž se minimalizuje výskyt vadných výrobků při další výrobě.[18]

### **3.3.3 Využití ve zkušebnictví**

#### **Využití ve zbrojním průmyslu**

V tomto průmyslu našla vysokorychlostní kamera velké uplatnění, protože děje probíhající ve zbrojním průmyslu jsou extrémně krátké a rychlé. Kamery se využívají jak pro analyzování balistiky, tak i analyzování chování a funkčnosti zbraně při samotné střelbě.

U balistických testů vysokorychlostní kamera umožňuje sledovat celý průběh letu náboje. Poté se ze záznamu analýzy letu zkoumá trajektorie a rychlost pohybu, rotace náboje, ale také proniknutí náboje cílem a jeho deformace. Dalším velmi důležitým využitím je sledování náboje při použití ústředních doplňků, jako je například tlumič. Také se zkoumá druhá strana výstřelu a to dopad, ze kterého se vyhodnocuje účinnost a průraznost střely.

Vysokorychlostní kamery se však ve zbrojním průmyslu nepoužívají jen v balistice, ale hojně se využívají i u experimentálních výbuchů munice a výbušnin. Detonace patří pravděpodobně k nejrychlejším dějům ve zbrojním průmyslu. Proto jsou zde vysokorychlostní kamery velmi potřebné.[17]



### Využití v automobilovém průmyslu

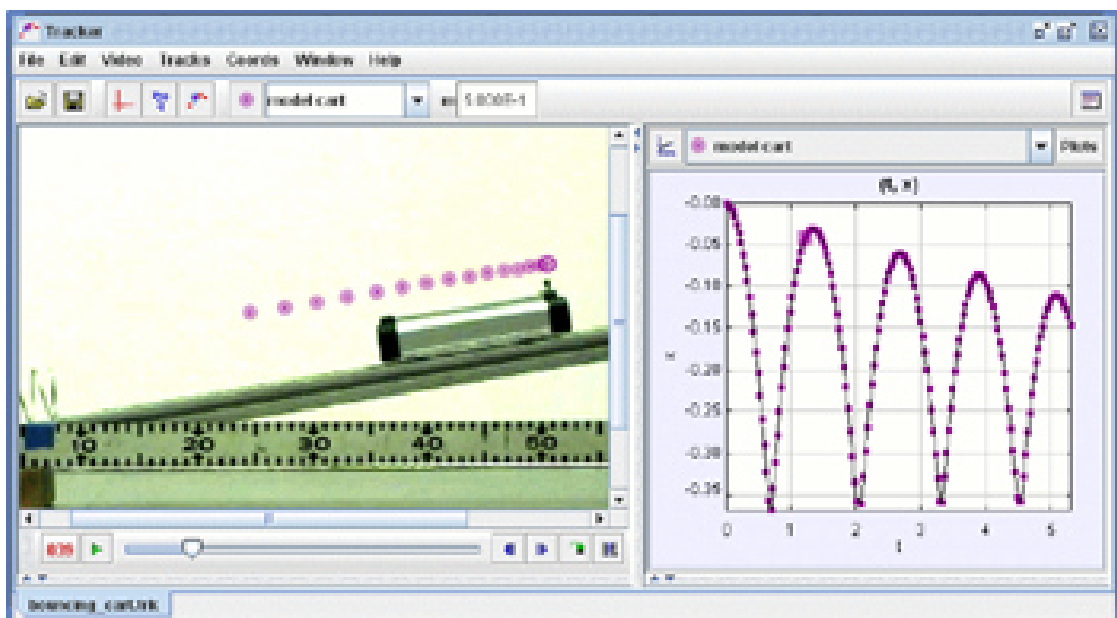
V automobilovém průmyslu je využití vysokorychlostních kamer velmi obsáhlé. Ovšem asi hlavní a nejdůležitější, je použití vysokorychlostních kamer při crashtestech. V dnešní době se klade enormní důraz na bezpečnost v autech, a proto jsou tyto testy velmi důležité. Kamera je schopna při nárazu zaznamenat veškeré, i nepatrné porušení karoserie a jiných prvků vozu. Vysokorychlostní kamery hlídají pasivní i aktivní prvky, jak při nárazu působí na lidské tělo. Dalším prvkem, kde vysokorychlostní kameru potřebujeme, je vystřelení airbagu, což je velmi rychlý děj.[6]



Obr. 7: Náraz vozu při cash testu. [14]

## 4 Tracker

Tracker je program, který nám umožňuje detailně s postupujícím časem analyzovat videozáznam. Ten můžeme prohlédnout krok po kroku. Takovýto rozbor, by při normálním sledování videa, nebyl možný. Program Tracker nám pomáhá propojit video s počítačovým modelováním. V programu máme mnoho dalších možností, jak pracovat s videem. Velmi zajímavým prvkem je kalibrování obrazu přesně podle potřebných parametrů. A poté trackování hmotného bodu, ze kterého nám program vytvoří graf pohybu hmotného bodu, který si vybereme. Pokud jsme si předtím obraz kalibrovali, dostaneme reálné souřadnice pohybu bodu, který potřebujeme. Tato data jdou poté snadno exportovat do jiných programů (MS Excel), kde s nimi můžeme dále pracovat a dopočítávat hodnoty, které potřebujeme k zanalyzování videa. [4]



Obr. 8: Ukázka analýzy pohybu v programu tracker.[4]

## 5 Analýza pohybu a rozbor dat z videa

Rychlokamery, ale i videa natočená běžnou rychlostí záznamu, lze využít v analýze pohybu i biomechanice. Analýza se provádí pomocí samotného videa a některého z programů, které rozbor videa umožňují. V našem případě Tracker. Analýzu pohybu z videa pomocí kinematografické a videografické metody musíme rozdělit do několika postupných kroků:

### 1) Definování souřadného systému

Abychom mohli určit polohy různých bodů a celého těla, je nutné si nejprve nadefinovat souřadný systém. Nejčastěji se používají kartézské souřadnice, ale můžeme se setkat i se souřadnicemi polárními. Při měření pohybu musíme definovat dva souřadné systémy. Globální jako je například laboratoř a lokální, který se může měnit segment od segmentu. Při analýze pohybu je velmi důležité najít si vztah mezi globálním a lokálním souřadným systémem. K nalezení tohoto vztahu nám poslouží kalibrace.[2]

### 2) Umístění značek

U 2D analýzy potřebujeme k definování segmentu alespoň dva body.

### 3) Vyhodnocení záznamu

Pro zjištění souřadnic zkoumaných bodů, musíme zjistit jejich pozici na záznamu. To lze provést buď manuálně, nebo pomocí automatického systému. Při manuálním vyhodnocování si postupně označujeme na záznamu polohu bodu, pomocí záměrného kříže na monitoru.

U automatického určování souřadnic je vše založeno na kontrastu námi označeného bodu a jeho okolí. Tracker vyhledává polohu bodu podle předchozího snímku a určuje geometrický střed námi zvolené značky. Problém však u automatického určování může nastat z důvodu měnícího se světla při samotném nahrávání. Kamera snímá i další světelné podněty a ty se nám mohou projevit jako další nové nechtěné značky. Proto je nejlepší co nejvíce stabilizovat podmínky, aby se těmto chybám při automatickém určování předešlo.[2]

### 4) Kalibrace a transformace souřadnic

Provedení kalibrace při analýze záznamu pohybu je jedním ze základních kroků, který slouží k určení závislostí mezi skutečnými velikostmi a odpovídajícími údaji získanými ze záznamu. [3]

Při transformaci souřadnic se snažíme převést rovinné obrazové souřadnice do skutečných prostorových souřadnic bodu.

## 5) Úprava vyhodnocení dat

Při digitalizaci pozice bodu je téměř nemožné dosáhnout dokonalé přesnosti. Při zaznamenávání bodů se zaznamenávají i malé odchylky souřadnic, které můžeme nazvat jako digitalizační šum v měření. Proto, abychom tento šum odstranili a zůstala nám co nejvíce reálná data, která se budou velmi blížit reálným polohám bodů, je třeba provést vyhlazení nebo filtrování dat.

K základním postupům pro vyhlazení hrubých dat patří buď polynomičká regrese (využití polynomů) a interpolace s využitím splajnů.[2]

## 6) Zdroje chyb u měření

Každé měření v sobě ukrývá nějakou chybu. Nikdy se nám nepovede změřit všechny data úplně přesně. Chyby měření můžeme rozdělit podle místa vzniku v měřícím procesu:

- *Teoretické* – v tomto případě je chyba způsobena špatnou nebo zjednodušenou teorií k měření.
- *Metodické* – při metodických chybách je chyba dána špatnou nebo zjednodušenou metodou měření.
- *Přístrojové* – jsou chyby, které jsou dané měřícím přístrojem. V našem případě mohlo dojít ke zdánlivému ohnutí stojanu, což by bylo způsobeno zkreslením objektivu. To se nám však nestalo.
- *Statistické* – jsou chyby náhodné. Při opakovaném měření se mohou výsledky poněkud lišit. Například nepřesnosti při určení polohy u analýzy dat. Podrobnější informace se můžete dozvědět v kapitole 5 podkapitole Úprava vyhodnocení dat.
- *Subjektivní* – většinou to jsou chyby statistické, v případě automatizovaného měření se nevyskytují.

## 6 Praktická část

### 6.1 Specifikace použité školní kamery *IDT MotionPro Y3-S1*

Základní specifikace použité kamery budou zobrazeny v následující tabulce. Tato kamera je již velmi výkonná a její parametry jsou velice dobré.

	MotionPro Y3-S1
Max fps @ max res	3750 @ 1280 x 1024
Minimum exposure time	1 $\mu$ s
Sensitivity ISO (mono)	6000
Sensitivity ISO (Color)	2000
Sensor Type	CMOS – Polaris II
CFA Pattern	GBRG
Sensor Size	13.9 x 11.2 mm
Array Size	1.3 Megapixel
Pixel Size	13.85 x 10.85 $\mu$ m
Aspect ratio	5:4
Dynamic Range	60 dB
Quantum Efficiency QE	50%
Pixel Depth	10 - bit
Internal clock	103.99 MHz

Tabulka 1: Tabulka specifikačních údajů použité kamery.[19]



Obr. 9: Školní vysokorychlostní kamera IDT MotionPro Y3-S1

U rychlokamery v tabulce vidíme, že maximální snímkovácí frekvence je 3750 za sekundu při rozlišení 1280 x 1024. Tyto hodnoty se dají pozměnit, a poté se může snímkovácí frekvence zvětšit. K tomu je potřeba zúžit nahrávací okno. To lze využít například u výstřelu z pistole, kde je k analýze potřeba mnoho snímků za sekundu a zároveň víme, kudy výstřel poletí. U našeho modelu kamery *IDT MotionPro Y3-S1*

se můžeme dostat až na maximálních 88000 snímků při rozlišení 1280 x 16. Více možností, které můžeme u naší kamery mít, si můžete prohlédnout v tabulce.[19]

MotionPro Y3-S1	
Resolution	Rate [fps]
1280 x 1024	3750
1280 x 512	7350
1280 x 256	13800
1280 x 128	25400
1280 x 64	41500
1280 x 32	61000
1280 x 16	88000

Tabulka 2: Tabulka maximálního počtu snímků podle rozlišení.[19]

V dalším kroku popíšeme zadní panel použité kamery *IDT MotionPro Y3-S1*. Na něm nalezneme několik vstupů a výstupů, které se používají, jak k propojení s jinými měřicími systémy, tak k připojení například napájecího kabelu. Zadní panel můžeme vidět na obrázku číslo 10.



Obr. 10: Zadní panel školní kamery IDT MotionPro Y3-S1

Popis vstupů a výstupů kamery:

- *GPS* – Vstup signálu GPS. Slouží pro přesnou synchronizaci času. Dá se využít například při propojení více kamer, které nemohou být z nějakého důvodu propojeny společným kabelem. Na záznamu bude doplněn přesný čas snímku, tím se zajistí dobrá synchronizace.
- *TRIG IN* - Do této zdířky zapojíme koaxiální kabel zakončený SMA konektorem, díky kterému budeme moci nastavit u kamery externí trigger. Kamera bude po spuštění čekat na externí pulz a až poté začne nahrávání.
- *SYNC IN* - Do této zdířky zapojíme koaxiální kabel zakončený SMA konektorem, díky kterému budeme moci přijímat synchronizované pulzy z jiného externího zařízení do kamery.
- *SYNC OUT* - Do této zdířky zapojíme koaxiální kabel zakončený SMA konektorem, díky kterému budeme moci vysílat synchronizované pulzy z kamery ven.
- *5V* – Tato zdířka slouží jako výstup napětí 5V pro napájení externích zařízení.
- *CONTROL* – Slouží k externímu řízení rychlokamery, například spínačem.
- *+12V 6.3A* – Do této zdířky se připojuje napájecí kabel ze zdroje.
- *USB* - Přes USB zdířku propojíme kabelem kameru s počítačem. A tím si přes software Motion Studio zpřístupníme ovládání všech funkcí kamery.
- *HDMI* – HDMI výstup pro připojení k externí obrazovce.

## 6.2 Stručný manuál práce s kamerou

Použitá vysokorychlostní kamera pracuje v zásadě offline. To znamená, že počítač, který se k ní připojuje přes kabel USB, slouží pro řízení a ovládání rychlokamery, ale při vlastním záznamu videa se pracuje pouze s vnitřní pamětí rychlokamery. Video, které můžeme vidět na obrazovce, při zapnutí *Live* režimu, je přenášeno pouze takovou rychlostí, jakou je schopný přenášet USB kabel. Takže je zpomalené na rychlost přibližně 10 až 20 snímků za sekundu.

Pro ovládání je potřeba připojit kameru do sítě a k počítači, na kterém spustíte program *Motion Studio*, přes který se kamera řídí. Při zapnutí si *Motion Studio* kameru samo vyhledá, pokud je připojena.

Samotné nastavení je velmi důležité, proto na něho musíme dávat velký pozor. První, velmi důležité věc je zamyslet se nad samotným nahráváním. Rozebereme si děj, který budeme nahrávat a pečlivě rozhodneme, jakou rychlostí bude tento děj třeba snímat, abychom zaznamenali všechny důležité body pohybu, které budeme v následující analýze potřebovat. Poté, co se rozhodne jakou frekvencí se bude video zaznamenávat, zvolíme si frekvenci v záložce *Camera* do kolonky *Rate*. Frekvence se zadává v hertzech.

Poté je třeba zařídit pro samotné snímání co nejlepší osvětlení. K tomu se využívá vysoce výkonné *LED* světlo, kterým se celá snímaná plocha osvětlí. Po dobrém nastavení světla se nastaví v záložce *Camera* expozice. Ta se wpisuje do rámečku vedle *Exposure*. Doba expozice se udává v  $\mu$ s. Expozice je nastavení doby, po kterou je senzor kamery vystaven světlu z fotografované scény. Expozici se nastaví na takovou hodnotu, aby byl záznam co nejlépe viditelný. Pro kontrolu se spustí *Live*, díky kterému je vidět osvětlení scény.

Pak se přejde do záložky *Record*, kde se začne s nastavením počtu snímků. Podle počtu snímků se pak automaticky upraví čas nahrávání. Počet snímků se píše do okénka *Frames*.

Další velmi využívanou fází je nastavování triggeru. Ten je velmi hojně používanou funkcí. Umožňuje přesnou synchronizaci s jiným měřícím systémem, při spuštění například spínačem. Pro externí spouštění se musí nastavit *Frame Sync* na *External*. *Record Mode* se přepíná na *Circular*. Nahrávací mód *Circular* funguje na principu stálého přehrávání paměti, která se pokaždé od začátku přemazává a čeká na spuštění triggeru. Nastavením *Pre - Triggeru* si zvolíte, kolik snímků se uloží na záznamu ještě před triggerem.

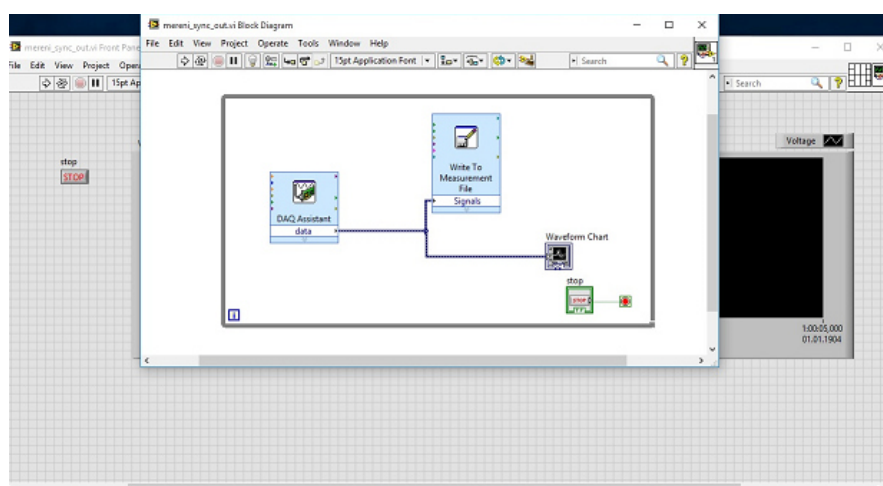
Když je video nahráno, můžeme v záložce *Playback* přehrát celé nahrané video. Jak se již říkalo na začátku této kapitoly, kamera pracuje offline. To znamená, že je zatím vše uloženo pouze v paměti kamery. V *Playbacku* se dá video snímek po snímku prohlédnout, a z toho se zjistí, jestli se nahrálo přesně to, co bylo potřeba. Pokud se záznamem nejsme spokojeni, nahrávání se zopakuje. Další možností je, vybrat si pouze určitou část nahrávaného video. Tato funkce je nesmírně důležitá, protože je velikost videa zaznamenaného vysokorychlostní kamerou velká. Takto



upraveným záznamem se velikost zmenší a až poté se video ukládá z kamery do počítače.

## 6.3 Synchronizace z rychlokamery (Sync Out)

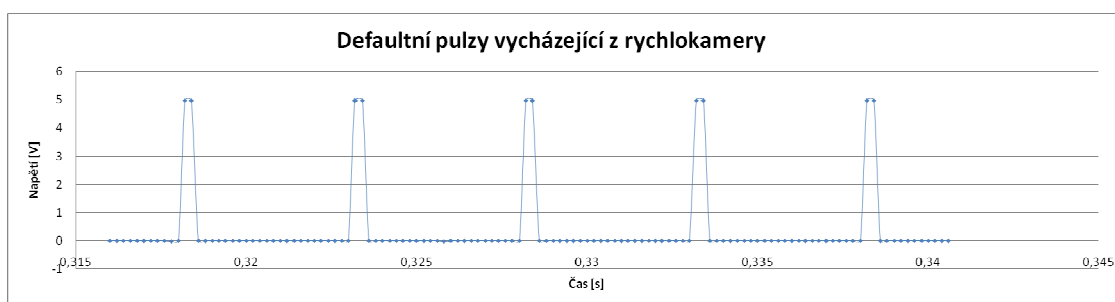
Synchronizace ven slouží k synchronizaci externích zařízení pomocí pulzů vycházejících z použité vysokorychlostní kamery *IDT MotionPro Y3-S1*. Vnějšími zařízeními mohou být připojené další měřící systémy, další rychlokamery (umožňuje synchronizovaný záznam z více kamer naráz), nebo osvětlovací zábleskové zařízení.



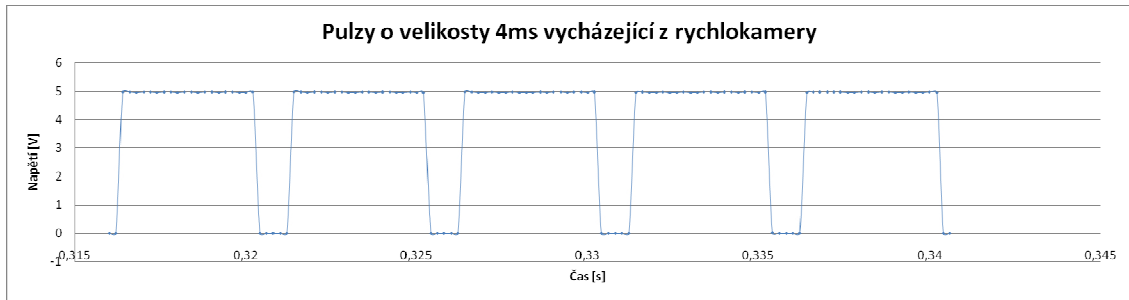
Obr. 11: Kopie obrazovky s programem pro příjem pulzů z kamery. (Ni LabVIEW)

Cílem prvního experimentu bylo ověřit výstupní pulzy pro synchronizaci z kamery. Výstupní synchronizační pulzy z kamery *IDT MotionPro Y3-S1* jsou v logice TTL a vycházejí z konektoru s označením SYNC OUT viz obrázek číslo 10 v kapitole 6.1. V našem experimentu jsme propojili tento výstup s měřícím přístrojem National Instruments MyDAQ, ovládaný programem NI LabVIEW, který zaznamenával tvar přicházejících synchronizačních pulzů (viz Obr. 11). Detaily nastavení synchronizace z kamery můžete podrobněji prostudovat v příloze 1. Pro náš experiment jsme nejprve využili pulzy defaultní, a poté jsme pulzy zvolili na velikost  $4\text{ms}$ .

Z grafu 1 můžeme vidět, že šířka vycházejících defaultních pulzů je  $0.2\text{ms}$ , kdežto v grafu číslo 2 odpovídá šířka pulzů naší nastavené hodnotě  $4\text{ms}$ . Grafy byly vytvořeny v programu MS Excel. Do MS Excel byla data vyexportována z National Instruments MyDAQ.



Graf 1: Defaultní pulzy vycházející z kamery IDT MotionPro Y3-S1.



Graf 2: Pulzy velikosti 4 ms vycházející z kamery IDT MotionPro Y3-S1

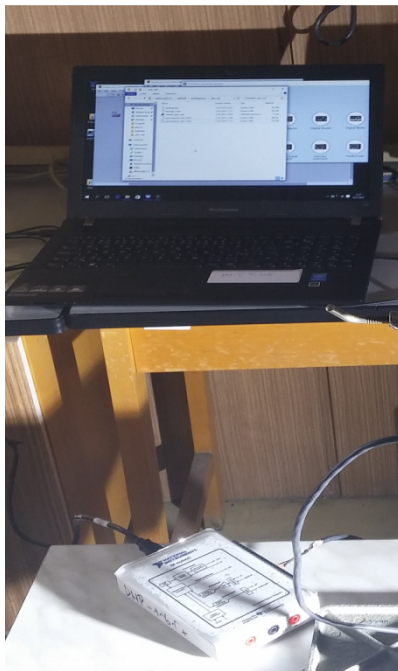
Závěrem lze říci, že se synchronizace povedla. Podařilo se nám ověřit, že z vysokorychlostní kamery vycházejí synchronizační pulzy, které si můžeme libovolně konfigurovat. Hlavními položkami nastavení je změna šířky pulzů a zvolení zpoždění prvního pulzu. Dále můžeme využít funkci, při které nám budou z kamery vycházet pulzy s obrácenou TTL logikou. Přesná synchronizace se závěrkou kamery se nepodařila ověřit. Program v NI MyDAQ byl již předem připraven od pana RNDr. Daniela Jezbery, za což mu velice děkuji, protože má práce je zaměřena pouze na obsluhu kamery.

## 6.4 Synchronizace rychlokamery z vnějšího měřícího systému (Sync In)

Synchronizace z vnějšího měřícího systému slouží k ovládní kamery pomocí pulzů z externího zařízení. Vnějším zařízením může být jiný měřící systém, nebo druhá rychlokamera. Pokud se využívá soustava více rychlokamer, pak jedna kamera vysílá pulzy ven a druhá je přijímá. Jedna kamera vše řídí a ostatní pracují podle ní.

Cílem druhého experimentu bylo ověřit, zda bude kamera reagovat na pulzy vycházející z vnějšího zařízení a zda se nám povede u kamery nějak z vnějšku změnit nastavení.

Pro snímání dovnitř nejprve musíme propojit celý obvod, a poté již budeme pracovat v systému NI MyDAQ, který bude sloužit jako zdroj synchronizačních pulzů. Propojení provedeme následujícím způsobem. Nejprve připojíme kameru k počítači, abychom mohli pracovat v programu Motion Studio, který s kamerou spolupracuje a video nahrává. Poté ze zdířky SYNC IN, připojíme kabel do National Instruments MyDAQ. Dále zapojíme do NI MyDAQ kabel z kyvadla, který přes redukci zapojíme tak, aby barvy seděly. Černá, žlutá a červená musejí být zapojeny do sebe, a poté je připojíme do výstupu CH1 v MyDAQ. Poslední fáze, která nás čeká je propojení NI MyDAQ s počítačem. To lze udělat snadno pomocí USB kabelu.



Obr. 12 Propojení systému NI MyDAQ s počítačem a rychlokamerou

Nyní pokud máme všechno zapojeno, musíme ještě nastavit samotné systémy v počítači jak kameru v Motion Studiu, tak i NI MyDAQ. V Motion Studiu musíme provést přenastavení na *external*, a poté si ještě nastavíme trigger, aby se nám nahrálo pár snímků před spuštěním triggeru. V NI MyDAQ si nastavíme trigger, a samotný ovladač pro ovládání frekvence snímání rychlokamery. Poté stačí jen na kameře spustit nahrávání a kamera bude nahrávat přesně s takovou frekvencí, jakou jsme si nastavili ve druhém systému. Tím máme synchronizaci dovnitř do kamery dokončenou. Program na počítači, byl pouze generátorem TTL pulzů s měnitelnou frekvencí v rozsahu 10 – 1000 Hz.

Ukázalo se, že při zapojení kabelu do SYNC IN, a nastavení frekvence pulzů do SYNC IN, se mění frekvence snímání přesně podle toho, jak jsme si v počítači navolili a pulzy byly vysílány z NI MyDAQ. Zda je závěrka přesně synchronizovaná se vstupními pulzy, se bohužel nepodařilo ověřit.

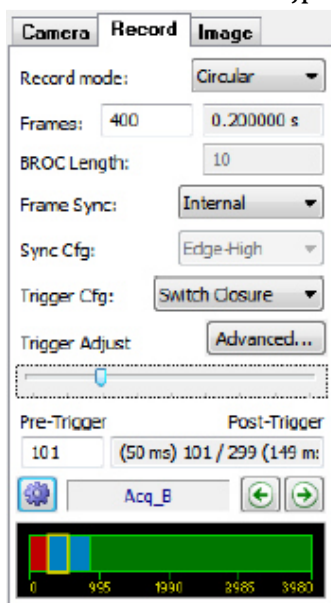
Program v NI MyDAQ byl již předem připraven od pana RNDr. Daniela Jezbery, za což mu velice děkuji, protože má práce je zaměřena pouze na obsluhu kamery.

## 6.5 Spuštění záznamu pomocí externího triggeru (TRIG IN)

### 6.5.1 Nastavení externího hardwarového triggeru

Externí hardwarový trigger slouží pro synchronní spuštění vysokorychlostní kamery a dalšího vnějšího měřicího systému. To znamená, že se zároveň spustí záznam i měření. Spouštěcí pulz je opět logické úrovně TTL a přivádí se na konektor *TRIG IN*. V řídicím programu je potřeba tento externí trigger nastavit viz návod v příloze 3.

Trigger se nastavuje v záložce *Record*. Zde se nejprve nastaví využití paměti.



Obr. 13: Tabulka nastavení z programu Motion Studio.[1]

Je potřeba nastavit cyklické využití paměti (Ve chvíli kdy spustíme záznam, kamera již začne zaznamenávat do paměti, ale formálně se ještě čeká na spuštění triggerem. Záznam postupně využívá celou paměť, a opět jde od začátku. Skončí až po spuštění a patřičné době nastaveného záznamu. Díky cyklickému záznamu lze zaznamenat i snímky, které proběhly před samotným spuštěním triggeru.).

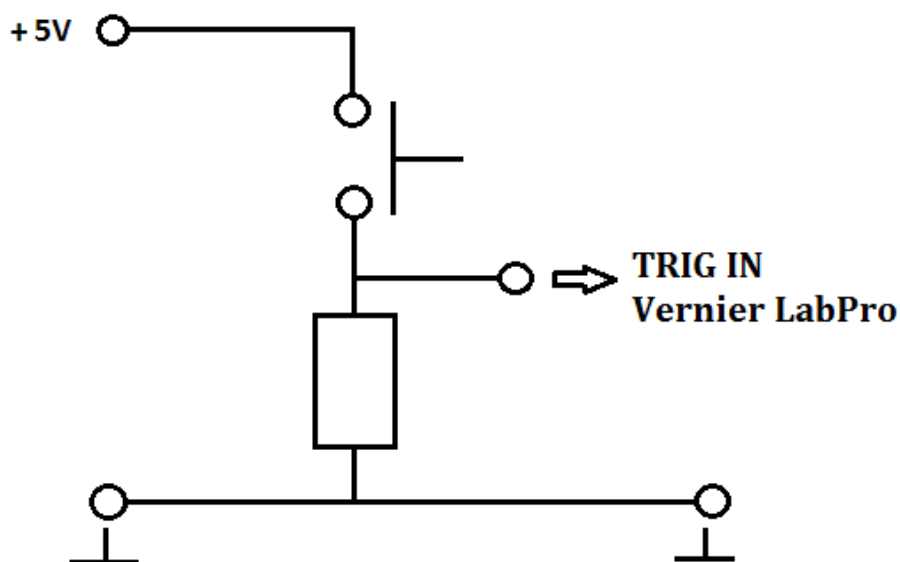
Spuštění vnějším triggerem jsme ověřili pomocí dvou důkladně proměřených a zanalyzovaných experimentů, které můžete vidět v kapitolách 6.5.2 a 6.5.3.

Tato rychlokamera, spolu se softwarem Motion Studio, umožňuje i takzvaný *Motion trigger*. Tento trigger spouští záznam rychlokamery při zaznamenání pohybu v určité předvolené části snímaného záznamu viz návod příloha 4. Využití a konfigurace paměti, je v mnoha případech podobná externímu triggeru. Avšak tímto triggerem jsem se důkladněji nezabýval. V dalším textu budou popsány dvě úlohy, využívající externí trigger.

### 6.5.2 Využití externího triggeru k synchronizaci rychlokamery a kyvadla spouštěných pomocí spínače

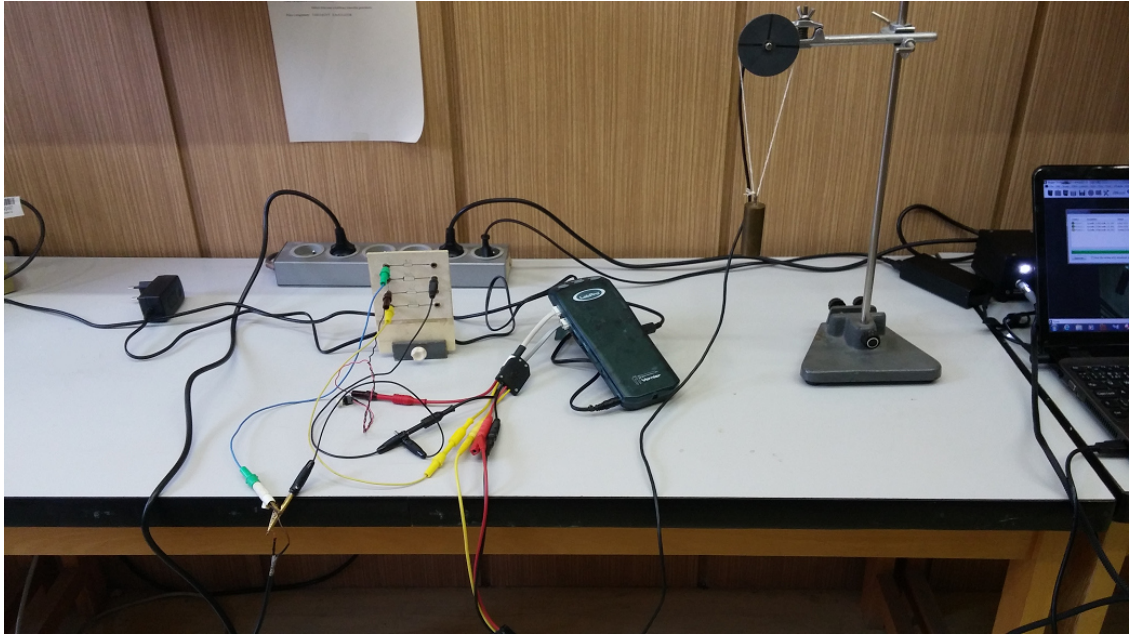
V této úloze se pomocí externího triggeru zajistí synchronizace mezi kýváním kyvadla s kladkou a snímkováním rychlokamery. Kyvadlo s kladkou se na katedře fyziky využívá v některých úlohách pro měření s pomocí počítače. K ose kladky je připojen senzor výchylky a jeho výstupní napětí je měřeno pomocí systému Vernier LabPro a softwarem LoggerPro (viz obr. 15). Zároveň je pohyb kladky zaznamenáván pomocí rychlokamery. Startovací trigger pro rychlokameru bude zároveň snímán jako napěťový pulz interfacem LabPro. To umožní přesně propojit data z Vernier a snímky z rychlokamery.

Nejprve začneme propojením a nastavením samotného obvodu pro pulz triggeru. Obvod zapojíme podle schématu na obrázku č. 14.

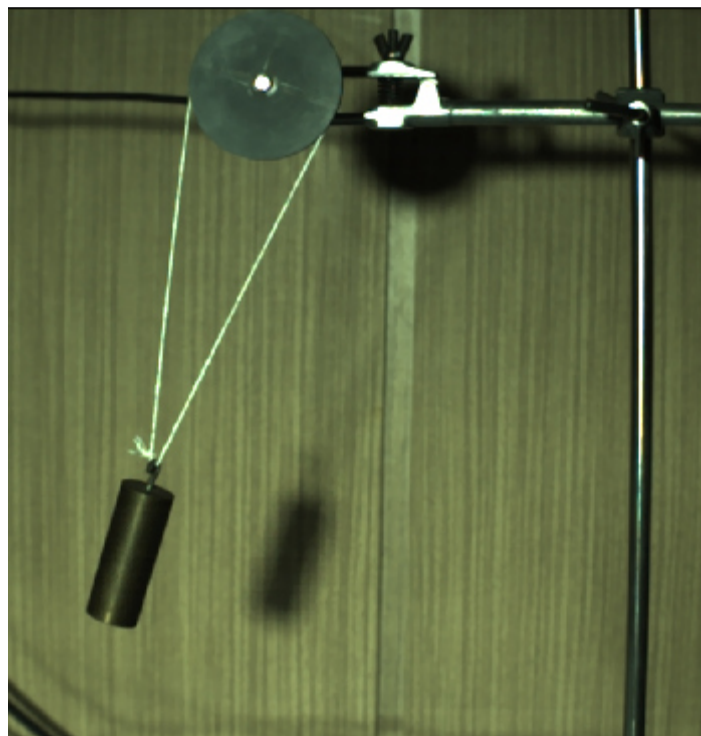


Obr. 14: Schematické zapojení kyvadla s rychlokamerou.

V prvním kroku propojíme rychlokameru s počítačem a dále ji připojíme ze zdířky TRIG IN do samotného obvodu. Poté propojíme systém Vernier do jedné zdířky s výstupem do kyvadla a z druhé zdířky nám povede připojení s odporem a spínačem. Celý obvod poté propojíme z Vernier LabPro do počítače a v něm si již můžeme připravit samotné systémy pro měření.



Obr. 15: Schéma zapojení rychlokamery s kyvadlem a LabPro.



Obr. 16: Snímek ze záznamu pohybu kyvadla

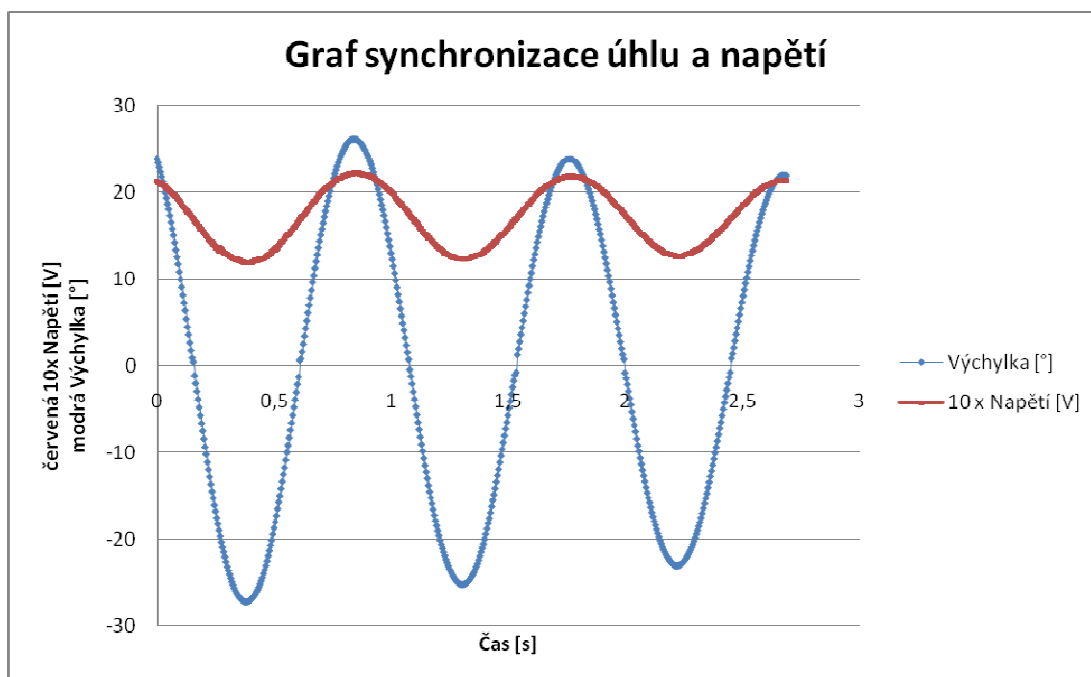
Již máme vše zapojeno a přejdeme k samotnému nastavení. V programu Motion Studio nejprve nastavíme kameru. První co uděláme, bude nastavení snímkovací frekvence a počet snímků, které budeme chtít zaznamenat. Počtem snímků se dá rozumět také délka videa s určitou frekvencí snímání. Poté si musíme nastavit trigger, protože systém bude se záznamem čekat, dokud nezmačkneme spínač. Nastavíme si i pre-trigger alespoň 100 snímků před triggrem. Změníme nastavení na Circular Podrobné nastavení triggeru můžete nalézt v příloze 3. Při takto



nastaveném programu a spuštění nahrávání nám bude kamera čekat, dokud se nesezne spínač. Poté začne měření. Toto však není z nastavení vše. Ještě musíme nastavit systém LabPro, který nám bude zaznamenávat napětí na kyvadle při jeho pohybu. Zde nastavíme snímkovací frekvenci stejnou jako v Motion Studiu, aby byly hodnoty napětí s videozáznamem v synchronizaci. Dalším nastavením bude jako u kamery trigger, který také nastavíme stejně jako na kameře, i s nastavením 100 snímku před triggerem. Nyní je už opravdu vše nastaveno a můžeme spustit jak měření v LabPro, tak spustit nahrávání v Motion Studiu. Oba záznamy nám ovšem při zapnutí čekají na náš nastavený trigger a samotné nahrávání a měření dat se zapne až po sepnutí spínače. Měření se synchronizovaně provede a máme hotovo. Kyvadlo uvádíme do pohybu jen s malou výchylkou, aby bylo měření co nejpřesnější.

### **Výsledky měření**

Zpracování výsledků jsem provedl pomocí programu Tracker a MS Excel. Musím říct, že výsledky jsou velmi uspokojivé. Nejprve jsem musel dopočítat délku  $l$  kyvadla, která mi vyšla  $19.46\text{ cm}$ . Tuto délku jsem dopočítal z průměru kladky, které je  $6,3\text{ cm}$ . Poté jsem již mohl přejít k samotné analýze videa v Trackeru. První věc, kterou jsem musel udělat, bylo kalibrovat video pomocí kalibrační tyče, aby hodnoty vzdálenosti pohybu bodu odpovídaly skutečnosti. Video jsem si prošel po jednotlivých snímcích, kterých jsme měli nastavených 200 za sekundu. A postupně jsem u každého snímku vyznačil pozici hmotného bodu našeho kyvadla. Tímto označením celého videa nám program sám vytvořil graf průběhu pohybu kyvadla, který nám podle očekávání, vyšel jako sinusoida. U jednotlivě poznačených bodů jsem nyní znal i jejich souřadnice, a proto jsem pomocí kosinové věty mohl dopočítat výchylku kyvadla z rovnovážné polohy. Poté co jsem tak učinil, mohl jsem přejít k MS Excelu a v něm zpracovat grafy, které nám ukázaly, jestli se synchronizace měření napětí a videa opravdu povedla. V grafu číslo 3 můžeme vidět, že maxima a minima výchylky a napětí nám vycházejí téměř v totožném čase, a proto je možné konstatovat, že byla synchronizace úspěšná. Pro lepší přehlednost grafu číslo 3 je napětí veškerých bodů vynásobeno 10x. Napětí má červenou barvu a výchylka modrou barvu.



Graf 3: Graf synchronizace úhlu a napětí.

Maxima a minima můžeme vidět i v tabulce, která nám jasně ukazuje, že je synchronizace téměř dokonalá až na minimální odchylky.

Čas $t_1$ [s]	Napětí [U]	Čas $t_2$ [s]	Výchylka [°]	Abs [ $t_2-t_1$ ]
0,385	1,183	0,380	-27,254	0,005
0,850	2,226	0,840	26,023	0,010
1,315	1,227	1,305	-25,240	0,010
1,760	2,186	1,760	23,778	0,000
2,230	1,258	2,220	-23,060	0,010
2,690	2,139	2,670	21,938	0,020

Tabulka 3: Maxima a minima napětí a výchylky ke grafu 1.

Z tabulky je patrné, že odchylky u maxim a minim jsou úplně minimální a dosahují maximální odchylky 0,02s.

Nyní ještě ukážeme, synchronizaci na konci měření, ze které je zřejmá stabilita synchronizace po celou dobu měření a k žádným extrémním odchylkám nedochází.

Čas $t_1$ maxim a minim napětí [s]	Čas $t_2$ maxim a minim výchylky [s]	Abs ( $t_2-t_1$ )
7,250	7,250	0,000
7,725	7,705	0,020
8,165	8,170	0,005
8,605	8,610	0,005
9,065	9,065	0,000

Tabulka 4: Maxima a minima napětí a výchylky na konci měřeného úseku.

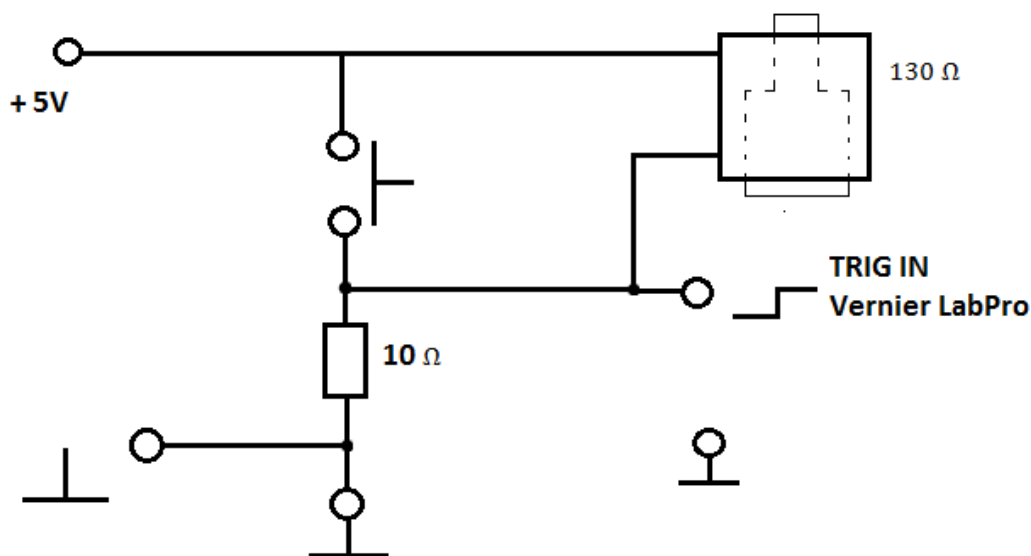
I na konci měřeného úseku vidíme maximální odchylku u maxim a minim 0,02s. Což nám dává jasný závěr pro naše měření.

Přesná synchronizace je důsledkem nastavení a spuštění triggeru ve stejný čas pomocí tlačítka. Pro krátká měření je rozhození synchronizace minimální. V našem případě maximálně 0,02s.

### 6.5.3 Využití externího triggeru k synchronizaci rychlokamery a kotvy spouštěných pomocí spínače

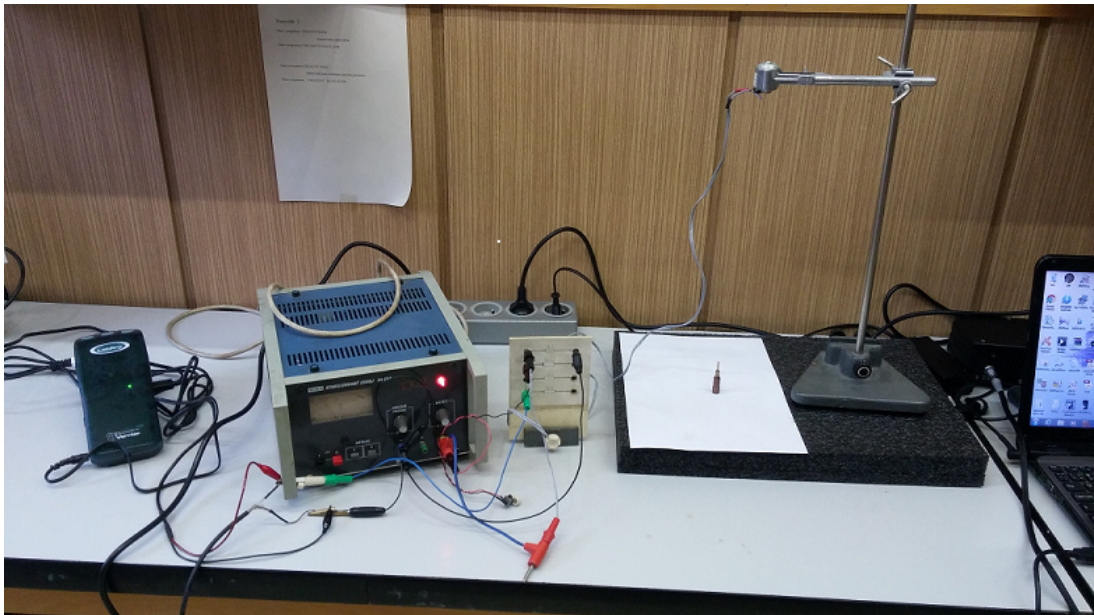
V tomto experimentu jsme využili externího triggeru pro přesné sledování pádu kotvy uvolněné z elektromagnetu (rozebraný elektromotorek). Na začátku experimentu je kotva držena magnetickým polem vyvolaným proudem v elektromagnetu. Přerušením proudu se kotva uvolní a padá volným pádem se zrychlením  $g$ . Vypnutí proudu zde poslouží jako trigger pro start záznamu rychlokamery.

Pro synchronizované měření kotvy a rychlokamery pomocí triggeru musíme nejprve zapojit obvod. To provedeme podle schématu, které můžeme vidět na obrázku číslo 17. Na počátku měření je na elektromagnetu nejprve 5V, které se zmáčknutím tlačítka zkratuje na nulovou hodnotu.



Obr. 17: Schématické propojení kotvy s rychlokamerou

V prvním kroku propojíme rychlokameru s počítačem, a dále ji připojíme ze zdířky TRIG IN do samotného obvodu. Dále propojíme systém Vernier do jedné zdířky s výstupem do kotvy a z druhé zdířky nám povede připojení s odporem a spínačem. Celý obvod poté propojíme z Vernier LabPro do počítače, a v něm si již můžeme připravit samotné systémy pro měření.



Obr. 18: Schéma propojení rychlokamery s kotvou a LabPro

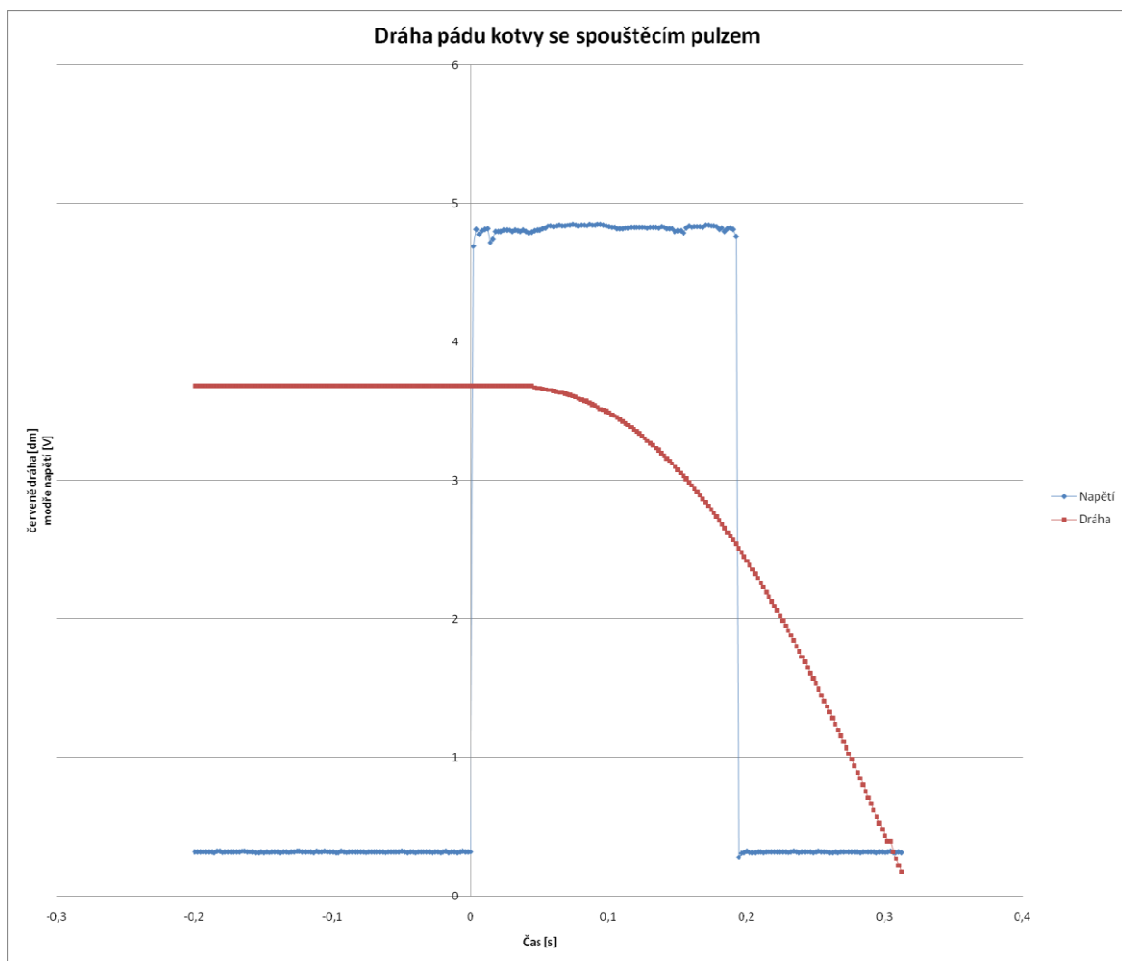
Po propojení jsme se pustili do samotného nastavování v počítačích. Nejprve jsem nastavil kameru v programu Motion Studio. Frekvenci jsem nastavil na 500 snímků za sekundu, protože pád kotvy byl velmi rychlý. Poté se nastavoval trigger. Ten musí být nastaven z toho důvodu, aby nám zaručil přesnou synchronizaci s napětím a aby spuštění nahrávání proběhlo, až díky sepnutí námi připojeného tlačítka. Trigger jsme nastavili tak, že se nám na záznamu uchovalo ještě 100 snímků před samotným sepnutím tlačítka. Kotva zůstává na svém místě také tak dlouho, dokud se nepřeruší napětí, které kotvu drží. To bylo také zajištěno naším spínačem pro dokonalou synchronizaci. Poté jsme stejné hodnoty pro trigger nastavili i v LabPro, který nám po sepnutí tlačítka měřil hodnoty napětí.



Obr. 19: Detailní záběr na elektromagnet s kotvou.

## Výsledky měření

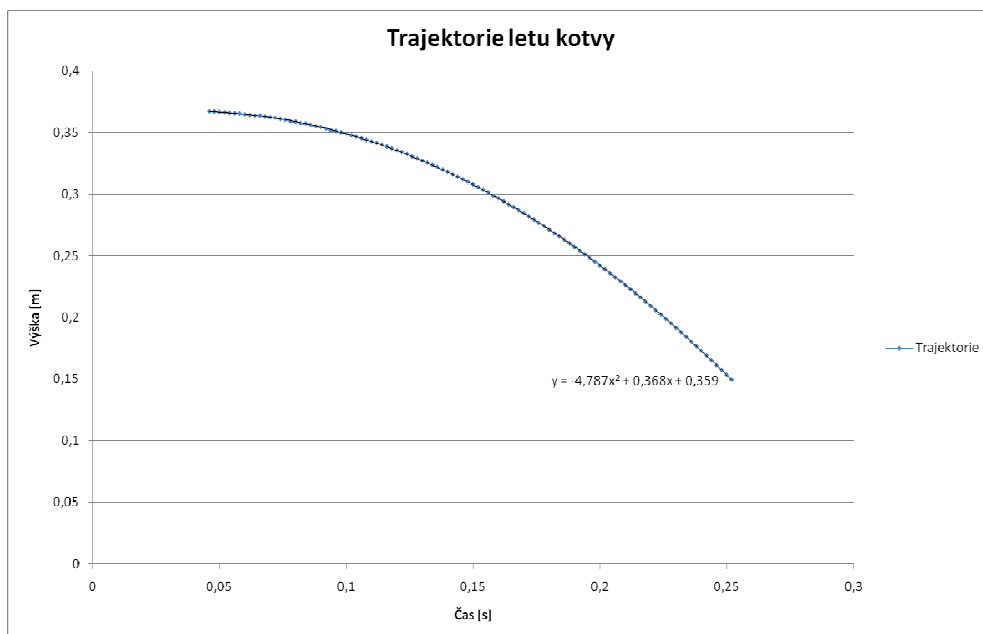
V tomto měření jsem došel k velmi zajímavým výsledkům. První věc, kterou jsem byl nucen provést, bylo změřit výšku, ze které se bude kotva spouštět, abych si mohl dobře zkalibrovat program Tracker. Výšku jsem nastavil na 36,8 cm. Poté jsem si již vrhl k samotnému analyzování videa. Začal jsem kalibrací, aby nám hodnoty ve videu odpovídaly skutečnosti. K tomu jsem použil jako u předchozího měření kalibrační tyč. Po kalibraci jsem snímek po snímku procházel video a zaznamenával si bod, jak se kotva postupem času padá. Průběh pádu kotvy můžete vidět v grafu číslo 4. V něm je modře zaznamenán pulz napětí, který jsem způsobil sepnutím tlačítka a červeně zaznamenaná trajektorie pádu kotvy. A právě tento pulz nám přerušil napětí, které drželo kotvu ve vzduchu.



Graf 4: Synchronizace startu pádu kotvy a pulzu napětí.

Z tohoto grafu je zřejmé, že i po sepnutí tlačítka kotva nějaký čas držel na místě, a teprve poté začala padat.

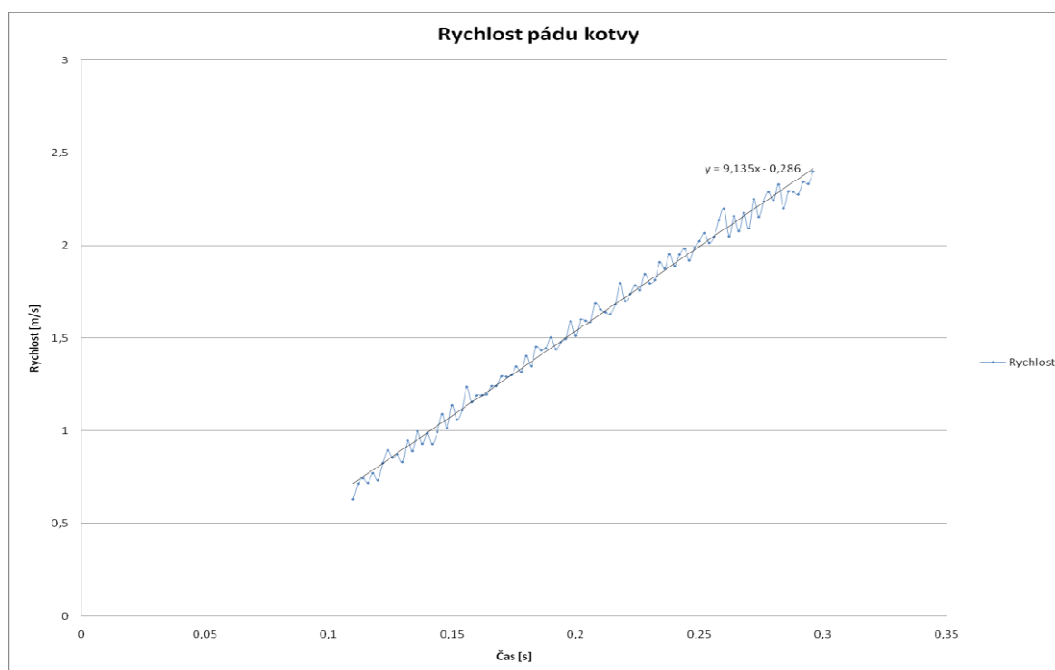
V grafu číslo 5 můžete vidět trajektorii, kterou kotva urazila proloženou křivkou. Z rovnice proložené křivky můžeme konstatovat, že gravitační zrychlení vychází  $9,574 \text{ m/s}^2$ . Tento výsledek není úplně přesný a chyba mohla být způsobena jak odporem vzduchu, tak i nepřesným zkalibrováním v Trackeru.



Graf 5: Trajektorie letu kotvy s proloženou parabolickou funkcí.

Poté co jsem získal rovnici křivky, kterou jsem prokládal trajektorii letu, jsem z její derivace, kterou jsem položil rovnu nule, dopočítal maximum. Maximum mi vyšlo v čase 0,0384s. A zde už je potřeba diskutovat, proč tento jev nastal. S největší pravděpodobností kotvu ještě chvíli na svém místě drželo magnetické pole, které nezmizelo ihned po přerušení napětí.

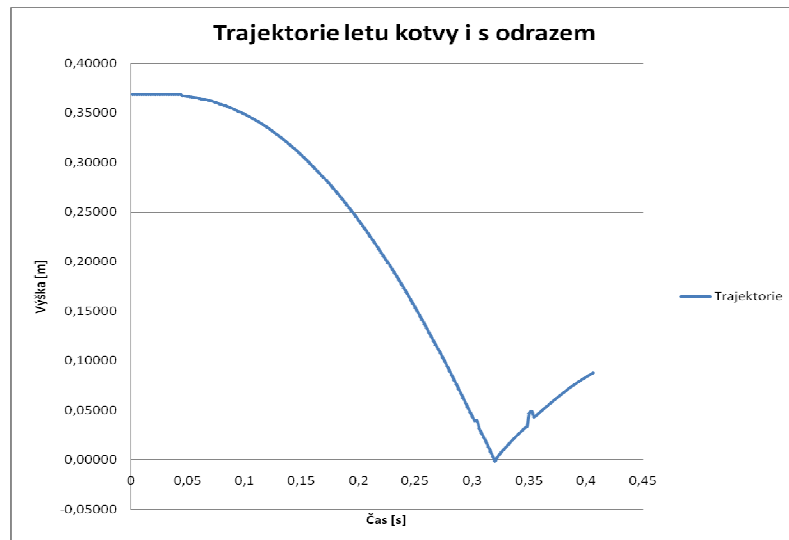
Dalším krokem, který jsem prováděl, bylo dopočítávání rychlosti. Jelikož víme, že rychlost by měla lineárně růst, bylo jednoduché tušit, co nám graf číslo 6 ukáže.



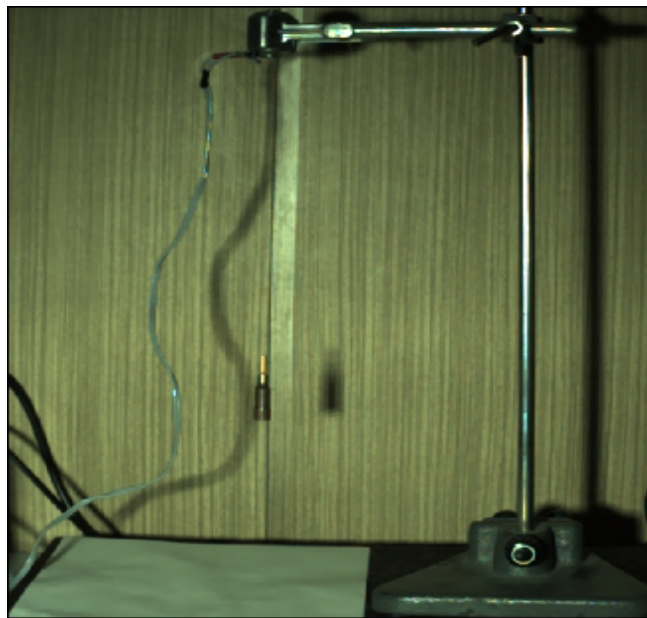
Graf 6: Růst rychlosti při pádu kotvy.

Graf mi opravdu ukázal, že průběh rychlosti při pádu tělesa v tíhovém poli Země je lineární, avšak z přímky, kterou jsem grafem proložil je patrné, že přímka nevychází z 0. Nýbrž z hodnoty  $-0,286 \text{ m/s}$  a z toho je vidět zpoždění, které nastalo při vypuštění kotvy.

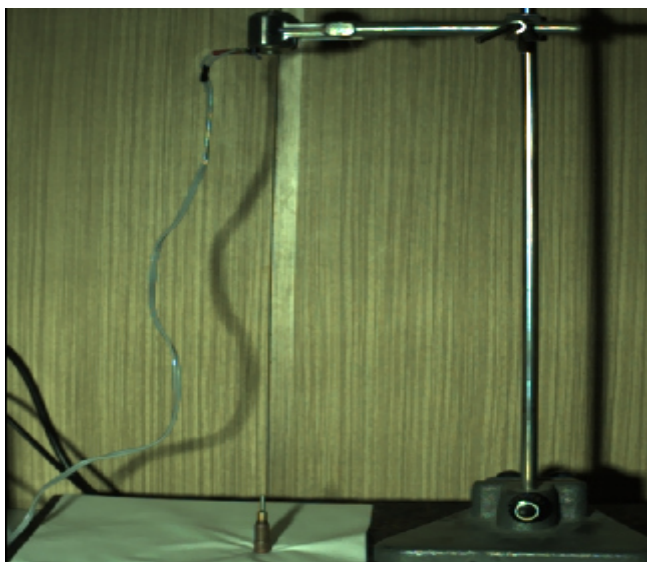
V posledním kroku jsem se ještě pokusil zanalyzovat dráhu společně s odrazem od podložky. Z grafu číslo 7 i samotných obrázku je vidět, že první odraz hned po dopadu ještě směřuje vzhůru po téměř stejné přímce, po které padal dolů.



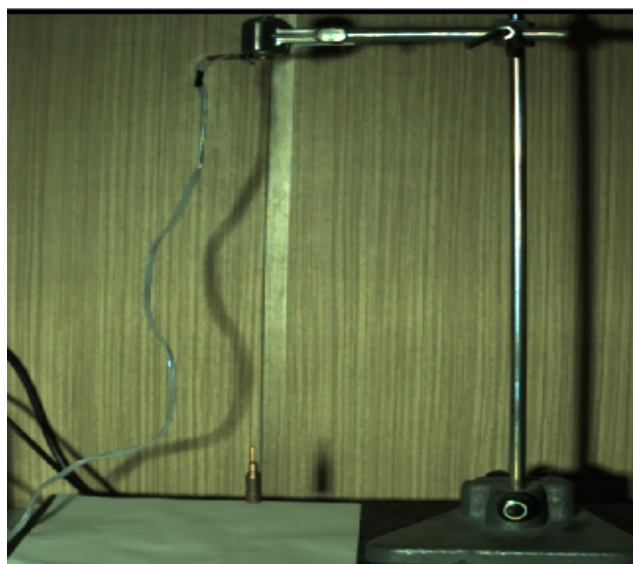
Graf 7: Graf trajektorie kotvy s odrazem



Obr. 20: Pád kotvy zaznamenaný vysokorychlostní kamerou IDT MotionPro Y3-S1.



Obr. 21: Dopad kotvy.



Obr. 22: Odraz kotvy, u kterého je vidět, jeho směr svisle vzhůru.

Z měření můžu konstatovat, že jsem se dostal k výsledkům, které jsem očekával, a synchronizace proběhla úplně v pořádku. Jediným větším překvapením bylo nevypadnutí kotvy hned po stisknutí spínače. To však mohlo být způsobeno již zmiňovaným magnetickým polem, které nepřestalo působit ihned po přerušení napětí, nebo pohybem kotvy, který proběhl uvnitř a já jsem ho nebyl schopen zaznamenat.



## 7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyzkoušet možnosti školní vysokorychlostní kamery IDT MotionPro Y3-S1. Její synchronizaci s jinými měřicími systémy a synchronizované spouštění více měření pomocí triggeru. Posledním a hlavním cílem bylo, vytvořit srozumitelné návody, do kterých budou moci nahlédnout další uživatelé této vysokorychlostní kamery, a tím se jim usnadní práce, než aby si museli veškeré detaily nastavení hledat v anglickém manuálu.

Po důkladném prostudování návodů a knih k analýze pohybu z videa, mohu konstatovat, že se mi cíle povedlo splnit. Nejdříve byla proměřena úloha, se změnou synchronizačních pulzů, na které jsme vyzkoušeli a ověřili přesné nastavení synchronizace ven z kamery. U druhé úlohy jsme propojili kameru se systémem NI MyDAQ a nastavitelnými výstupními pulzy, z tohoto systému, jsme ovládali frekvenci nahrávání. Změna se projevila i v ovládacím software kamery. Díky tomuto měření jsem si vyzkoušel a ověřil, že je možno využít i synchronizaci vysokorychlostní kamery z vnějšího měřicího systému.

U posledních měření jsem propojil s kamerou nejprve kyvadlo a poté kotvu. V měření se mi povedlo nastavení triggeru do takové úrovně, že jsme mohli přesně pomocí tlačítka synchronizovat spuštění měření v LabPro a začátek nahrávání vysokorychlostní kamery, což je vidět v rozboru těchto úloh, které jsem provedl velice důkladně. Video jsem analyzoval pomocí software Tracker a ukázal, že synchronizace proběhly v pořádku. Vynikajícím úspěchem synchronizace u úlohy s kotvou je, že z grafů je vidět, že i po přerušení napětí kotva chvíli zůstává v klidu. Příčinou bylo nejspíše magnetické pole, které nepřestalo působit ihned po sepnutí spínače. Svoji roli mohlo sehrát i mechanické tření kotvy v magnetu.

Myslím, že jsem splnil všechny cíle, které jsem si předsevzal. Práce pro mě měla veliký význam, protože jsem se v první řadě naučil dobře ovládat vysokorychlostní kameru a dále jsem se naučil pracovat s programem Tracker, díky kterému si nyní budu moci analyzovat jakékoli videozáznamy a získávat z nich data, která budu potřebovat.

Moje práce je přínosná i pro katedru fyziky, protože jsem ověřil různé formy synchronizace, které budou na této katedře využity pro vědecko-technická měření. Hlavní cíl je splněn také, a proto přikládám přílohy 1 až 4, ve kterých jsou podrobné návody, jak si nastavovat různé synchronizace a trigger.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] IDT Tech Support Team. *IDT MotionStudio User Manual*. Belgie, 2013.
- [2] JANURA, Miroslav. *Metody biomechanické analýzy pohybu*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3261-8.
- [3] JANURA, Miroslav a František ZAHÁLKA. *Kinematická analýza pohybu člověka*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2004. ISBN 80-244-0930-5.
- [4] Tracker. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://physlets.org/tracker/>
- [5] Auguste a Louis Lumièrové. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Auguste\\_a\\_Louis\\_Lumi%C3%A8rov%C3%A9](https://cs.wikipedia.org/wiki/Auguste_a_Louis_Lumi%C3%A8rov%C3%A9)
- [6] Bezpečnostní testy. *Crashtest* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.crashtest.cz/?act=faq>
- [7] Cesta do hlubin digitální kamery - jak pracuje digitální kamera. *PC World.cz* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://pcworld.cz/hardware/cesta-do-hlubin-digitalni-kamery-jak-pracuje-digitalni-kamera-12943>
- [8] Endelman L. Lincoln. A BRIEF HISTORY OF HIGH SPEED PHOTOGRAPHY 1851-1930 [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://people.rit.edu/andpph/text-hs-history.html>
- [9] Fotografování kolibříků. *FotoAparát* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/994/fotografovani-kolibriku-11084/>
- [10] History of the digital camera and digital imaging. *History* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.digicammuseum.com/en/history>

- [11] Jak pracuje snímací čip v digitálu. *Technet* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: [http://technet.idnes.cz/vime-proc-mate-na-fotkach-osklivy-sum-jak-pracuje-snimaci-cip-v-digitalu-1ni-tec\\_foto.aspx?c=A070625\\_094646\\_tec\\_foto\\_jlb](http://technet.idnes.cz/vime-proc-mate-na-fotkach-osklivy-sum-jak-pracuje-snimaci-cip-v-digitalu-1ni-tec_foto.aspx?c=A070625_094646_tec_foto_jlb)
- [12] Kinematograf. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kinematograf>
- [13] Life in super slow-motion. *BBC* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/science-environment-23205563>
- [14] THE CAMERAS USED IN CRASH TEST. *FILMMAKER IQ* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://filmmakeriq.com/2014/05/the-cameras-used-in-crash-test-analysis/>
- [15] VHS - C. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/VHS-C>
- [16] Visualizing Light at Trillion FPS. *Camera Culture* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://web.media.mit.edu/~raskar/trillionfps/>
- [17] Vysokorychlostní kamera. *Ruce vzhůru* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.rucevzhuru.cz/index.php/component/content/article/53-rychlokamery/133-kamery.html>
- [18] Vysokorychlostní (rychloběžné) kamery. *Spektravision* [online]. [cit. 2016-08-12]. Dostupné z: <http://www.spektravision.cz/produkty/vysokorychlostni-kamery/>
- [19] IDT Tech Support Team. *IDT Cameras Specification Manual*. Belgie, 2013.

# **Přílohy**

## Příloha 1 – Návod na synchronizaci z vysokorychlostní kamery

Díky synchronizaci ven si budete moci snadno nastavit *Width* (nastavení šířky pulzu) a *Delay* (zpoždění pulzu).

Synchronizační pulzy jsou v TTL logice. Z toho vyplývá, že logická 1 je přibližně 5V a logická 0 je přibližně 0V.

Na začátku zapojte kabel do zdířky *Sync Out*. Pro synchronizaci použijte koaxiální kabel zakončený SMA konektorem, druhý konec záleží na tom, jaké zařízení budete s kamerou propojovat. Starší typy rychlokamer tohoto typu využívaly k propojení BNC konektor.



Obr. 23: Zadní panel vysokorychlostní kamery IDT MotionPro Y3-S1.

Poté konfigurujte samotnou synchronizaci. V programu Motion Studio přepněte záložku *Camera* do záložky *Record*. Pak zmáčkněte na tlačítko **Advanced** a na obrazovce se zobrazí nové okno s názvem **Advanced Sync/Trigger Configuration**. V tomto okně vidíte *Sync Out* a pod ním jsou možnosti pro nastavení synchronizace ven.[1]

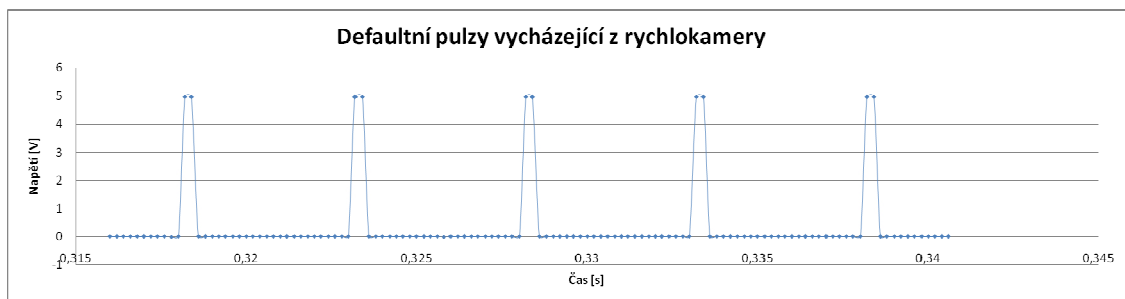
Po otevření paletky **Mode**, jsou na výběr následující možnosti:

- *Default* - Zde synchronizační pulz ven následuje synchronizační pulz dovnitř. Šířkou signálu je zde doba expozice. Toto nastavení zřejmě postačuje pro většinu běžných použití.
- *Inverted default* - Při tomto nastavení Default mají pulzy obrácenou TTL logiku. Logická 0 je v tomto případě přibližně 5V a logická 1 je opačně 0V.
- *Configurable width* - Zde si můžete nastavit šířku synchronizačního pulzu.
- *Inverted configurable width* - Zde nastavujete šířku pulzu opět s obrácenou TTL logikou.
- *Disabled* - V tomto případě bude synchronizace s pulzem zakázána.

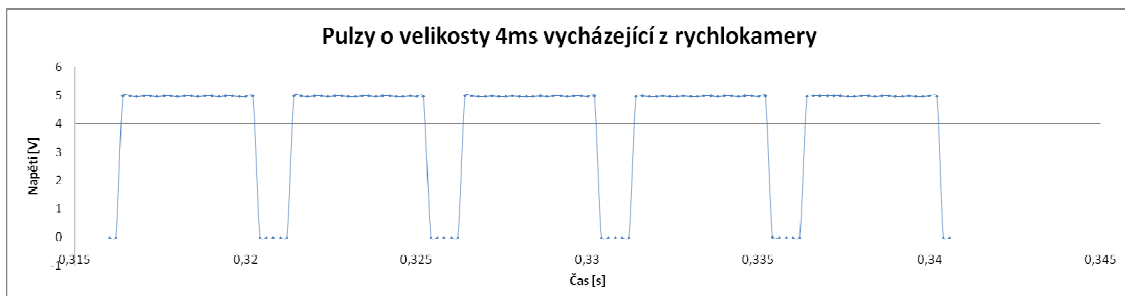
V dalším kroku si nastavte **Alignment**. Je to nastavení akviziční doby. Akviziční doba je doba převodu na HD převodnicích. Poslední co musíte nastavit při synchronizaci ven je **Delay**. Zde si k synchronizačnímu pulzu nastavte jeho zpoždění v  $\mu\text{s}$ . [1]

## Shrnutí

Nejdůležitějším bodem je nastavení *Width* (nastavení šířky pulzu) a *Delay* (zpoždění pulzu). Právě změnu šířky pulzů můžete vidět v grafech 6 a 7 z našeho měření. Sync Out se hodí pro vzájemnou synchronizaci dvou kamer nebo se zábleskovým osvětlením.



Graf 8: Defaultní pulzy vycházející z kamery IDT MotionPro Y3-S1.



Graf 9: Pulzy velikosti 4 ms vycházející z kamery IDT MotionPro Y3-S1

## Příloha 2 – Synchronizace vysokorychlostní kamery z vnějšího měřicího systému

Synchronizace dovnitř umožní z jiného zařízení měnit nahrávací frekvenci kamery, aniž by se musela nastavit v programu Motion Studio. Rychlost snímání je řízena vnějšími synchronizačními pulzy.

Synchronizační pulzy jsou v TTL logice. Z toho vyplývá, že logická 1 je přibližně 5V a logická 0 je přibližně 0V.

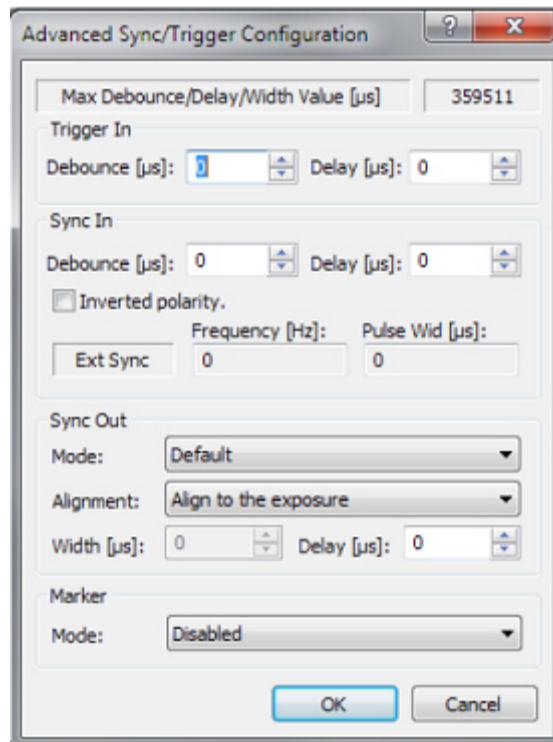
Na začátku zapojte kabel do zdířky Sync Out. Pro synchronizaci použijte koaxiální kabel zakončený SMA konektorem, druhý konec záleží na tom, jaké zařízení bude s kamerou propojeno. Starší typy rychlokamer tohoto typu využívaly k propojení BNC konektor.



Obr. 24: Zadní panel vysokorychlostní kamery IDT MotionPro Y3-S1.

V programu Motion Studio přepněte záložku *Camera* do záložky *Record*. U **Frame Sync** změňte *internal* na *external*, a tím si zajistíte, možnost změny frekvence nahrávání v jiném programu, ke kterému rychlokameru připojíte přes kabel vycházející ze *Sync In*. Rozklikněte tlačítko **Advanced** a na obrazovce se zobrazí nové okno s názvem **Advanced Sync/Trigger Configuration**.

V tomto okně si nastavte **Debounce** a **Delay** v  $\mu\text{s}$ . Dále si můžete zaškrtnout pole *Inverted polarity*, které obrátí TTL logiku a logická 0 bude 5V a logická 1 bude 0V. [1]



Obr. 25: Okno nastavení synchronizace v programu Motion Studio.[1]

### Shrnutí

Díky synchronizaci dovnitř můžete nastavovat frekvenci snímání z jiného zařízení. Změnu frekvence uvidíte i přímo v Motion Studiu, ale nebudete jí moci přes Motion Studio měnit. *Sync In* se hodí použít i pro propojení dvou a více rychlokamer.



## Příloha 3 – Návod na spuštění vysokorychlostní kamery pomocí externího triggeru

Tento trigger zajistí spuštění nahrávání pomocí externího spouštěče, například spínače.

Synchronizační pulzy jsou v TTL logice. Z toho vyplývá, že logická 1 je přibližně 5V a logická 0 je přibližně 0V.

Na začátku zapojte kabel do zdířky *Trig In*. Pro synchronizaci použijte koaxiální kabel zakončený SMA konektorem, druhý konec záleží na tom, jaké zařízení bude s kamerou propojeno. Starší typy rychlokamer tohoto typu využívaly k propojení BNC konektor.



Obr. 26: Zadní panel vysokorychlostní kamery IDT MotionPro Y3-S1.

V programu Motion Studio přepněte záložku *Camera* do záložky *Record*. V paletce **Record mode**, máte na výběr ze dvou možností:

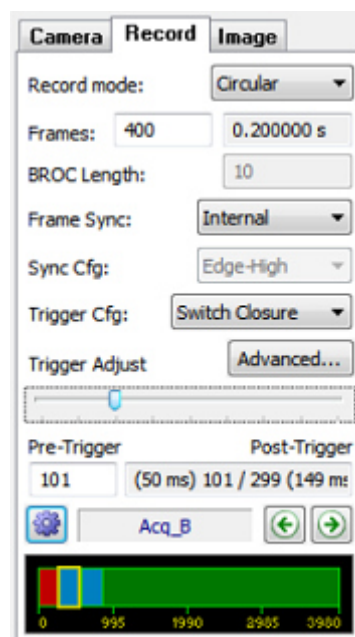
- *Normal* - Kamera nahrává, dokud není její paměť zaplněna.
- *Circular* - Paměť se průběžně přemazává a čeká na spuštění triggeru. Proto, když nastavujete trigger, musíte vždy nastavit Circular, aby se vám povedlo nahrát celý záznam. Po naplnění paměti se paměť přepisuje od začátku.

- *BROC* - Celková paměť se rozdělí do jednotlivých částí. Při příchodu triggeru se spustí nahrávání, které probíhá až do zaplnění segmentu.

Dále přepněte **Frame Sync**. Zvolte *internal*, nebo *external*. *External* zvolte, pokud chcete spouštět nahrávání z jiného zařízení, například spínačem zapojeným v obvodu.

V dalším kroku nastavte **Trigger Cfg**. Ten jde nastavit pouze při zapnutí *Circular* nebo *BROC mode*. Máte na výběr ze třech možností:

- *Edge High* – Používá TTL logiku z 0 na 1.
- *Edge Low* – Používá TTL logiku z 1 na 0.
- *Switch Closure* – Reaguje na zkrat. Spouští se přes spínač.



Obr. 27: Record v programu Motion Studio, ve které nastavujeme trigger. [1]

Nakonec upravte **Trigger Adjust**. Zde si posuvníkem nastavte, kolik snímku se nahraje před triggerem, pokud nějaké chcete. Kolik snímku si zvolíte, vidíte pod *Pre-Trigger* v okně. Do tohoto okna můžete přímo psát, není nutné použít posuvník. Poté se vraťte do záložky *Camera* a nastartujte nahrávání. To však bude spuštěno až s příchodem externího triggeru. Mezitím se na obrazovce bude zobrazovat okno s textem, které informuje o tom, že kamera čeká na trigger.[1]

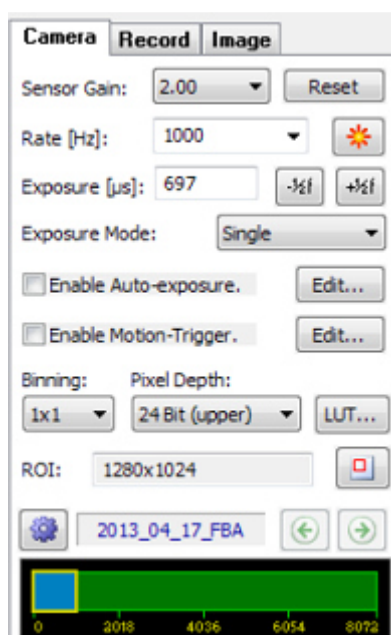
### Shrnutí:

Nastavení triggeru umožňuje spuštění nahrávání, například pomocí spínače z externího zařízení. Tím bude zajištěna, absolutní synchronizace měření a nahrávání.

## Příloha 4 – Nastavení pohybového triggeru vysokorychlostní kamery

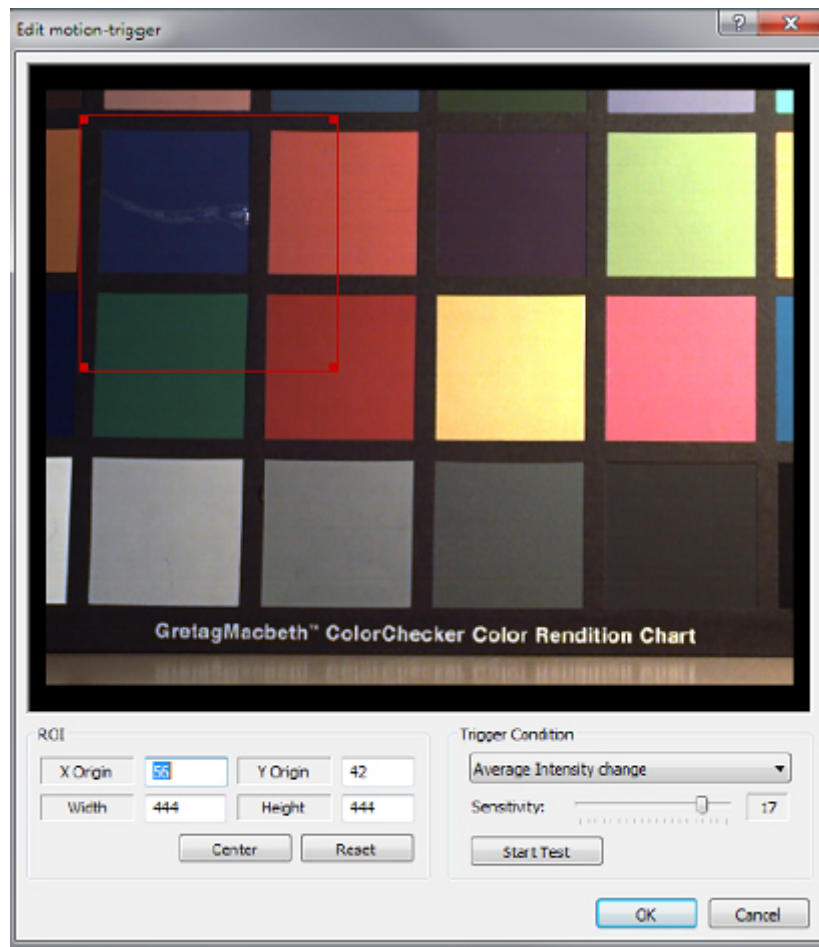
Trigger zajistí spuštění nahrávání při zaznamenání pohybu v určité části snímaného obrazu.

V programu Motion Studio vidíte v záložce *Camera* **Enable Motion Trigger**, vedle kterého je **Edit**, který musíte otevřít.



Obr. 28: Camera, ve které zapnete Enable Motion-Trigger.[1]

V okně *Edit Motion-Trigger* vidíte vámi snímaný obraz, a dále ještě červený obdélník. Popotáhnutím za rohy tohoto obdélníku si nastavte jeho velikost a umístění. Toto okno je klíčové, protože funguje jako spouštěč nahrávání. Pokud se při zapnutí videa ve vámi vybraném oknu objeví nějaký pohyb, automaticky začne nahrávání. Když nastavíte obdélník do pozice, která vám bude vyhovovat, a víte, že se právě v této oblasti bude konat pohyb, nastavte ještě *Trigger Condition*. Zde si v posuvníku *Sensitivity* (citlivost) vyberte, s jakou citlivostí bude záznam na pohyb reagovat. Po nastavení citlivosti stiskněte tlačítko *Start Test*. Proběhne test, který otestuje, jestli ve vámi vybraném okně opravdu nastane nějaký pohyb. Pokud pohyb nastal, obdélník změní barvu z červené na zelenou a vy stiskněte *Ok* a přistupte k samotnému nahrávání. V opačném případě, pokud se v obdélníku pohyb nezaznamená, přenastavte ho do jiné pozice. Znovu spusťte test a pak potvrďte *Ok*. Po spuštění nahrávání uvidíte nápis, který vám oznámí, že kamera čeká na trigger. Pokud proběhne v přednastaveném okénku pohyb, kamera začne nahrávat.



Obr. 29: Okno pro nastavování Motion triggeru.[1]

### Shrnutí

Tento trigger je skvěle využitelný, pokud víte, že v nějaké části snímaného obrazu nastane pohyb. Nahrávání se spustí, pokud nastane pohyb v obdélníku, který jste si zvolili.