



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍHO DĚJE

MEASUREMENT AND EVALUATION OF HIGH-SPEED PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL ŠŤASTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUBOŠ KOTEK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Michal Šťastný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Měření a vyhodnocení vysokorychlostního děje**

v anglickém jazyce:

### **Measurement and evaluation of high-speed process**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Možnosti měření a vyhodnocení dějů konvenčními metodami jsou limitovány jejich rychlostí. Pro snímání extrémně krátkých a rychlých dějů se využívají rychlé kamery. Bakalářská práce se zabývá srovnáním dostupných měřicích systémů, nástrojů pro vyhodnocení a praktickým měřením a vyhodnocením vysokorychlostního děje.

Cíle bakalářské práce:

1. Provést literární rešerši v oblasti dané problematiky.
2. Realizovat měření vysokorychlostního děje a provést vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

PATA, Vladimír. Vysokorychlostní kamerové systémy. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 91 s. ISBN: 80-720-4480-X.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Kotek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 25.11.2012


L.S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	<b>BAKALÁŘSKÁ PRÁCE</b>	

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vysokorychlostních kamerových systémů. V první části jsou nastíněny některé důležité historické milníky vysokorychlostního snímání a popsán základní princip zpracování obrazu digitální kamerou. V další části je práce zaměřena na srovnání kamerových systémů nejznámějších výrobců. V závěru práce je potom provedeno měření kamerovým systémem Olympus i-SPEED 2 a jeho vyhodnocení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vysokorychlostní kamera, měření

## **ABSTRACT**


This bachelor thesis follows up the issue of high-speed camera systems. First part of this thesis outline some historical milestones of high-speed shooting and describe the basic principle of image processing with a digital camera. Next part of this thesis is focused on comparison of high-speed camera systems of the most known producers. Finally there is the measurement by high speed camera Olympus i-SPEED 2 and it's evaluation at the end of thesis.

## **KEYWORDS**

High-speed camera, measurement

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTASTNÝ, M. Měření a vyhodnocení vysokorychlostního děje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 30s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Luboš Kotek, Ph.D.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	


### **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření a vyhodnocení vysokorychlostního děje vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Luboše Kotka, Ph.D a uvedl v seznamu literatury všechny použité zdroje.

Ve Vacenovicích dne 22. května 20013

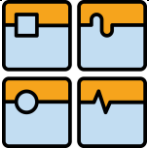
.....

Michal Šťastný

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Luboši Kotkovi, Ph.D za odborné vedení, cenné informace a rady.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

## OBSAH


### ZADÁNÍ

### ABSTRAKT


### ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

### PODĚKOVÁNÍ

1. ÚVOD.....	11
2. HISTORIE VYSOKORYCHLOSTNÍ FOTOGRAFIE A VIDEA.....	12
2.1. William Henry Fox Talbot.....	12
2.2. Eadweard Muybridge.....	12
2.3. Thomas Alva Edison.....	13
2.4. Harold Eugen Edgerton.....	13
3. VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA.....	14
3.1. Zpracovávací část.....	14
3.1.1. Objektiv.....	14
3.1.2. Senzor = snímací čip.....	15
3.1.2.1. CCD.....	15
3.1.2.2. CMOS.....	15
3.1.2.3. Sensory pro vysokorychlostní kamery.....	16
3.1.2.4. Vlastnosti senzorů.....	16
3.1.2.4.1. Pixel.....	16
3.1.2.4.2. Velikost pixelu.....	16
3.1.2.4.3. Velikost snímače.....	17
3.1.2.4.4. Rozlišení snímače.....	17
3.1.2.4.5. Citlivost.....	17
3.1.2.4.6. Barevná hloubka.....	17
3.1.3. A/D převodník.....	18
3.1.4. Obrazový processor.....	18
3.2. Uchovávací část.....	19
3.2.1. HDD.....	19

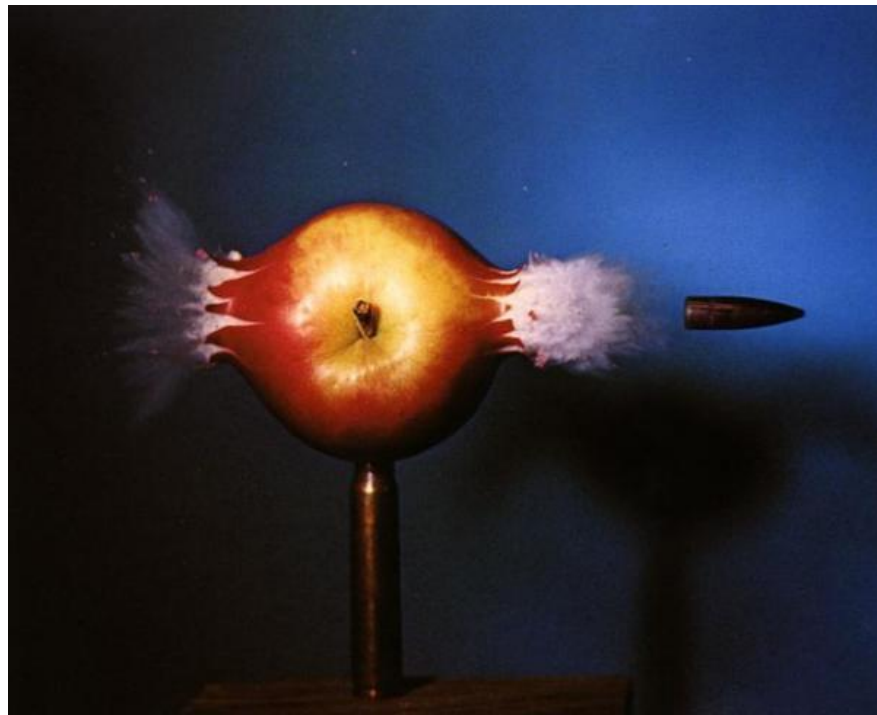
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	<b>BAKALÁŘSKÁ PRÁCE</b>	

3.2.2.RAM.....	20
<b>4. POROVNÁNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍCH KAMEROVÝCH SYSTÉMŮ.....</b>	<b>21</b>
4.1. <b>IDT</b> .....	21
4.1.1.M- série.....	21
4.1.2.NX- série .....	22
4.1.3.Y- série.....	23
4.1.4.HD kamery.....	24
4.2. <b>Olympus</b> .....	25
4.2.1.Technické specifikace kamer Olympus.....	25
4.3. <b>Photron</b> .....	28
4.3.1.„Vícehlavicové“ kamerové systémy.....	28
4.3.2.Kamery třídy Fastcam SA.....	29
4.3.3.Kamera Fastcam IS-1M (CCD).....	31
4.4. <b>Vision Research</b> .....	32
4.4.1.Phantom Miro eX- série.....	32
4.4.2.Phantom ir300.....	32
4.4.3.Phantom v- série.....	33
4.4.4.Phantom 1210/1610.....	33
4.4.5.Phantom Miro M/LC série.....	34
<b>5. MĚŘENÍ POMOCÍ KAMERY OLYMPUS I-SPEED 2</b> .....	<b>35</b>
5.1. <b>Příprava měření</b> .....	36
5.2. <b>Měření</b> .....	37
5.2.1.Sekvence měření č. 1.....	37
5.2.2.Sekvence měření č. 2.....	39
5.3. <b>Vyhodnocení</b> .....	40
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
<b>7. Použité informační zdroje</b> .....	<b>43</b>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

# 1. Úvod

Ve světě existuje mnoho rychlých nebo velmi krátkých dějů, které nejsme schopni zachytit ať už okem, nebo obyčejnou kamerou. Existují však kamery, které to dokážou. Tzv. vysokorychlostní kamery dokáží v dnešní době snímat dokonce více jak 1 000 000 fps (snímků za sekundu), což je v porovnání s „pomalými“ digitálními kamerami snímající frekvencí maximálně 30 fps (frames per second) neporovnatelné. Nepřímými metodami jsou speciální kamery schopny monitorovat dokonce pohyb fotonů. Jako takové mají ohromný potenciál a velkou šíři uplatnění ve vědě, balistice, lékařství, strojírenství nebo i filmu. Ve strojírenství nachází uplatnění především při optimalizaci výrobních linek, zjišťování problémů a jejich eliminaci. [14]



*Obr. 1.1 Test destruktivní síly kulky na jablku[13]*

Cílem této bakalářské práce je seznámit zájemce s momentálně dostupným sortimentem vysokorychlostních kamerových systémů, vysvětlit některé pojmy, které se k tomuto tématu vážou, a porovnat některé nejdůležitější parametry kamer. Dále také provést měření vysokorychlostní kamerou a pokusit se vyhodnotit pořízené data.



## 2. Historie vysokorychlostní fotografie a videa

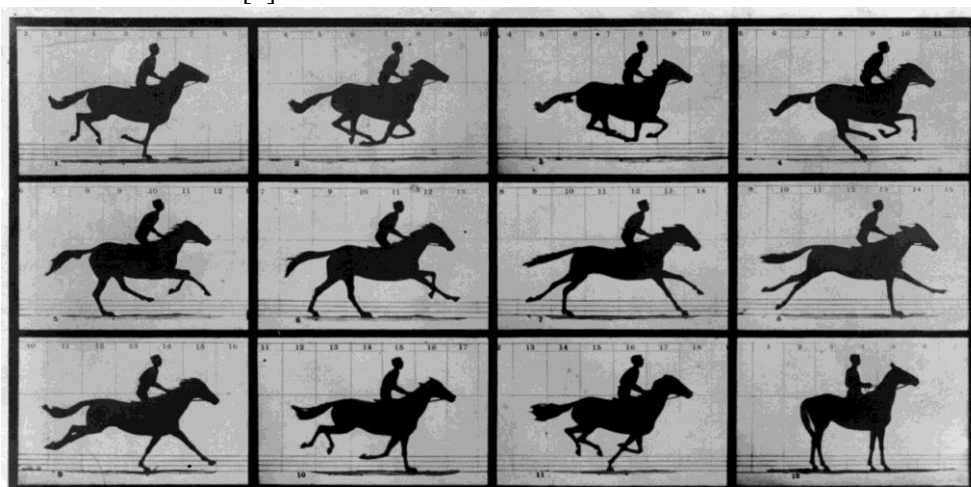
### 2.1. William Henry Fox Talbot

Počátky vysokorychlostního zachycování obrazu datujeme do poloviny 19. století, kdy William Henry Fox Talbot provedl experiment, jehož výsledkem byla fotografie zachycující několik centimetrů čtverečních novin na rychle se otáčejícím kole. Využíval k tomu temné místnosti a výboj z tzv. leydenské láhve (statická elektřina). Byl to jeden z prvních experimentů s fotografickým bleskem. Nicméně k rychlostnímu videozáznamu měl tento experiment dosud daleko. [7, 10]

### 2.2. Eadweard Muybridge

Mnohem blíže k videozáznamu jako takovému, uvážíme-li videozáznam jako na sebe navazující statické obrázky promítané rychle za sebou, byla série fotografií vytvořená Eadweardem Muybridgem.

Měl dokázat, že v určitém stádiu koňského klusu se ani jedna noha nedotýká země. S finanční podporou Lenanda Stanforda vytvořil sérii snímků (Obr. 2) na mokrych kolódiových deskách. Pokud prováděl v dřevěné budově, kde na jedné stěně visel bílý kontrastní horizont a na straně druhé bylo pravidelně rozmístěno 24 fotoaparátů. Ke každému fotoaparátu byl připojen provázek táhnoucí se napříč dráhou. Fotoaparát pořídil snímek, když byl provázek přetržen. Práce nebyla jednoduchá, protože mu trvala 6 let (1873-1878), nicméně na tento průlomový experiment navázali jiní a posunuli hranici vědění zase o kousek dál. [5]



Copyright, 1878, by MUYBRIDGE.

MORSE'S Gallery, 417 Montgomery St., San Francisco.


#### THE HORSE IN MOTION.

Illustrated by MUYBRIDGE.

AUTOMATIC ELECTRO-PHOTOGRAPHY.

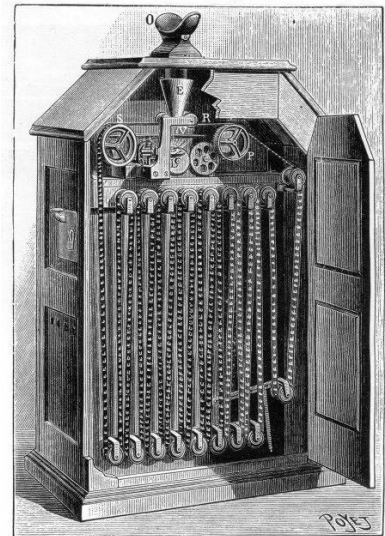
"SALLIE GARDNER," owned by LELAND STANFORD; running at a 1.40 gait over the Palo Alto track, 19th June, 1878.  
The negatives of these photographs were made at intervals of twenty-seven inches of distance, and show the twenty-fifth part of a second of time; they illustrate consecutive positions assumed in each twenty-seven inches of progress during a single stride of the mare. The vertical lines were twenty-seven inches apart; the horizontal lines represent divisions of four inches each. The exposures of each negative was less than the two-thirtieth part of a second.

Obr. 2.2.1 Kůň v pohybu[14]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

## 2.3. Thomas Alva Edison

Muybridgovy kamery byly svým způsobem revoluční, proto se o ně zajímalo mnoho jiných vědců a během následujících dvaceti let vývoje a zlepšování přišel na svět kinetoskop (Obr. 2.3.1), kinematografický přístroj Thomase Alva Edisona. K jeho dalším vynálezům patřil také kinetograf. To byl naopak přístroj určený k promítání krátkých filmů natočených kinetoskopem na celuloidové filmy. Roku 1891 v New Jersey bylo pomocí těchto přístrojů uskutečněno první veřejné filmové představení. [8]



Obr. 2.3.1 Kinetoskop[12]

## 2.4. Harold Eugen Edgerton

Ve 30. letech 20. století vynalezl Harold Edgerton elektronickou obdobu stroboskopu. Využíval přerušované elektronické výbojkové světlo. Díky těmto zábleskům byl schopný zkoumat rychlé děje. Zpočátku ho využíval ke zkoumání strojních součástí synchronních motorů, později i k pořizování fotografií. Už v této době byl schopen dosáhnout záblesků o délce 1/500 000 sekundy. Toto zařízení v kombinaci s dobovými kamerami umožňovalo pořídít sekvence snímků s frekvencí až 1000 snímků za sekundu.[11]

Tento přístroj byl ještě vylepšován firmami Western Electric a Wollensac Optical. Na tu dobu ohromné množství dat bylo ale potřeba ukládat, proto délky filmů kolem 100 metrů nebyly výjimkou.[5]



## 3. Vysokorychlostní digitální kamera

Digitální kamera je sofistikovaný přístroj zpracovávající světelné paprsky odražené od snímaných objektů. Cesta světla skrz kameru se dá rozdělit do několika částí. Část první je částí zpracovávací a část druhá částí uchovávací. Obě tyto části jsou spolu propojeny a při dobré spolupráci tvoří kvalitní vysokorychlostní kameru. U vysokorychlostních kamer totiž nejde pouze o snímací frekvenci samotného senzoru ale spíše o přenos a ukládání velkého množství dat.

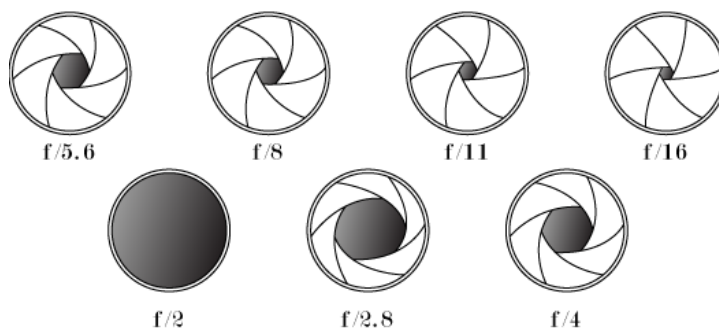
### 3.1. Zpracovávací část

Tato část kamery slouží k zachycení světelných paprsků nesoucí informaci o scéně před kamerou. Světlo odražené snímaným předmětem nejprve prochází objektivem kamery, kde překonává překážky jako jsou čočky, clona nebo soustava zrcadel, a dopadá na světločivný snímač, kde je dále zpracováváno.

#### 3.1.1. Objektiv

Objektiv je čočka nebo soustava čoček (někdy i zrcadel), která opticky mění obraz (zvětšení, zmenšení, převrácení...). Zvětšování a zmenšování snímaného obrazu je docíleno změnou ohniskové vzdálenosti. Ohnisková vzdálenost  $f$  je veličina charakterizující čočku.

Množství světla procházejícího objektivem reguluje clona. Nejčastějším typem je tzv. irisová clona.



Obr. 3.1.1.1 Irisová clona s různým clonovým číslem[15]

Clona je charakterizována clonovým číslem. Clonové číslo je definováno vztahem:

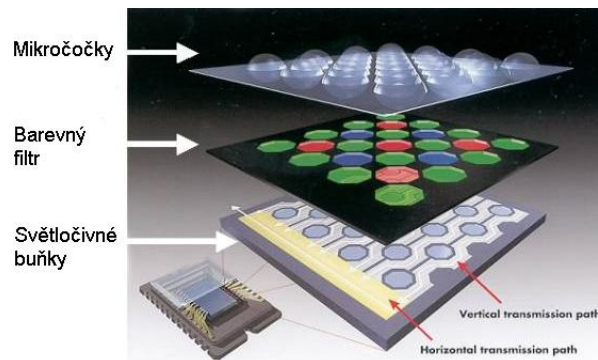
$$F = f/d \quad (3.1.1.1)$$

, kde  $f$  ... je ohnisková vzdálenost a  
 $d$  ... je průměr otvoru clony.[10]

### 3.1.2. Senzor = snímací čip

Snímací čip je hlavní částí kamery. Dopadající světlo generuje v jeho světločivných buňkách elektrický náboj, který je zesílen zesilovači a dál zpracováván.

Vysokorychlostní kamery využívají dva typy snímačů, CMOS a CCD. Oba snímače pracují na podobném principu. Světlo dopadá na plochu snímače, kde jsou umístěny miniaturní čočky usměrňující světlo přímo do světločivných buněk. Tím dochází k minimalizování světelných ztrát.



Obr. 3.1.2.1 Schéma senzoru

Pixely snímače jsou však schopné zaregistrovat pouze intenzitu světla, nikoliv jeho barvu. Z toho důvodu je předřazený také barevný filtr. Většina kamer využívá tzv. Bayerovu masku, která zaručí, že na pixel dopadne jenom určitá barva. Výsledná barva pro pixel se pak interpoluje díky informacím zjištěným z okolních pixelů.

#### 3.1.2.1. CCD snímač (Charged coupled device)

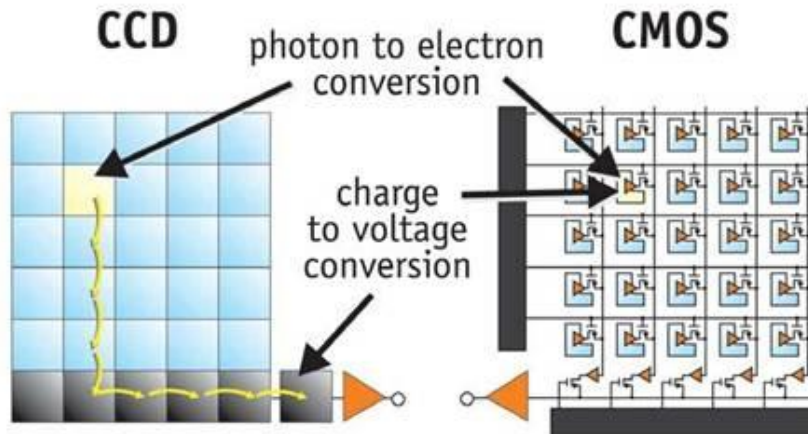
CCD snímač nemá v okolí buňky žádnou elektroniku, je tedy menších rozměrů. Bez této elektroniky se však kamera neobejde, čili je nutné ji v kameře mít k senzoru připojenou. (ve výsledku větší nároky na prostor). Technologie výroby CCD čipu je mnohem starší než CMOS.

- + kvalita obrazu
- + citlivost na světlo
- vysoká spotřeba (zahřívání)

#### 3.1.2.2. CMOS snímač (Complementary metal oxid semiconductor)

CMOS je vybaven u každé buňky jednoduchým obvodem, který se stará o zesílení a odeslání již kompletní informace do procesoru. Obvody samotné na druhou stranu zmenšují světločivnou plochu. [16]

- + cena
- + celková velikost (čip + elektronika)
- + nižší spotřeba



Obr. 3.1.2.2 CCD vs. CMOS senzor

### 3.1.2.3. Senzory pro vysokorychlostní kamery

Výrobci vysokorychlostních kamer upřednostňují CMOS čipy, které zažívají v posledním desetiletí velký boom. Od 70. let minulého století se používali jako obrazové snímače především CCD. Jejich výkon v podávání realistických obrazů tedy prudce narůstal. Nicméně s postupným vyvíjením nových technologií výroby polovodičů a čipů dostaly svou šanci i CMOS čipy.

Velká flexibilita CMOS čipů je jen jednou z výhod, které dnešní CMOS snímače poskytují. Dokonce i kvalitou obrazu jsou dnes tyto senzory téměř rovnocenné. Jednou z největších výhod CMOS čipů je možnost snímat pouze výřezem celkové plochy čipu. Redukování rozlišení je výhodné především při vysokých snímacích rychlostech, kdy kamerou proudí velké množství dat.

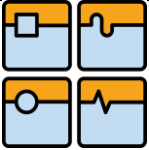
### 3.1.2.4. Vlastnosti senzorů

#### 3.1.2.4.1. Pixel

Pixel je nejmenší jednotka rastrové (bitmapové) digitální grafiky. Má čtvercový tvar a je jednoznačně definovaný svou polohou ve čtvercové síti. (sloupec x řada).

#### 3.1.2.4.2. Velikost pixelu

Pixel jakožto čtvercová plocha, která sbírá informaci o světle, musí mít určitou velikost, aby byla schopna zachytit co možná nejlépe světlo. Větší pixely jsou schopny získat mnohem víc informací o světle díky větší ploše, na kterou světlo dopadá. Potřebují tedy i kratší dobu expozice. U digitálních vysokorychlostních kamer se pohybují velikosti pixelů v řádech mikrometrů (příklad: 10 $\mu$ m x 10 $\mu$ m).

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 17
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

#### 3.1.2.4.3. Velikost snímače

Pixely se nacházejí těsně vedle sebe, proto lze jednoduchým výpočtem zjistit i velikost senzoru. Počet pixelů na řádku vynásobený velikostí strany pixelu určí šířku senzoru, jeho výška se určí obdobně. Výrobci vysokorychlostních kamer používají senzory o různých rozlišeních s různými velikostmi pixelů, je proto jasné, že velikosti senzorů se u jednotlivých kamer liší.

#### 3.1.2.4.4. Rozlišení snímače

Každý snímač je tvořen z jednotlivých bodů=pixelů, jejichž počet je pevně stanoven. Jsou seřazeny v řadách a sloupcích. Značí se jako součin počtu sloupců pixelů a řad, např.:800x600 (což znamená 800 pixelů na šířku a 600 na výšku, dohromady tedy 480 000px = 0,48Mpx). Krajní řady bývají využívány jako sběrnice, proto bývá skutečné aktivní rozlišení nepatrně menší.

#### 3.1.2.4.5. Citlivost


Citlivost je míra schopnosti světločivného materiálu či snímače zachytit obraz snímané scény za slabého osvětlení ve správném podání. Při velmi slabém osvětlení se totiž světločivný snímač dostává do oblastí podexpoze, ve které již není závislost velikosti generovaného náboje na množství dopadajícího světla lineární závislostí.

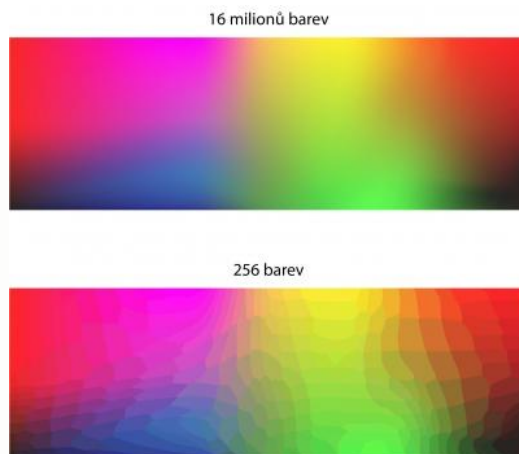
Světločivný senzor reaguje na dopadající světlo generováním elektrického náboje. Čím větší množství světla dopadá, tím víc náboje se vytváří. Tato linearita ovšem má své hranice. Při velmi slabém osvětlení začne nad slabým generovaným nábojem převládat náhodný elektrický šum světločivných buněk. Naopak při velmi silném osvětlení jsou buňky zahlceny světlem, což vede k tzv. vypáleným místům, ve kterých se ztrácí části obrazu. [18]

#### 3.1.2.4.6. Barevná hloubka

Je termín užívaný v počítačové grafice. Každá barva se skládá ze tří základních barev o určité mohutnosti = intenzitě (červené - red, zelené – green a modré – blue, odtud RGB). Intenzita se udává v procentech (dekadický způsob) nebo podle použité barevné hloubky jako určitý počet bitů vyhrazených pro barevnou komponentu (pro 8 bitů na komponentu je rozsah hodnot 0 – 255, pro 16 bitů na komponentu je rozsah hodnot 0 – 65535), přičemž čím větší je mohutnost, tím vyšší intenzitou se barva komponenty zobrazuje.

Pojem barevná hloubka označuje, z kolika barev si každý pixel může vybrat, aby se stal co nejdělnějším zobrazením originálu. Pro binární počítačový svět nul a jedniček je základní barevnou hloubkou 1 bit (černá nebo bílá). Takový svět je ale lidskému oku cizí. Zobrazování barevné se tedy snaží o určitý kompromis mezi kvalitou obrazu a objemem zpracovávaných dat. Tento objem je především u vysokorychlostních kamer důležitý. Kamera takových obrazů zpracovává a ukládá nespočet. [19]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 18
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	



*Obr. 3.1.2.4.6.1 Porovnání bitových hloubek [28]*

Při snímání s rozlišením 800x600 pixelů a 10 bitovou barevnou hloubkou dostaneme velikost snímku jako:

$$(800px \times 600px) \times 10bit = 4\,800\,000bit = 600\,000byte = 0,57MB$$

Při snímkové frekvenci 10 000 fps se pak dostáváme k výslednému číslu v GB, se kterými musí kamera každou vteřinou pracovat.

$$0,57MB \times 10\,000fps = 5\,700MB = 5,57GB$$

### 3.1.3. A/D převodník

Signál, který je generován světločivnými buňkami senzoru, je analogový. Obsahuje informaci ve formě čísla. Toto číslo udává velikost napětí generovaného nábojem nashromážděným každou světločivnou buňkou. A/D převodník převádí tento analogový signál na signál digitální (složený z nul a jedniček). Digitální signál má mnoho výhod. Jednou z výhod je možnost lehce odstranit případná zkreslení, poněvadž jsou možné jen dvě logické hodnoty, nebo přesné kopírování a zpracovávání dat.[25]

### 3.1.4. Obrazový procesor

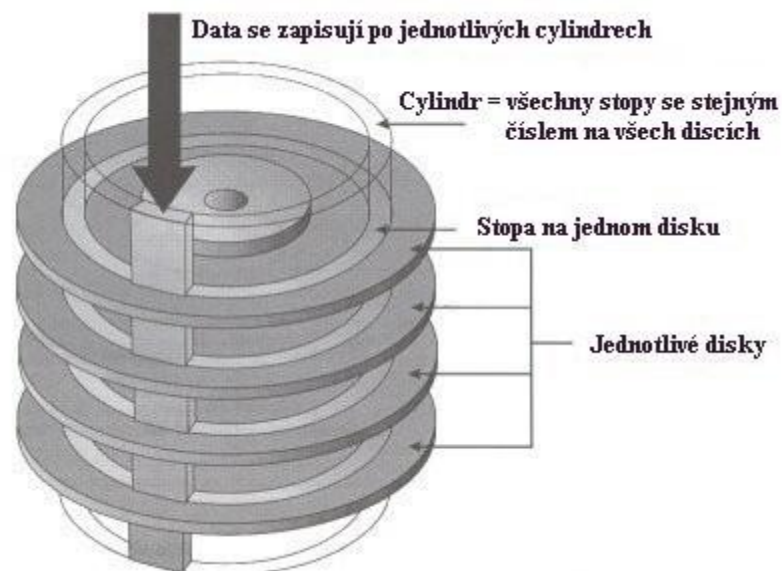
Obrazový procesor je část kamery, zpracovávající a vyhodnocující informace. Výsledný obraz je tvořen právě zde z informací poskytnutými snímačem. Vyhodnotí barevnost a jas jednotlivých pixelů, aplikuje filtry redukující šum, upravuje vyvážení bílé barvy a tak podobně. Výsledný vypočtený obraz komprimuje a ukládá na paměťové médium, které má k dispozici. [29]

## 3.2. Uchovávací část


Ukládání dat generovaných vysokorychlostní kamerou je oblast, která prakticky nejvíc ovlivňuje rychlosti snímání. Senzor dokáže snímat a generovat vysoké množství dat, které procesor dokáže zpracovat, ale úložiště schopné tyto GB dat za sekundu ukládat je prakticky jenom paměť s přímým přístupem neboli RAM, která je známá z počítačů jako operační paměť.

### 3.2.1. HDD

Úložiště, které známe z počítačů jako HDD (Hard Disk Drive) je složeno z několika rotujících disků podobných diskům CD. Zápis na takový disk potom probíhá postupným popisováním jednotlivých sektorů a stop na discích. Je zapotřebí diskem otáčet pomocí elektromagnetu a zapisovat postupně bajt vedle bajtu do sousedních sektorů. Přestože se disky točí rychle, prodleva při pootáčení a náběhu do jednotlivých stop a sektorů je příliš vysoká na to, aby byla tato technologie použita u zařízení požadující vysokou operační rychlost jako vysokorychlostní kamery. HDD se tedy u vysokorychlostních kamer většinou nedá použít při pořizování záznamu. Jsou však spolu s Flash disky nebo paměťovými kartami nezbytné pro uchování a přenášení takového záznamu. [27]

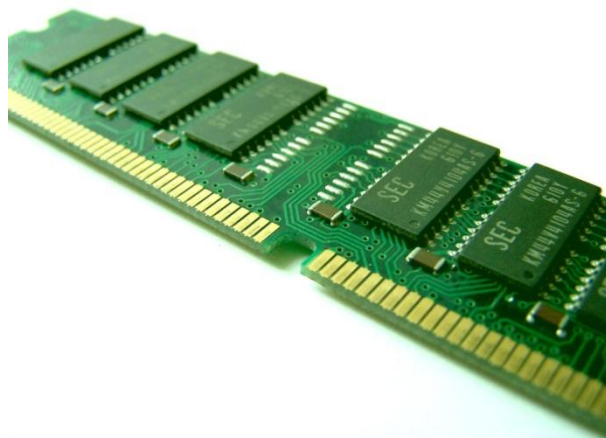


Obr. 3.2.1.1 Schematický obrázek HDD

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

### 3.2.2. RAM

Paměť RAM (Random Access Memory) je dalším typem paměti. Používá se v různých elektronických přístrojích jako například počítače, tiskárny, vysokorychlostní kamery. Jejich nevýhodou je, že po vypnutí přívodu elektrického proudu se ztratí data na ní uložená. Proto se nehodí k zálohování dat. Důvod proč se však využívá, je způsob s jakým data spravuje. HDD přistupoval k datům postupně, využíval mechanického otáčení disků. RAM je elektronická součást schopná náhodně ukládat data kamkoliv do své kapacity bez prodlev. Nejmodernější paměti RAM dokáží ukládat více než 10 GB dat za sekundu.[26]



*Obr 3.2.2.1 Ilustrační obrázek RAM paměti počítače*

## 4. Porovnání vysokorychlostních kamerových systémů

Trh vysokorychlostních kamerových systémů je poměrně široký, nicméně existuje několik výrobců a společností, které v tomto odvětví průmyslu vynikají kvalitou svých výrobků, širokým sortimentem a možností dodatečných úprav kamerového systému podle přání zákazníka.

K neznámějším společnostem patří IDT Redlake, Vision Research, Olympus nebo společnost Photron. V této bakalářské práci budu porovnávat výrobky právě těchto firem.

K porovnávání kamerových systémů využiji jejich specifikace udávané přímo výrobcem na jejich internetových stránkách, zejména rozlišení jejich senzorů, maximální snímkovací frekvenci, maximální datový tok pixelů za sekundu, které kamera dokáže zpracovat, možnosti ukládání pořízených dat a také možnosti ovládání kamery.

### 4.1. IDT

Společnost IDT nabízí tři typy kamerových systémů, M, NX a Y. Každá z těchto sérií má určité specifikum a možnosti uplatnění. Většina kamer IDT je také nabízena ve vícero rychlostních provedeních. Nejčastěji tyto rychlostní typy označují jako S1, S2, S3, kde S3 je typ nejrychlejší. [1]

#### 4.1.1. M-série

Kamery M série jsou konstruovány, aby byly co nejmenší a nejlehčí (55x55x75 mm, 0.32 kg). Tato minimalizace neumožňuje zapracování vnitřní paměti a baterie, proto úplně chybí. Ukládání pořízeného záznamu je tedy realizováno připojením počítače a ukládáním přímo na HDD s využitím operační paměti počítače a vhodného softwaru. Optimálním operačním systémem je 64-bitový Windows, který umožňuje optimální využití operační paměti větší jak 2GB. Možnost přímého ukládání na HDD je výhodná pro nahrávání dlouhých dějů. Doba nahrávání je omezoována pouze velikostí harddisku, která v dnešní době může dosahovat řádu TB (=1000 GB).



Obr. 4.1.1.1 Pohled na zadní panel kamery M série



Tab. 4.1.1.1 Technická specifikace IDT M série

IDT M série	M3	M5
Rozlišení senzoru	1280px x 1024px	2320px x 1728px
Max. FPS *	31 000 fps	17 200 fps
Max. datový tok *	0,63 Gpx/s	0,63 Gpx/s
Barevná hloubka	8 bit mono/ 24 bit color	8 bit mono/ 24 bit color
Vnitřní paměť	-	-
Další možné úložistě	HDD počítače	HDD počítače
Baterie	-	-

\* Hodnoty uváděné v tabulce se mohou lišit v závislosti na rychlostním typu kamery S1, S2, S3. Uvedeny jsou rychlostní parametry nejrychlejší dostupné konfigurace.

Provozní podmínky v jakých tyto kamery mohou pracovat jsou -40 - +50 stupňů Celsia a odolnost proti nárazům/vibracím je 100G/40G ve všech osách.

#### 4.1.2. NX-série

Tyto kamery jsou vysoce odolné proti nárazům a vibracím (200G/40G), jsou malé (69x64x64 mm), lehké a oproti svému předchůdci, kamerám typu NR, zjednodušené. Podstatným zjednodušením prošel zadní panel kamery, kde se v základní verzi NX nachází pouze jeden konektor typu 16-pin LEMO. Pomocí tohoto konektoru je kamera jak napájena tak ovládána. Díky svým dispozicím jsou tyto kamery určeny především pro crash testy automobilů.

NX je základní variantou. NX T (Tra) je navíc vybavena dvěma 7 kolíkovými LEMO konektory pro připojení a synchronizaci s osvětlovacími LED moduly. NX A (Air) je zase vybavena Wifi rozhraním. Pomocí speciální aplikace lze pak kameru ovládat pomocí iPadu, iPhoneu nebo iPodu.



Obr. 4.1.2.1 NX



Obr. 4.1.2.2 NX T



Obr. 4.1.2.3 NX A

Tab. 4.1.2.1 Technická specifikace IDT NX série

IDT NX série	NX 3	NX 4	NX 5
Rozlišení senzoru	1280px x 1024px	1024px x 1024px	2560px x 1920px
Max. FPS	62 000 fps	90 000 fps	60 000 fps
Max. datový tok	3 Gpx/s	3 Gpx/s	3,35 Gpx/s
Barevná hloubka	10 bit mono/30 bit color	10 bit mono/30 bit color	10 bit mono/30 bit color
Vnitřní paměť	1.25,3,4,5 GB	1.25,3,4,5 GB	1.25,3,4,5 GB
Baterie	Li-on (výdrž až 2h)	Li-on (výdrž až 2h)	Li-on (výdrž až 2h)

Tab. 4.1.2.2 Technická specifikace IDT NX série (2. část)

IDT NX série	NX 7	NX 8
Rozlišení senzoru	1920px x 1080px	1600px x 1200px
Max. FPS	65 000 fps	54 000 fps
Max. datový tok	9,66Gpx/s	7,15 Gpx/s
Barevná hloubka	10 bit mono/30 bit color	10 bit mono/30 bit color
Vnitřní paměť	1.25,3,4,5 GB	1.25,3,4,5 GB
Baterie	Li-on (výdrž až 2h)	-

### 4.1.3. Y série

Y série je díky své univerzálnosti vhodná prakticky ke všem měřením, se kterými se v průmyslu setkáme, ba i mimo něj. Kamery této série již nejsou rozměrově tak nenáročné, jejich hlavní předností je však výkon a konektivita. Jsou vybaveny konektory HDMI, USB 2.0 a Gigabit Ethernet. Také tato série může být vybavena Wifi adaptérem a jako i ostatní kamery IDT odolává nárazům 100G/40G ve všech osách. K dispozici jsou monochromatické i barevné kamery s vnitřní pamětí až do velikosti 64 GB.

Tab. 4.1.3.1 Technická specifikace IDT Y série

IDT Y série	Y3	Y4
Rozlišení senzoru	1280px x 1024px	1024px x 1024px
Max. FPS	140 000 fps	122 000 fps
Max. datový tok	7,32 Gpx/s	5 Gpx/s
Barevná hloubka	10 bit mono/30 bit color	10 bit mono/30 bit color
Vnitřní paměť	8, 16, 32, 64 GB	8, 16, 32, 64 GB
Baterie	Li-on (výdrž až 1h)	Li-on (výdrž až 1h)

Tab. 4.1.3.2 Technická specifikace Y série (2. část)

IDT Y série	Y5	Y7
Rozlišení senzoru	2560px x 1920px	1920px x 1080px
Max. FPS	69 000 fps	110 000 fps
Max. datový tok	3,35 Gpx/s	17,4 Gpx/s
Barevná hloubka	10 bit mono/30 bit color	10 bit mono/30 bit color
Vnitřní paměť	8, 16, 32, 64 GB	8, 16, 32, 64 GB
Baterie	Li-on (výdrž až 1h)	Li-on (výdrž až 1h)

\* Hodnoty uváděné v tabulce 4.1.3.1 a 4.1.3.2 se mohou lišit závislosti na rychlostním typu kamery S1, S2, S3, HD. Uvedeny jsou rychlostní parametry nejrychlejší konfigurace.

#### 4.1.4. HD kamery

IDT Redlake nabízí dvě kamery určené především ke komerčním účelům (reklamy, klipy...). Jedná se o Y3 HDiablo a Y5 HDiablo. Jejich maximální snímací rychlost není vysoká, vynikají však v rozlišení, které poskytují, nízkou hladinou šumu a všeobecně mnohem kvalitnějším obrazem. Jsou schopny natáčet ve formátech 1080p a 720p.

## 4.2. Olympus

Olympus je jednou ze společností zabývajících se výrobou a distribucí vysokorychlostních kamer. Jejich výrobky se vyznačují kvalitním zpracováním (hliníková konstrukce), možností kompletního ovládní každé kamery pomocí panelu CDU a také výkonným vyhodnocovacím softwarem, na kterém spolupracuje s firmou Xcitex. Digitální videozáznam je ukládán na vestavěnou vnitřní paměť a následně zkomprimován a přehrán pomocí flash karty a nebo rozhraní ethernet k dalšímu zpracování např. do počítače. Každá vysokorychlostní kamera nese označení i-SPEED.

Všechny vysokorychlostní kamery Olympus jsou postaveny na monochromatickém nebo barevném obrazovém senzoru CMOS. Kamery i-SPEED LT a i-SPEED 2 jsou osazeny senzorem o maximálním rozlišení 800x600 pixelů, ostatní senzorem o rozlišení 1280x1024 pixelů a nejnovějším přírůstkem je kamera Cyclocam se senzorem o rozlišení 640x480 pixelů.

### 4.2.1. Technické specifikace kamer

**Cyclocam** je nejnovějším přírůstkem do rodiny Olympus. Její technické parametry nejsou ve světě vysokorychlostních kamer nijak výjimečné, zákazníci si však získávají snadnou obsluhu a rychlostní měření. Její displej umožňuje okamžité sledování děje a jeho upravování za pochodu, obsluhu bez CDU nebo připojeného počítače. Je vhodná k monitorování cyklických dějů a díky svým funkcím se může zaměřit pouze na část cyklu, který nakonec uživateli promítá.

**i-SPEED LT** je nejzákladnější verzí vysokorychlostní kamery, kterou Olympus poskytuje. Se snímací frekvencí 2000 fps rozhodně postačuje pouze k základním technickým měřením. Postrádá rozhraní Ethernet takže je nutné přenášení souborů z vnitřní paměti do počítače realizovat pomocí Flash karet. Tato procedura je ale poněkud zdlouhavá.

**i-SPEED 2** je k dispozici jako většina kamer Olympus ve dvou verzích, s barevným snímačem nebo s monochromatickým snímačem. Je vystavěna na podobných součástech jako i-SPEED LT s tím rozdílem, že disponuje rozhraním Ethernet, S-Video výstupem a její maximální snímací rychlost je více než 16x vyšší (samozejmestí je redukováni rozlišení při navyšování fps). Je deklarována odolnost proti otřesům o velikosti 100G.

Tab. 4.2.1.1 Technické specifikace kamer Olympus

Olympus	Cyclocam	i-SPEED LT	i-SPEED 2
Rozlišení senzoru	640px x 480 px	800px x 600px	800px x 600px
Max. FPS	10 000 fps	2 000 fps	33000 fps
Max. datový tok	0,3 Gpx/s	0,44 Gpx/s	0,44 Gpx/s
Barevná hloubka	8 bit	8 bit	8 bit
Vnitřní paměť	1,2,4 GB	1,2,4 GB	2,4 GB
Další možné úložiště	-	Compact flash karta Type II (1 GB)	Compact flash karta Type II (1,2 GB)
Baterie	Li-on se zabudovaným nabíjecím okruhem	Externí	Externí



**i-SPEED TR** je kamera vybavená již senzorem s vyšším rozlišením 1280x1024 pixelů a 10 bitovou hloubkou. Za plného rozlišení je schopna snímat, stejně jako ostatní kamery firmy Olympus vybavené tímto snímačem, rychlostí 2000 fps. Vysoký potenciál tohoto snímače však není u tohoto typu využit. V základní verzi je kamera vybavena vnitřní RAM pamětí 4GB s možností rozšíření až na 16GB. Důležitou součástí je také baterie umožňující 45 minutové nahrávání bez připojení kamery k elektrické síti. Samozřejmostí je potom gigabitový Ethernet.

**i-SPEED 3** je podobně jako TR založena na 10 bitovém snímači o rozlišení 1280x1024 pixelu. V čem se však liší je maximální snímková frekvence která dosahuje 150000 fps při rozlišení 96x72 pixelů. Kapacita základní vnitřní RAM paměti činí 4GB. Při nastavení výše uvedených parametrů poskytne vnitřní paměť přibližně 8 vteřin záznamu. Při nastavení vyššího rozlišení se datový tok zvyšuje natolik, že je kamera schopna pojmout pouze vteřinové videosekvence.

Tab. 4.2.1.2 Technické specifikace kamer Olympus (2. část)

Olympus	i-SPEED TR	i-SPEED 3
Rozlišení senzoru	1280px x 1024px	1280px x 1024px
Max. FPS	10000 fps	150000 fps
Max. datový tok	2,44 Gpx/s	2,44 Gpx/s
Barevná hloubka	10 bit	10 bit
Vnitřní paměť	4,8,16 GB	4,8,16 GB
Další možné úložiště	Compact flash karty Type I and II(1-16 GB)	Compact flash karty Type I and II(1-16 GB)
Baterie	Li-on až 45 min nahrávání	Li-on až 45 min nahrávání

**i-SPEED FS** je nejrychlejším zástupcem Olympusu. Kamera umí pořizovat až 1 000 000 snímků za sekundu a díky Global shutteru 0,2  $\mu$ s dokáže rozmazaný pohyb ještě více doostřit. Tyto vlastnosti ji předurčují k pořizování detailních záznamů při balistických testech. Celohliníkové tělo kamery váží společně s baterií 5kg a je nárazu a ořesu vzdorné až do hodnot 100G. Stejně jako i-SPEED 3 a TR disponuje gigabitovým rozhraním Ethernet a slotem na Compact flash karty.

**i-SPEED PL** se nabízí pouze ve variantě s barevným snímačem. Zaměřuje se na kreativní činnost a pořizování efektních záběrů, použitelných v dokumentech, reklamách nebo hudebních videích. Vyznačují se snadným intuitivním ovládním, vysokou mobilitou díky vestavěné baterii a kvalitními obrazy. Také příslušenství této kamery je orientováno především pro použití kameramanem, na rozdíl od kamer určených pro průmysl, které se upevňují na stativ. [6, 9]

Tab. 4.2.1.2 Technické specifikace kamer Olympus (3. část)

Olympus	i-SPEED FS	i-SPEED PL
Rozlišení senzoru	1280px x 1024px	1280px x 1024px
Max. FPS	1000000 fps	5000 fps
Max. datový tok	2,55 Gpx/s	1,8 Gpx/s
Barevná hloubka	10 bit	10 bit
Vnitřní paměť	4,8,16 GB	8,16 GB
Další možné úložiště	Compact flash karty Type I and II(1-16 GB)	Compact flash karty Type I and II(1-16 GB)
Baterie	Li-on až 45 min nahrávání	Li-on až 45 min nahrávání



## 4.3. Photron

### 4.3.1. „Vícehlavicové“ kamerové systémy

Firma Photron v této kamerové třídě nabízí dva kamerové systémy. Fastcam MC2 a Fastcam MH4 10k. Kamery jsou vybaveny CMOS senzorem s Bayerovou maskou o rozlišení 512x512 při němž dosahují rychlosti snímání 2000 fps. Při redukovaném rozlišení jsou však schopny zobrazit až 10000 snímků za sekundu. Jsou vyráběny s barevným i monochromatickým snímačem s 8 bitovou barevnou hloubkou.

#### Fastcam MC2

Hlavním rysem kamery je dvojice kamerových hlav, připojených k procesoru 7 metrovým kabelem. Díky rozměrům hlav 35x35x33,3 mm pro Cube cam a 23x23,2x77,1 mm pro Pencil cam je přístup do nepřístupných prostor snadnější.



Obr. 4.3.1.1 Kamerový systém Fastcam MC2[30]

Obr. 4.3.1.2 Různé typy hlavic

#### Fastcam MH4 10k

Systém MH4 10k disponuje 4mi připojitelnými kamerovými hlavicemi o velikosti 35x35x34mm, jejichž nespornou výhodou je jejich aplikování v nepřístupných prostorech. Odolnost vůči otřesům až 100G, po dobu 5ms ve všech osách, uplatnění kamery jenom rozšiřuje. Jelikož vstupy do procesoru jsou ze čtyř kamer, jsou k dispozici také 4 vnitřní paměti, konkrétně o velikostech 1 a 2GB (celkem 4x1GB nebo 4x2GB).



Obr. 4.3.1.3 Fastcam MH4 10k

Tab. 4.3.1.1 Technické specifikace vícehlavicových kamer Photron

Photron	Fastcam MC2	Fastcam MH4 10k
Rozlišení senzoru	512x512	512x512
Max. FPS	10000	10000
Max. datový tok	0,5 Gpx/s	0,5 Gpx/s
Barevná hloubka	8 bit	8 bit
Vnitřní paměť	1, 2, 4 GB	4x1 GB, 4x2 GB
Baterie	-	Vestavěná baterie s výdrží až 1h

## 4.3.2. Kamery třídy Fastcam SA

### Fastcam SA1

Je vystavena na megabajtovém snímači CMOS s velmi vysokou citlivostí na světlo. V kombinaci citlivosti s rychlostí snímání přesahující 600 000 fps a 12 bitovou barevnou hloubkou, jak u barevného tak u monochromatického snímače, dokáže tato kamera vytvářet velice kvalitní obraz při téměř jakémkoliv měření. Mezi další výhody tohoto modelu patří rozhraní SDI, umožňující velmi rychlý přenos nekomprimovaných dat. Ovládání kamery je řešeno pomocí připojeného počítače přes gigabitový Ethernet a nebo pomocí dálkového ovládače RS-422 s 5“ displejem. K dispozici je také verze této kamery s označením Fastcam SA1 RV určená pro práci v prašném nebo vlhkém prostředí.

### Fastcam SA2

Tato kamera je vybavena CMOS senzorem s schopným pořizovat Full HD videozáznam až do rychlosti 2000 fps. Pixely snímače o stranách velikosti 10μm jsou více než vhodné pro mikroanalýzu v odvětvích jako je PIV a DIC. Stejně jako SA1 je zde možnost ovládání pomocí počítače a nebo dálkového ovládacího RS-422.

### Fastcam SA3

Tato kamera je k dispozici ve dvou modelech, maximální snímkovací frekvence 60k fps a nebo 120k fps. Oba tyto modely jsou vhodné do prostředí s přetížením vysokým až 100G. Zvláštností této kamery je možnost přepnout z 12 bitové barevné hloubky na hloubku 8 bitovou. Kamera je vybavena pouze pamětí o maximální velikosti 8 GB, proto zredukování objemu dat, které musí kamera uložit, je správnou cestou k prodloužení doby záznamu. Na přání zákazníka může být kamera vybavena také záložní baterií. Díky této baterii pak zůstanou již pořízené data uchovány i při ztrátě napájení až 1 a půl hodiny.

Tab. 4.3.2.1 Technické specifikace kamer Photron třídy SA

Photron	Fastcam SA1	Fastcam SA2	Fastcam SA3
Rozlišení senzoru	1024px x 1024px	2048px x 2048px	1024px x 1024px
Max. FPS	675000 fps	86000 fps	120000 fps
Max. datový tok	5,3 Gpx/s	4,2 Gpx/s	1,95 Gpx/s
Barevná hloubka	12 bit	12 bit	12bit (8 bit)
Vnitřní paměť	8, 16, 32 GB	8, 16, 32 GB	2, 4, 8 GB
Baterie	-	-	Volitelná záložní baterie

### Fastcam SA4 a Fastcam SA5

Tyto kamery jsou založeny na megapixelovém senzoru s 12 bitovou barevnou hloubkou. Díky velkým pixelům (strana 20 μm) je citlivost těchto kamer na světlo poměrně vysoká. Podle normy ISO 12232 S sat je citlivost monochromatického senzoru až 10 000, u barevného snímače 4000. Výstup SDI patří u těchto kamer k základu stejně jako gigabitový Ethernet nebo možnost ovládání dálkovým ovladačem. Fastcam 5 je dokonce nabízen ve dvou variantách. Rychlejší z nich dosahuje až 1 000 000 snímků za sekundu a Global shutteru 0,369 μs.

### Fastcam SA6

Je další kamerou pracující s Full HD obrazem. Je dokonce vybavena modernějším výstupem HD SDI (1,485 Gbit/s) umožňující rychlejší Real Time zobrazování, nahrávání a přehrávání HD videa. [0]

Tab. 4.3.2.2 Technické specifikace kamer Photron třídy SA (2. část)

Photron	Fastcam SA4	Fastcam SA5	Fastcam SA6
Rozlišení senzoru	1024px x 1024px	1024px x 1024px	1920px x 1440px
Max. FPS	500 000 fps	775 000 fps	75 000 fps
Max. datový tok	3,5 Gpx/s	6,5 Gpx/s	2,9 Gpx/s
Barevná hloubka	12 bit	12 bit	12 bit
Vnitřní paměť	8, 16, 32 GB	8, 16, 32 GB	8, 16, 32 GB
Baterie	-	-	-

### Fastcam SA7 a Fastcam SA8

Tyto kamery patří se svými 30 000 fps spíše k základnějším verzím. Zapouzdřené tělo kamery umožňuje provoz v prašných a nebo jinak znečištěných místech. Kamery jsou k dispozici ve dvou rychlostních verzích 15k a 30k fps. SA8 je navíc vybavena baterií. Tato baterie není plnohodnotným nahrazením zdroje. Slouží především k zálohování naměřených dat v případě výpadku proudu. Vzhledem k povaze paměti RAM by jinak byly data ztraceny. Paměť 8 GB je dostatečně velká pro záznam formátu 320x256 pixelů při rychlosti 30 000 fps o délce 4,66 vteřiny.

### Fastcam SA-X a Fastcam SA-X2

Tyto kamery disponují vysoce citlivými snímači s citlivostí až 25 000 ISO pro monochromatický snímač. Snímání vysokou rychlostí se zapojením shutteru si vyžaduje obzvlášť vysokou citlivost snímače a nebo výkonnější přisvětlení. Množství světla dopadajícího na senzor totiž klesá v závislosti právě na rychlosti závěrky kamery. Dále disponují Dual gigabit Ethernetem a kamera SA-X2 ještě navíc dvěma sloty pro SD karty. Verzi se zapečetěnou elektronikou proti prachu a jiným nečistotám nabízí také jen SA-X2.

Tab. 4.3.2.2 Technické specifikace kamer Photron třídy SA (2. část)

Photron	Fastcam SA7	Fastcam SA8	Fastcam SA-X	Fastcam SA-X2
Rozlišení senzoru	1280px x 1024px	1280px x 1024px	1024px x 1024px	1024px x 1024px
Max. FPS	30 000 fps	30 000 fps	260 000 fps	1 000 000 fps
Max. datový tok	4,3 Gpx/s	4,3 Gpx/s	12,2 Gpx/s	13,2 Gpx/s
Barevná hloubka	12 bit	12 bit	12 bit	12 bit (8 bit)
Vnitřní paměť	4, 8 GB	4, 8 GB	8, 16, 32, 64 GB	8, 16, 32, 64 GB
Baterie	-	Volitelná záložní baterie	-	-

### 4.3.3. Fastcam IS-1M (CCD)

Je jedinou kamerou v této práci využívající CCD senzor. Díky technologii ISIS (in-situ image storage), kdy je přímo do snímače zabudována část výpočetní techniky kamery, dokáže snímat extrémně rychlé děje až do 1 000 000 fps za relativně vysokého rozlišení 312x260 pixelů. CCD senzor neumožňuje redukování rozlišení a tím i další navýšení rychlosti. Tato monochromatická kamera je ovládána přes USB 2.0 a využití najde především při snímání rychlostí vyšší jak 200 000 fps. U nižších rychlostí se zpravidla využívají CMOS kamery disponující vyšším rozlišením. [22]



Obr. 4.3.3.1 Fastcam IS-1M



## 4.4. Vision Research

### 4.4.1. Phantom Miro eX série

Tyto kompaktní přístroje se podobají spíše fotoaparátu nežli vysokorychlostní kameře. Díky dotykovému displeji je ovládání takové kamery jednoduché a rychlé. Integrovaná baterie zas umožňuje volný pohyb bez kabelů. Uchování záznamu je realizováno Compact Flash Type I kartami jako kamery firmy Olympus. Stažení dat do počítače pomocí 10/100 Ethernetu je však rychlejší. [2]



Tab. 4.4.1.1 Technická specifikace Miro eX série Obr. 12354 Phantom Miro eX4

Miro eX série	Phantom Miro eX2	Phantom Miro eX4
Rozlišení senzoru	640px x 480px	800px x 600px
Max. FPS	105 000 fps	111 000 fps
Max. datový tok	0,36 Gps/s	0,54 Gps/s
Barevná hloubka	10 bit (8 bit)	12 bit(10, 8 bit)
Vnitřní paměť	2,4 GB	2,4 GB
Baterie	vyměnitelná baterie Li-on (30 min)	vyměnitelná baterie Li-on (30 min)

### 4.4.2. Phantom ir300

Tato speciální kamera je založena na senzoru CMOS. Její senzor umožňuje zaznamenávat světelné spektrum až do vlnových délek 1100 nm. Tyto délky odpovídají infračervenému světlu (ir=InfraRed). Není ale termokamerou. Využívá se především k monitorování nočního života zvířat, spalování ve spalovacích motorech a aplikacích osvětlených infra záření. Při pořizování záznamů za normálního viditelného osvětlení za ostatními kamerami nezaostává. [2]

Tab. 4.4.2.1 Technická specifikace Phantom ir300

	Phantom ir 300
Rozlišení senzoru	800px x 600px
Max. FPS	190 000 fps
Max. datový tok	3 Gps/s
Barevná hloubka	14 bit
Vnitřní paměť	8, 16 GB
Baterie	-

### 4.4.3. Phantom v- série

Počátky této série se datují do roku 1993, kdy byla představena kamera Phantom v2.0. Roku 1999 to byla právě kamera z v-série, u které byla poprvé použita CMOS technologie jako náhrada kamer filmových. V dnešní době se tyto kamery stále drží v popředí mezi nejvýkonějšími přístroji na trhu. Disponují širokoúhlým provedením senzoru pro delší zachycení vertikálně se pohybujících předmětů. Disponují také funkcí spouštění nahrávání nadefinovaným pohybem. Samozřejmostí pro tuto třídu jsou dva HD-SDI porty. Všechny kamery podporují přepínání mezi dvěma barevnými hloubkami. Většina modelů je také vybavena dvěma DC vstupy.[2]

Tab. 4.4.3.1 Technická specifikace vybraných typů kamer Phantom v- série

v- série	Phantom v211	Phantom v311	Phantom v411	Phantom v711
Rozlišení senzoru	1280px x 800px	1280px x 800px	1280px x 800px	1280px x 800px
Max. FPS	300 000 fps	500 000 fps	600 000 fps	1 400 000 fps
Max. datový tok	2 Gpx/s	3 Gpx/s	4 Gpx/s	7Gpx/s
Barevná hloubka	12 bit (8 bit)	12 bit (8bit)	12 bit (8 bit)	12bit (8 bit)
Vnitřní paměť	8, 16, 32 GB	8, 16, 32 GB	8, 16, 32 GB	8, 16, 32 GB
Baterie	-	2x DC vstup	2x DC vstup	2x DC vstup

### 4.4.4. Phantom v1210/v1610

Tyto kamery patří k nejrychlejším kamerám na světě. Data, které musí zpracovávat jsou obrovské. Jako všechny novější modely podporují připojení k zařízení Cinemag (externí úložiště o velikostech až 512GB). K urychlení práce s daty jsou kamery vybaveny 10Megabitovým rozhraním Ethernet. Kamery jsou dostupné jak s barevným tak s monochromatickým snímačem. 4096 odstínů šedi u monochromatického snímáče zaručí věrné zachycení obrazu. Monochromatický snímáček je také extrémně citlivý na světlo, podle normy ISO 12232 až 43 700 T. Není tudíž tak závislý na přisvětlení jako barevný senzor s citlivostí 3900 T. [2]

Tab. 4.4.4.1 Technická specifikace kamer Phantom v1210/v1610

	Phantom v1210	Phantom v1610
Rozlišení senzoru	1280px x 800px	1280px x 800px
Max. FPS *	820 000 fps	1 000 000 fps
Max. datový tok	12 Gpx/s	16 Gpx/s
Barevná hloubka	12 bit	12 bit
Vnitřní paměť	24, 48, 96 GB	24, 48, 96 GB
Baterie	-	-

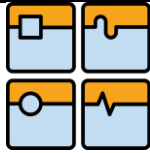
#### 4.4.5. Phantom Miro M/LC série

Phantom Miro M jsou kompaktní kamery ovladatelné pomocí dálkového ovladače nebo počítače. Kamery Miro LC jsou navíc vybaveny výklopným dotykovým displejem. Miro 110 a 310 jsou vybaveny megapixelovým senzorem a Miro 120 a 320 senzorem dvoumegapixelovým. Všechny modely se vyrábí se třemi paměťovými konfiguracemi: 3, 6, 12 GB, které mohou být rozděleny až do 16 segmentů. Tyto segmenty slouží k uchování předchozích měření bez nutnosti okamžitého přehrání na jiné úložiště. Každá kamera z této třídy je navíc kompatibilní s tzv. CineFlash vyjímatelným úložištěm. Za pomoci CineFlash adaptéru připojeného k počítači lze potom okamžitě prohlížet nasnímaný děj. CineFlash se dodává s kapacitou 60, 120 nebo 240 GB. [2]

Tab. 4.4.5.1 Technická specifikace kamer série Miro M/LC

Miro M/LC série	Miro 110	Miro 310	Miro 120	Miro 320S
Rozlišení senzoru	1024px x 1024px	1024px x 1024px	1920px x 1200 px	1920px x 1200 px
Max. FPS	400 000 fps	650 000 fps	250 000 fps	325 000 fps*
Max. datový tok	1,6 Gpx/s	3,2 Gpx/s	1,6 Gpx/s	3,2 Gpx/s
Barevná hloubka	12 bit	12 bit	12 bit	12 bit
Vnitřní paměť	3, 6, 12 GB	3, 6, 12 GB	3, 6, 12 GB	3, 6, 12 GB
Baterie	dobíjecí baterie Sony	dobíjecí baterie Sony	dobíjecí baterie Sony	dobíjecí baterie Sony

\*rychlost odpovídá monochromatickému snímači



## 5. Měření pomocí kamery Olympus i-Speed 2

Cílem bylo zaznamenat činnost vrtačky při vrtání do materiálu a získané informace vyhodnotit. Měření bylo prováděno v hale s osvětlením realizovaným klasickými zářivkami. Takové osvětlení je však pro vysokorychlostní snímání nevhodující. Proto byla použita dvojice přídavných halogenových světlometů.

Radiální vrtačka MAS VR4, na které bylo měření realizováno, je starší stroj vyrobený v 60. letech. S výkonem hlavního elektromotoru 5,15kW je určena především k vrtání a obrábění děr do průměru 50mm.

Vrtáním do materiálu se rotační pohyb vrtáku zpomaluje v závislosti na odporu materiálu proti obrábění. Čím větší je posuv nástroje do materiálu, tím větší je i kladený odpor. Mělo by tedy docházet ke zpomalování rotace vrtáku. Předmětem zkoumání je tedy závislost otáček vrtáku při obrábění na posuvu.

### **Radiální vrtačka MAS VR4:**

Rozměry: 2250x1055x2970 mm (délka x šířka x výška)

Hmotnost stroje: 2700 kg

Výkon: 5.15 kW

Maximální otáčky: 2000 ot/min

Kužel vřetena: Morse 4

Maximální průměr vrtání: 50 mm

Max. svislé přestavení ramene: 750 mm

Max. pohyb vřeteníku po rameni: 945 mm [34]



Obr. 5.1 Ilustrační obrázek vrtačky MAS VR4



## 5.1. Příprava měření

Měření bylo prováděno pomocí monochromatické kamery Olympus i-Speed 2 a jejího příslušenství (CDU jednotka, objektiv).



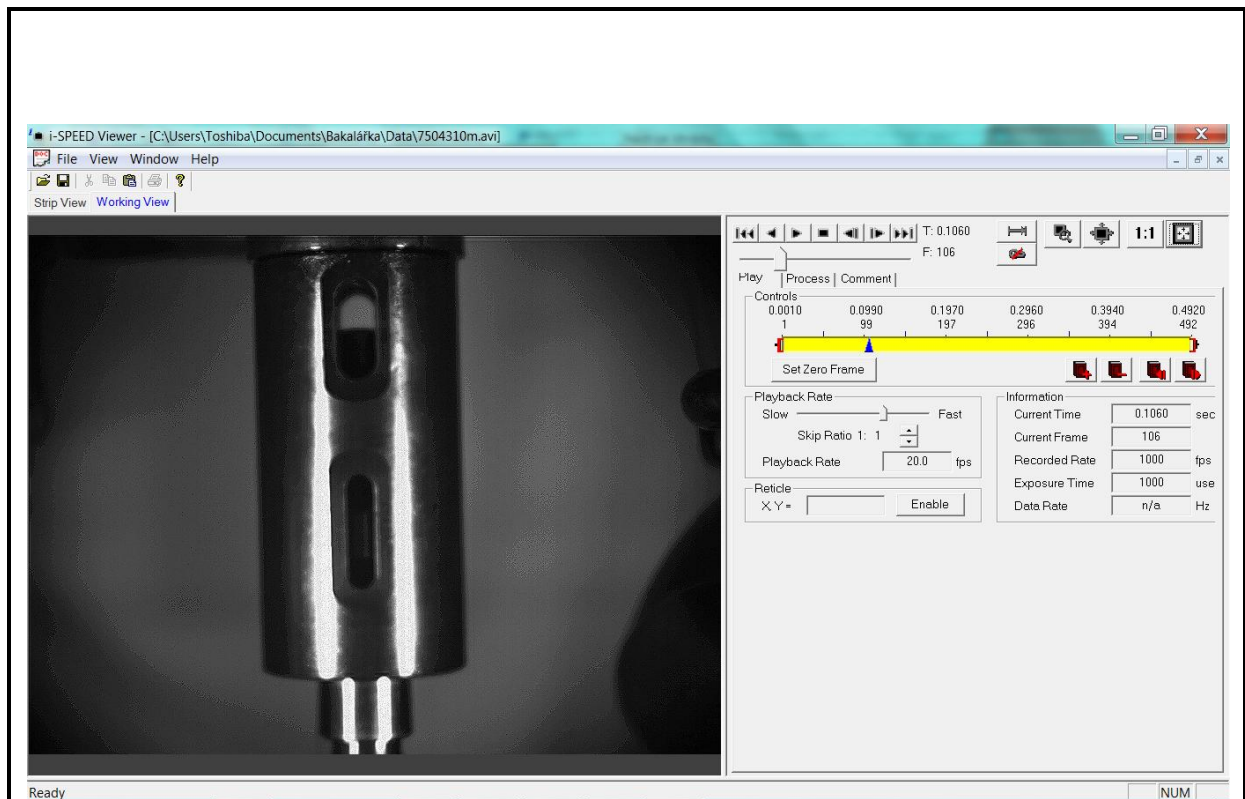
*Obr. 5.1.1 Olympus i-SPEED2 s příslušenstvím*

Kamera byla upevněna na stativ, připojena k jednotce CDU a ustavena do nejpříhodnější polohy k vrtačce. Přisvětlení scény bylo realizováno pomocí dvou halogenových svítidel po stranách kamery o výkonu 2x500 W. Do kamery byla zasunuta flash karta sloužící jako transportní záznamové médium mezi kamerou a počítačem. Záznam byl při přehrávání na kartu komprimován do formátu AVI.

Spuštění kamery je u této kamery realizováno přivedením napájecího kabelu. Po spuštění kamery následovalo nastavení parametrů snímání a vyladění obrazu zaostřením a upravením clonového čísla objektivu.

### Nastavené parametry snímání:

- |                         |            |
|-------------------------|------------|
| - Snímkovací frekvence: | 1000 fps   |
| - Rozlišení:            | 800x600 px |
| - Ohnisková vzdálenost: | 30 mm      |
| - Clonové číslo:        | 1,8        |



Obr. 5.1.2 Snímek z měření ve vyhodnocovacím softwaru

## 5.2. Měření

### 5.2.1. Sekvence měření č. 1:

-zjištění, zda se uvedené hodnoty otáček stroje shodují s reálnými (chod naprázdno)

**Postup:** Stroj jsme uvedli do chodu při různých otáčkách, konkrétně při 90, 125, 180 a 250 ot/min a z každého chodu jsme pořídili videozáznam. Následným zkoumáním videozáznamů ve vyhodnocovacím softwaru i-SPEED Viewer společnosti Olympus je možné odečíst dobu trvání jedné otáčky a odtud i počet otáček za minutu.

**Výsledky:**

Tab. 5.2.1.1 Tabulka hodnot pro nulový posuv

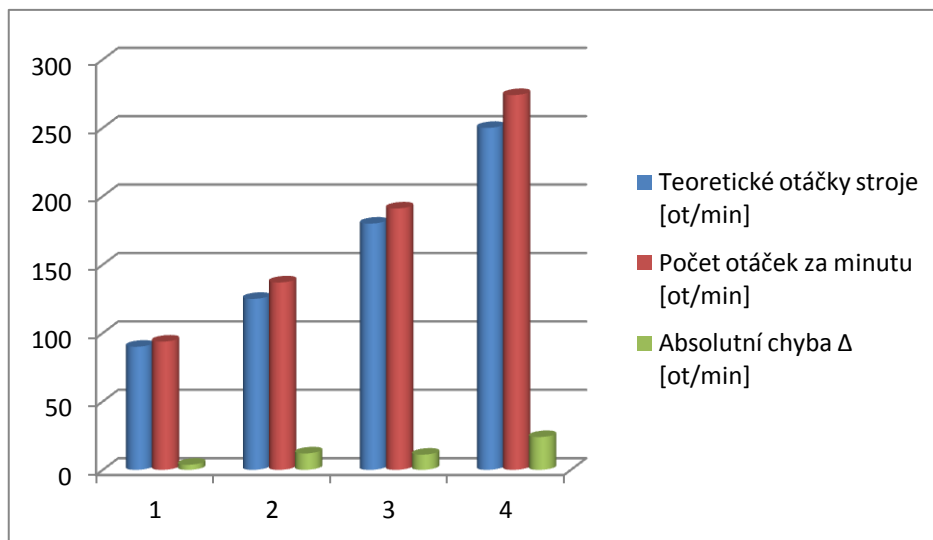
**Tabulka hodnot pro nulový posuv**

Teoretické otáčky stroje	Doba trvání jedné otáčky [s]	Počet otáček za minutu [ot/min]	Absolutní chyba $\Delta$ [ot/min]	Relativní chyba $\delta$ [%]
90 ot/min	0,64	93,75	3,75	4,00
125 ot/min	0,438	136,99	11,99	8,75
180 ot/min	0,314	191,08	11,08	5,80
250 ot/min	0,219	273,97	23,97	8,75

,kde  $\Delta$  je rozdíl hodnot skutečných otáček a otáček

deklarovaných stupnicí na stroji

a  $\delta$  je procentuálním vyjádřením podílu  $\Delta$  ku skutečnému počtu otáček.

Obr. 5.2.1.1 Grafické znázornění absolutní chyby  $\Delta$ 

Vrtačka a její deklarované rychlosti rozhodně neodpovídají skutečné hodnotě rychlostí (Obr. 5.2.2.1). Absolutní chyba  $\Delta$  je v pozdějším srovnání brána v potaz.

### 5.2.2. Sekvence měření č. 2:

-zkoumání změny, která by u otáček měla nastat, jestliže vrtačka začne obrábět.

**Postup:** Provedlo se opětovné měření při teoretických rychlostech stroje 90, 125, 180 a 250 ot/min, tentokrát však již při obrábění. Obráběným materiálem byla kostka z duralu.

První hodnota nastaveného posuvu byla 0,063 mm na otáčku. Tuto hodnotu, uváděnou štítkem na stroji, beru jako přesnou, protože jsme nebyli schopni její pravost ověřit.

Hodnota posuvu, u níž jsme jako u druhé v pořadí testovali závislost otáček stroje při obrábění, nabývala hodnotu 0,16 mm na otáčku. Při této hodnotě se již dá očekávat větší rozdíl  $\Delta 2$  mezi chodem na prázdno a při obrábění.

#### Výsledky:

Tab. 5.2.2.1 Tabulka hodnot pro posuv 0,063 mm

Tabulka hodnot pro posuv 0,063 mm

Teoretické otáčky stroje	Doba trvání jedné otáčky [s]	Počet otáček za minutu [ot/min]	Absolutní chyba $\Delta$ [ot/min]	Relativní chyba $\delta$ [%]
90 ot/min	0,641	93,60	3,60	3,85
125 ot/min	0,6417	93,50	-31,50	-33,69
180 ot/min	0,3166	189,51	9,51	5,02
250 ot/min	0,222	270,27	20,27	7,50

,kde  $\Delta 1$  je rozdíl skutečných otáček při volnoběhu a otáček při obrábění s posuvem 0,063 mm.

a  $\delta 1$  je procentuálním vyjádřením podílu  $\Delta 1$  a skutečných otáček naměřených při obrábění s posuvem 0,063 mm.



Tab. 5.2.2.2 Tabulka hodnot pro posuv 0,16 mm

## Tabulka hodnot pro posuv 0,16 mm

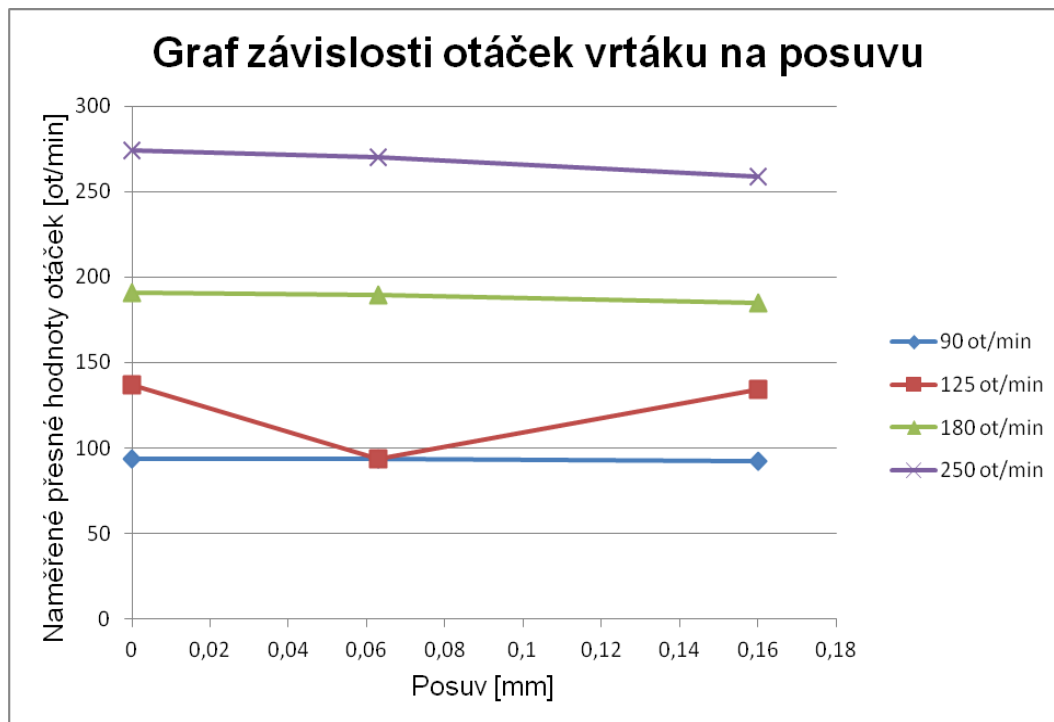
Teoretické otáčky stroje [ot/min]	Doba trvání jedné otáčky [s]	Počet otáček za minutu [ot/min]	Absolutní chyba $\Delta 2$ [ot/min]	Relativní chyba $\delta 2$ [%]
90	0,6486	92,51	2,51	2,71
125	0,4463	134,44	9,44	7,02
180	0,325	184,62	4,62	2,50
250	0,232	258,62	8,62	3,33

,kde  $\Delta 2$  je rozdíl skutečných otáček bez obrábění a otáček při obrábění s posuvem 0,16 mm.

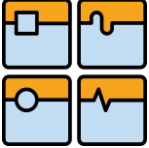
a  $\delta 2$  je procentuálním vyjádřením podílu  $\Delta 2$  a skutečných otáček naměřených při obrábění s posuvem 0,016 mm.

### 5.3. Vyhodnocení

Z grafu (Obr. 5.3.1) je patrné, že bylo provedeno jedno chybné měření, kterému by neměla být připisována větší důležitost. Chyba měření vznikla pravděpodobně nesprávným zařazením rychlosti stroje. Byly proto naměřeny tytéž hodnoty jako u předchozího měření.




Obr. 5.3.1 Graf závislosti otáček na posuvu

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 41
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Za předpokladu, že tuto chybu ignorujeme, můžeme dojít k závěru, že se při zvětšujícím posuvu vrtáku do materiálu snižuje rychlost otáčení vrtáku. Při dalším zvyšování rychlosti posuvu by mohlo dojít k tzv. „kousnutí“ vrtáku a poškození stroje.

Dále je možné si všimnout, že k výraznějšímu zpomalování dochází převážně při vyšších rychlostech. Můžeme tedy předpokládat vyšší riziko „kousnutí“ právě zde. Toto tvrzení by ale mělo být potvrzeno ještě dalším měřením.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 42
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	


## 6. Závěr

---

Cílem této práce bylo seznámit čtenáře s problematikou vysokorychlostních kamer. Provedl jsem stručné nastínění fungování kamery, pořizování záznamu a vysvětlil některé pojmy s touto problematikou spojené. V závislosti na těchto pojmech jsem poté vytvořil literární rešerši dostupných vysokorychlostních kamer na zahraničním trhu a provedl základní srovnání jejich parametrů. Tyto parametry, získané především z elektronických datasheetů firem, jsou však jen zběžným ukazatelem kvality. Problematika srovnání kamer nebo kamerových systémů by měla pracovat s reálnými kamerami a porovnávat pořízené záběry a funkčnost v „terénu“ při reálných měřeních. Vlastnosti a parametry kamer jsou také hodně ovlivněny jejich specializací.


Většina těchto vysokorychlostních kamer je pro běžného uživatele nebo firmu nedostupná. Nicméně existují společnosti, které některé kamerové systémy za poplatek zapůjčují.

V závěru práce, při měření kamerovým systémem i-SPEED 2, jsem realizoval jednoduché vysokorychlostní měření. Výsledky měření snad nastínili možnosti uplatnění takovýchto vysokorychlostních systémů v každodenním strojírenském a průmyslovém životě.

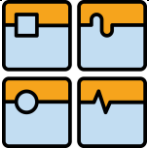
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 43
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

## 7. Použité informační zdroje:

- [0] AUTOR NEUVEDEN. Serial digital interface [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_digital\\_interface](http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_digital_interface)
- [1] AUTOR NEUVEDEN. PROXIS. Vysokorychlostní kamery [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.proxis.cz/?i=243/vysokorychlostni-kamery>
- [2] AUTOR NEUVEDEN. VISION RESEARCH. High speed cameras datasheets [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.visionresearch.com/Service--Support/Downloads/Documents/Camera-Specific-Downloads/>
- [3] AUTOR NEUVEDEN. <http://www.athousandandone.com> [online]. [cit. 19.3.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.athousandandone.com/photos/0/448b43589788d\\_s.jpg](http://www.athousandandone.com/photos/0/448b43589788d_s.jpg)
- [4] SVOBODA, Štěpán. Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek [online]. [cit. 19.3.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32518](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518)
- [5] High-speed photography. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/High-speed\\_photography](http://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_photography)
- [6] AUTOR NEUVEDEN. OLYMPUS CORPORATION. Vysokorychlostní kamery [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.olympus-ims.com/cs/hsv-products/>
- [7] ENDELMAN, Lincoln L. A BRIEF HISTORY OF HIGH SPEED PHOTOGRAPHY 1851-1930. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://people.rit.edu/andpph/text-hs-history.html>
- [8] Thomas Edison. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Edison](http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Edison)
- [9] Vysokorychlostní kamery: i-SPEED Specifications. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/cs/ispeed-specifications/>
- [10] William Fox Talbot. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/William\\_Fox\\_Talbot](http://cs.wikipedia.org/wiki/William_Fox_Talbot)
- [11] Harold Eugene Edgerton. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Harold\\_Eugene\\_Edgerton](http://cs.wikipedia.org/wiki/Harold_Eugene_Edgerton)
- [12] AUTOR NEUVEDEN. pl.wikipedia.org [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Kinetoscope.jpg>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 44
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE		

- [13]Edward Muybridge. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Eadweard\\_Muybridge](http://cs.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge)
- [14]AUTOR NEUVEDEN. cs.wikipedia.org [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:The\\_Horse\\_in\\_Motion.jpg](http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:The_Horse_in_Motion.jpg)
- [15]AUTOR NEUVEDEN. photographytips.net [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.photographytips.net/understanding-aperture-3/>
- [16]CCD, nebo CMOS - srovnání technologií. CCTV-Prodejce.cz [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.cctv-prodejce.cz/ccd-cmos-technologie>
- [17]BLANC, Nicolas. CCD vs CMOS - has CCD imaging come to an end?. [online]. 2001, s. 6 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Blanc.pdf>
- [18]AUTOR NEUVEDEN. Citlivost [online]. [cit. 22.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.skyfly.cz/pristroj/slovník/citlivost.htm>
- [19]RGB. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RGB>
- [20]ŠOFER, Michal. Clona - (ne)viditelný pomocník objektivů. [online]. 2010 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/clona-neviditelny-pomocnik-objektivu-clanekid695>
- [21]PIHAN, Roman. Vše o světle: Světlo a senzor digitálních fotoaparátů. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.zsudvora.cz/vyuka/info/kurz/k9.html>
- [22]Photron: High speed camera comparison [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.photron.com/?cmd=comparison>
- [23]Malý videokurz: Digitální videokamery a jejich funkce. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.videoproduce.cz/videokamery.htm>
- [24]KRČMÁŘ, Michal. Vrtačka radiální VR4. In: [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://stroje.bazos.cz/inzerat/24555238/vrtacka-radialni-VR-4.php>
- [25]Linkwitz Lab: Analog to digital conversion. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.linkwitzlab.com/dpp/A-D-conversion.htm>
- [26]RAM. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RAM>
- [27]Geometrie pevných disků. FAKULTA INFORMATIKY MASARYKOVI UNIVERZITY - VÝUKOVÝ PROGRAM. [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/usr/pelikan/ARCHIT/TEXTY/GEOMHD.HTML>
- [28]AUTOR NEUVEDEN. PhotoTV.cz [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.phototv.cz/webimg/editor/fotoslovník/Digitalni\\_data/Barevna\\_hloubka/barevn\\_hloubka\\_1.jpg](http://www.phototv.cz/webimg/editor/fotoslovník/Digitalni_data/Barevna_hloubka/barevn_hloubka_1.jpg)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 45
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

[29]PIHAN, Roman. Obrazový procesor. FotoRoman: Fotografie a fototechnika [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: [http://www.fotoroman.cz/glossary2/1\\_dsp.htm](http://www.fotoroman.cz/glossary2/1_dsp.htm)

[30]PHOTRON. *photron.cz* [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.photron.com/images/products/fastcam\\_mc2.jpg](http://www.photron.com/images/products/fastcam_mc2.jpg)

[31]PHOTRON. *photron.cz* [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.photron.com/images/products/fastcam\\_mc2\\_cam.jpg](http://www.photron.com/images/products/fastcam_mc2_cam.jpg)

[32]PHOTRON. *photron.cz* [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://www.photron.com/images/products/fastcam\\_mh4.jpg](http://www.photron.com/images/products/fastcam_mh4.jpg)