



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## VYUŽITÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ ZÁZNAMOVÉ TECHNIKY PRO SLEDOVÁNÍ ZMĚN V MAZACÍM FILMU.

USAGE OF A HIGH-SPEED CAMERA FOR A STUDY OF CHANGES OF A LUBRICATING FILM.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROMAN MUCHA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR SVOBODA

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Roman Mucha

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:

### **Využití vysokorychlostní záznamové techniky pro sledování změn v mazacím filmu.**

v anglickém jazyce:

### **Usage of a high-speed camera for a study of changes of a lubricating film.**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti využití vysokorychlostní záznamové techniky pro sledování změn v mazacím filmu, doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Definici základních pojmů.
2. Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti.
3. Analýzu a zhodnocení získaných poznatků.
4. Vymezení trendů budoucího vývoje.
5. Souhrnnou bibliografii.

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva.

Účel zadání: pro VaV a tvůrčí činnost ÚK

Typ BP: Rešeršní

Seznam odborné literatury:

Svoboda, P.: Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní barevnou kamerou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 30 s. Vedoucí pojednání ke státní závěrečné zkoušce: Doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

KŘUPKA, I.: Studium elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav. Brno, 2002, 120s., Habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

IDT - Integrated Design Tools, Inc. - High Speed Camera Terminology - manuál

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Svoboda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti využití vysokorychlostní záznamové techniky pro sledování změn v mazacím filmu. První část popisuje základní pojmy v oblasti vysokorychlostních kamer. Další část práce se zabývá historií vysokorychlostních kamer a jejich využitím v praxi včetně sledování změn v mazacím filmu. Na závěr je uvedeno zhodnocení současného stavu a směr dalšího vývoje.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vysokorychlostní kamera, tribologie

## **ABSTRACT**

The aim of Bachelor's thesis is to give an overview of the state of knowledge in the field of usage of a high-speed camera for a study of changes of a lubricating film. The first part describes the basic terms in the field of high-speed camera. The next part of thesis deals with the history of high-speed cameras and their use in an industry, including study of changes of a lubricating film. Finally, evaluation of current status and further development are included.

## **KEYWORDS**

High-speed camera, tribology

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MUCHA, R. *Využití vysokorychlostní záznamové techniky pro sledování změn v mazacím filmu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Svoboda.

---

---

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Svobody a uvedl v seznamu literaturu všechny použité zdroje.

V Brně dne 13. května 2009

.....  
Roman Mucha

---

---

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Petru Svobodovi za odborné vedení při tvorbě práce, věcné připomínky a cenné rady.

---

**OBSAH**

<b>OBSAH</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ</b>	<b>13</b>
1.1 Snímkový kmitočet	13
1.2 Barevná hloubka	13
1.3 Rozlišení	14
1.4 Expoziční doba	14
1.5 RoI	15
1.6 Obrazové snímače	15
1.7 Bayerův filtr	16
1.8 Příslušenství vysokorychlostních kamer	17
1.8.1 Osvětlení	17
1.8.2 Synchronizační zařízení	18
<b>2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI</b>	<b>19</b>
2.1 Historie vysokorychlostních kamer	19
2.2 Využití vysokorychlostních kamer v praxi	20
2.3 Sledování změn v mazacím filmu	21
2.3.1 Experimentální zařízení pro studium tenkých mazacích filmů	24
2.3.2 Série experimentů při nestacionárních provozních podmínkách	25
<b>3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ</b>	<b>26</b>
<b>4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE</b>	<b>27</b>
<b>5 ZÁVĚR</b>	<b>29</b>
<b>6 SOUHRNNÁ BIBLIOGRAFIE</b>	<b>30</b>
6.1 Seznam použitých zdrojů	30
6.2 Seznam použitých zkratk a symbolů	31
6.3 Seznam obrázků	32
6.4 Seznam tabulek	32

---

## ÚVOD

Svět kolem nás se pohybuje stále rychleji a samotné lidské oko často nestačí k zachycení sledovaného děje. V případě, že nepomůže ani standardní záznamové zařízení, je nezbytné použít jiný přístroj, který by to dokázal. Takovými přístroji jsou celosvětově stále více využívané vysokorychlostní kamery. Jsou používány hlavně jako diagnostický nástroj, který pomáhá inženýrům a vědcům analyzovat vysokorychlostní procesy. Vysokorychlostní kamery jsou tak určeny pro analýzy velmi krátkých nebo velmi rychlých, periodických či nahodilých dějů. Vysokorychlostní kamery nacházejí uplatnění ve stále více oblastech. Dá se říci, že prakticky v každém strojním oboru nalezne vysokorychlostní kamera vhodné využití.



## 1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

1

Pro seznámení s vysokorychlostními kamerami a pochopení jejich činnosti je třeba uvést základní termíny.

### 1.1 Snímkový kmitočet

1.1

Snímkový kmitočet, frekvence snímání, počet snímku za sekundu nebo rychlost kamery jsou všechno ekvivalentní termíny vztahující se k základní vlastnosti vysokorychlostního záznamu. Anglicky je tento termín nazýván *frames per second* nebo jen zkráceně *fps*. Snímkový kmitočet se stanovuje s ohledem na rychlost sledovaného předmětu a velikost sledované plochy, podle počtu snímků potřebných k popsání všech informací při konkrétní události a s ohledem na maximální snímkový kmitočet každé vysokorychlostní kamery.

Běžná kamera dosahuje snímkového kmitočtu 25 snímků za sekundu. Tato rychlost snímání je však pro většinu pohybových problémů vyskytujících se ve strojích a mechanismech příliš nízká. Mnoho dějů probíhá během např. 100 ms, tj. 1/10 sekundy. Standardní kamerou lze ovšem zaznamenat snímek jen každých 40 ms. Z události trvající 100 ms tedy standardní videokamera uživateli poskytne asi 2,5 snímku. S vysokorychlostní kamerou zaznamenávající 1 000 snímků za sekundu bude uživatel schopen získat 100 snímků téže události. Navíc při záznamu pohybu rychlostí 25 snímků za sekundu a jeho následném přehrávání desetkrát pomaleji lze pozorovat jen 2,5 snímku za sekundu. Výsledný obraz je velmi „trhavý“, a proto nevhodný k podrobné analýze. Vysoká frekvence snímání však vyžaduje zpracování obrovského množství dat. Například při dnes běžné snímkovací frekvenci 20 000 fps a rozlišení dílčích snímků obrazového záznamu 250 x 200 bodů je třeba uložit za sekundu 1GB dat.

Vyšší snímkový kmitočet však vede k nižšímu rozlišení a ke zmenšení sledované plochy. Tato skutečnost vyplývá z omezené rychlosti datových toků ze záznamových čipů na paměťové médium. Maximální frekvence snímání je teoreticky dána minimálním rozlišením a naopak.

### 1.2 Barevná hloubka

1.2

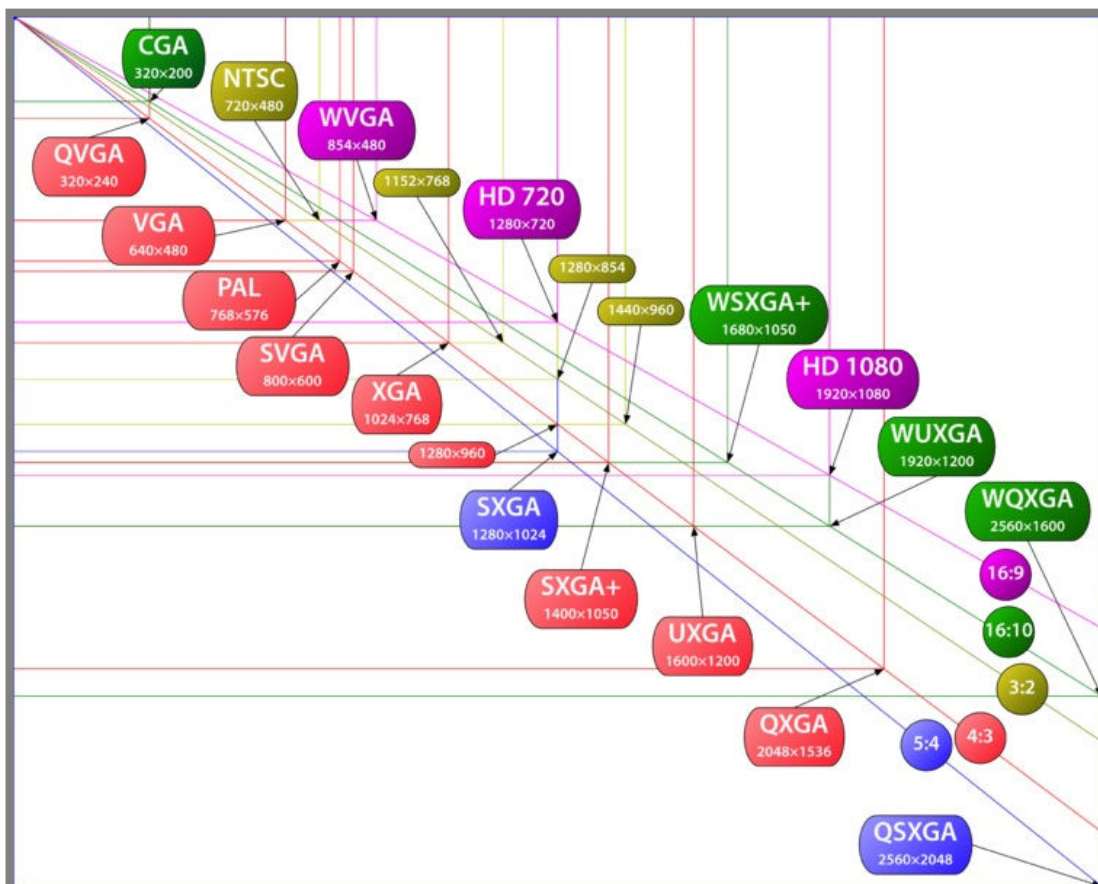
Termín barevná hloubka popisuje počet bitů použitých k popisu určité barvy nebo pixelu v digitálním obrazu nebo rámečku videa (Obr. 1-1). Větší barevná hloubka zvětšuje škálu různých barev a tím také paměťovou náročnost obrázku či videa.

1bitová barva ( $2^1 = 2$ barvy) také označováno jako Mono Color
4bitová barva ( $2^4 = 16$ barev)
8bitová barva ( $2^8 = 256$ barev)
15bitová barva ( $2^{15} = 32\,768$ barev) také označováno jako Low Color
16bitová barva ( $2^{16} = 65\,536$ barev) také označováno jako High Color
24bitová barva ( $2^{24} = 16\,777\,216$ barev) také označováno jako True Color
32bitová barva ( $2^{32} = 4\,294\,967\,296$ barev) také označováno jako Super True Color
48bitová barva ( $2^{48} = 281\,474\,976\,710\,656 = 281,5$ trilionů barev) Deep Color

Obr. 1-1 Nejčastěji používané barevné hloubky [1]

### 1.3 Rozlišení

Rozlišení vysokorychlostní kamery (Obr. 1-2) je vyjádřeno počtem pixelů v horizontální a vertikální rovině. Pixel je definován jako nejmenší obrazový prvek, který představuje jeden bod v barevném prostředí. Pixel nese číselnou informaci jak o barvě, tak i o jasu bodu. V současnosti se rozlišení vysokorychlostních kamer pohybuje v rozmezí 128x128 do přibližně 1600x1200 pixelů. Při vysokorychlostním záznamu často standardní rozměry rozlišení ustupují účelu a používají se tak jiné vhodné rozměry obrazu pro získání požadovaných informací.



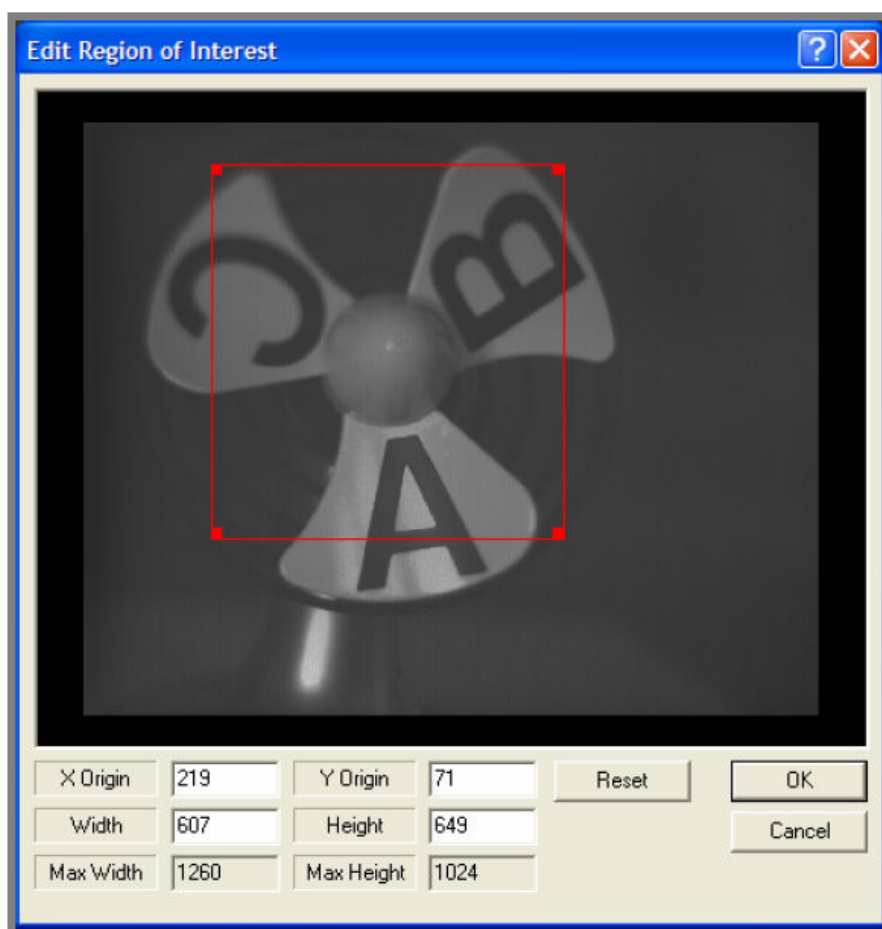
Obr. 1-2 Přehled nejběžnějších rozlišení [2]

### 1.4 Expoziční doba

Expoziční doba nebo také čas závěrky je doba, po kterou obrazový snímač shromažďuje dopadající světlo. Tato doba je určena rychlostí clony v kameře, pohybující se obvykle v setinách až tisícinách sekundy. Někdy je vhodné zkrátit expoziční dobu, aby se omezilo pohybové rozmazání obrazu a pohyb byl na jednotlivých snímcích zmrazený. Čas závěrky je udáván jako poměr převrácené hodnoty snímkového kmitočtu a doby otevření závěrky. Při nastavení závěrky x1 obrazový snímač zachycuje obraz po celou dobu odpovídající převrácené hodnotě snímkového kmitočtu. Například x10 znamená, že závěrka je otevřena, a tudíž snímek pořízen, za desetinu této doby.

## 1.5 RoI

Zkratka RoI znamená *Region of Interest*, což se dá přeložit jako oblast zájmu. Je to funkce vysokorychlostních kamer, která umožňuje zaměřit se pouze na tu část obrazu z celého rozsahu, který je obrazový snímač schopen zabrat. RoI má obdélníkový tvar a může být vybrán nastavením numerických hodnot pro počátek a rozměry nebo jednoduše tažením okna pomocí myši (Obr. 1-3). Tuto funkci poskytují CMOS senzory, které dokáží zaznamenat malé skupiny pixelů nebo i jednotlivé pixely zvlášť. RoI pomáhá lépe nastavit kameru po jejím položení na místo a vyhnout se tak přemísťování zařízení.

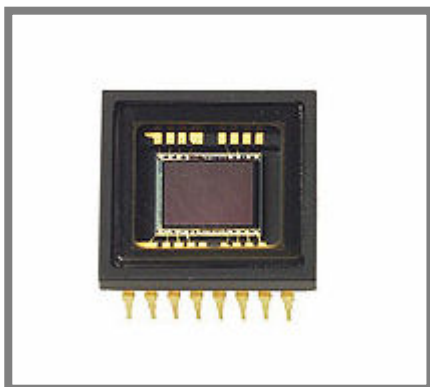


Obr. 1-3 Okno RoI Dialog [3]

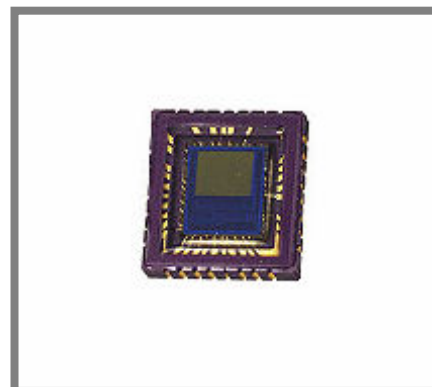
## 1.6 Obrazové snímáče

Obrazové snímáče představují klíčové součásti, které slouží jako digitální film kamery. Obrazový snímač kamery je odpovědný za převod světla do elektrických signálů. Při návrhu kamery lze vybírat ze dvou technologií obrazových snímačů:

- **CCD** - Charged Coupled Device (zařízení s vázanými náboji) (Obr. 1-4)
- **CMOS** - Complementary Metal Oxide Semiconductor (doplňující se kov-oxid-polovodič) (Obr. 1-5)



Obr. 1-4 CCD snímač – velikost 1/3 palce [4]



Obr. 1-5 CMOS snímač – velikost 1/4 palce [4]

### Technologie CCD snímače

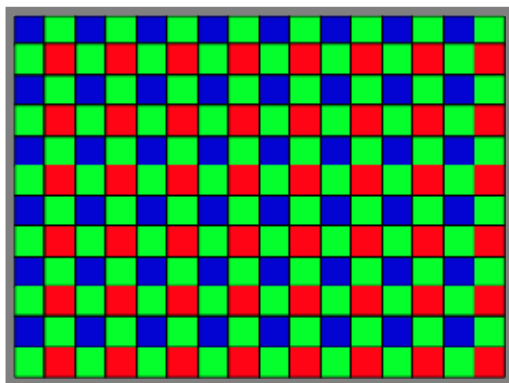
CCD snímače jsou používány už více než 20 let v běžných kamerách a mají oproti CMOS snímačům řadu výhod. Jedna z výhod je lepší světelná citlivost, což se projeví v lepší kvalitě obrazu při špatném osvětlení. Výroba CCD snímačů je relativně jednoduchá ale nákladná, protože se vyrábí nestandardním procesem a je složitější zabudovat je do kamery. Výstup informací z CCD čipu ještě není digitální, ale analogový a proto za CCD čipem musí následovat obvody pro digitalizaci obrazu (A/D převodník), což znamená vyšší odběr elektrické energie a zpomalení toku dat.

### Technologie CMOS snímače

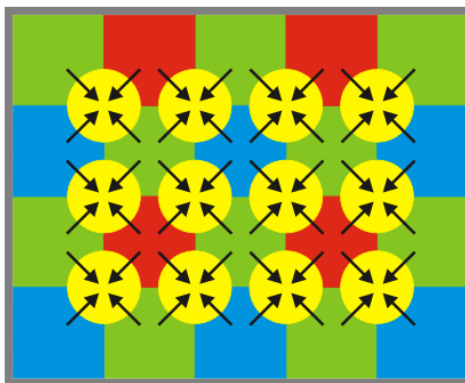
Technologie CMOS snímače zažila v posledních letech velký pokrok. Těmito snímači jsou osazeny všechny komerčně dostupné vysokorychlostní kamery. Výrobci senzorů CMOS využívají standardizované výrobní postupy, zcela totožné se způsobem, který je využíván při výrobě mikroprocesorů, takže jsou levnější než senzory CCD. Senzory CMOS se vyznačují nižší spotřebou energie a umožňují také vytvořit menší kamery, což se v dnešní době uplatňuje v mobilních telefonech. Špatná citlivost na světlo ještě stále představuje omezení pro jejich využití.

## 1.7 Bayerův filtr

Při použití jednoho snímače jsou na jeho jednotlivých pixelech naneseny barevné filtry. Nejrozšířenější typ barevného filtru snímačů je Bayerův filtr (Obr. 1-6). Snímá plošně tři základní barvy: červenou, modrou a zelenou. Počet zelených buněk je dvojnásobný oproti červeným a modrým z toho důvodu, že lidské oko je nejcitlivější na zelenou barvu. Obraz se ze snímače načte běžným způsobem a teprve v dalších obvodech se plnohodnotné barvy jednotlivých pixelů interpolují z nejbližších pixelů jednotlivých barev RGB (Obr. 1-7). Žlutá kolečka představují plnobarevné pixely výsledného obrázku a šipky naznačují, ze kterých buněk Bayerova filtru byly interpolovány.



Obr. 1-6 Bayerův filtr [5]



Obr. 1-7 Interpolace barev z Bayerova filtru [6]

## 1.8 Příslušenství vysokorychlostních kamer

1.8

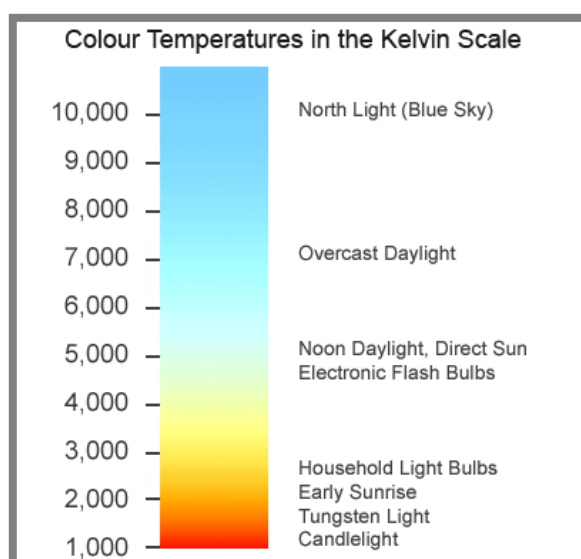
Vysokorychlostní kamery jsou navrženy tak, aby řešily většinu potíží s pořizováním vysokorychlostních videosekvencí. Existují však problémy, které vyžadují zvláštní doplňky jako je osvětlení a synchronizační zařízení.

### 1.8.1 Osvětlení

1.8.1

Správné osvětlení snímané scény má zásadní vliv na kvalitu obrazu, takže většina aplikací vysokorychlostního videozáznamu vyžaduje velmi výkonné osvětlení scény. Při použití současných kamer snímajících s frekvencí řádově v desítkách tisíc obrázků za sekundu může být i na přímém slunci na záznamu šero.

Nejčastější způsob umístění světla je za objektiv nebo přímo k objektivu. Další možnosti jsou umístit světlo ze strany pod zvoleným úhlem nebo u průsvitných materiálů zezadu. Běžně se používají halogenová (Obr. 1-11) nebo výbojková svítidla o příkonu několika kW. Některé aplikace vyžadují použití bílého světla, které jsou schopné poskytnout xenonové zdroje nebo LED osvětlení (Obr. 1-10). Tyto světelné zdroje se vyznačují vysokou barevnou teplotou až 6500K (Obr. 1-8).



Obr. 1-8 Barevná teplota charakterizuje spektrum bílého světla [7]



Obr. 1-9 Halogenové svítidlo DP Light 1000W [8]



Obr. 1-10 LED osvětlení IDT - 08 LED, 12 LED [9]

### 1.8.2 Synchronizační zařízení

Vzhledem k tomu, že vysokorychlostní kamerou se zaznamenávají velmi rychlé děje, není často možné manuálně spustit a ovládat ostatní zařízení jako osvětlení nebo další kameru. K tomu slouží synchronizační zařízení, které k synchronizaci využívá elektronické pulzy. Motion Pro Timing Hub (Obr. 1-11) poskytuje 8 nezávislých synchronizačních signálů. Každý výstup je možné načasovat individuálně.



Obr. 1-11 Synchronizační zařízení MotionPro Timing Hub [9]

## 2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI

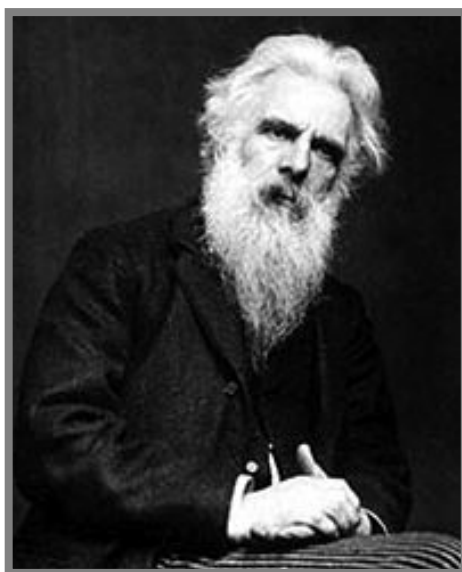
2

### 2.1 Historie vysokorychlostních kamer

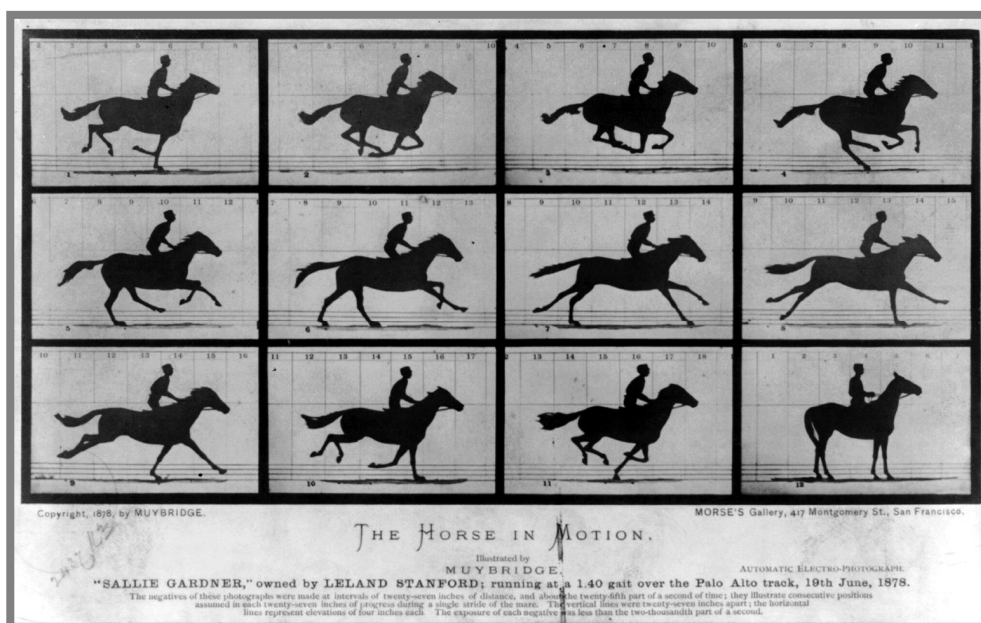
2.1

Vysokorychlostnímu videozáznamu předcházela vysokorychlostní fotografie. Roku 1948 společnost *Society of Motion Picture and Television Engineers* definovala vysokorychlostní fotografii jako sled fotografií zachycených kamerou schopnou nahrát minimálně 128 snímků za sekundu a aspoň tři po sobě jdoucích snímků.

První praktické využití vysokorychlostní fotografie však proběhlo již v roce 1878, kdy anglický fotograf Eadweard Muybridge (Obr. 2-1) zkoumal fáze koňského klusu (Obr. 2-2).



Obr. 2-1 Eadweard Muybridge [10]



Obr. 2-2 Vysokorychlostní fotografie od Eadwearda Muybridge [10]

Konstrukce i technologie vysokorychlostních kamer se nadále vyvíjela a vznikaly různé typy kamer, které byly schopné zaznamenat stále více snímků za sekundu. V 60. letech 20. století firma Redlake Laboratories představila vysokorychlostní kameru s rotujícím hnanem HYCAM (Obr. 2-3), která využívala standardní 16 mm film a dokázala zaznamenat 10000 snímků za sekundu. Vysokorychlostní kamery s rotujícím hnanem se s různými úpravami i širšími filmy používaly až do nástupu digitální technologie CCD v 80. letech. Další revoluci v oblasti vysokorychlostního záznamu způsobil nástup snímačů CMOS v 90. letech 20. století.



Obr. 2-3 Vysokorychlostní kamera HYCAM [11]

## 2.2 Využití vysokorychlostních kamer v praxi

Vysokorychlostní záznam v praxi často poskytuje chybějící pouto mezi zjištěním problému a jeho odstraněním. Výhodou digitálního záznamu je, že je kromě kvalitativní analýzy zobrazeného děje nebo jevu, umožňuje i analýzu kvantitativní, což je vyhodnocení s využitím aktuálních hodnot fyzikálních veličin. Díky tomu lze k jednotlivým obrázkům záznamu přiřadit reálný relativní čas, a porovnáním sousedních obrázků je tak možné stanovit vektory rychlosti a zrychlení pohybujících se prvků, rychlosti změny tvaru těles či vizuálních projevů zkoumaných jevů.

Asi nejznámější příklad průmyslového využití vysokorychlostní kamery jsou crash testy (Obr. 2-4), které slouží k lepšímu pochopení dějů a následků u automobilů a pasažérů během nehod. V dnešní době se vysokorychlostní kamery uplatňují v mnoha odvětvích, například ve strojírenství, v balistice, zdravotnictví, ve sportu, v multimédiích a v mnoha dalších.



Průmyslové využití lze obecně rozdělit do čtyř hlavních kategorií.

**Návrh zařízení**

Vývoj nových výrobků  
Modifikace zařízení

**Testování**

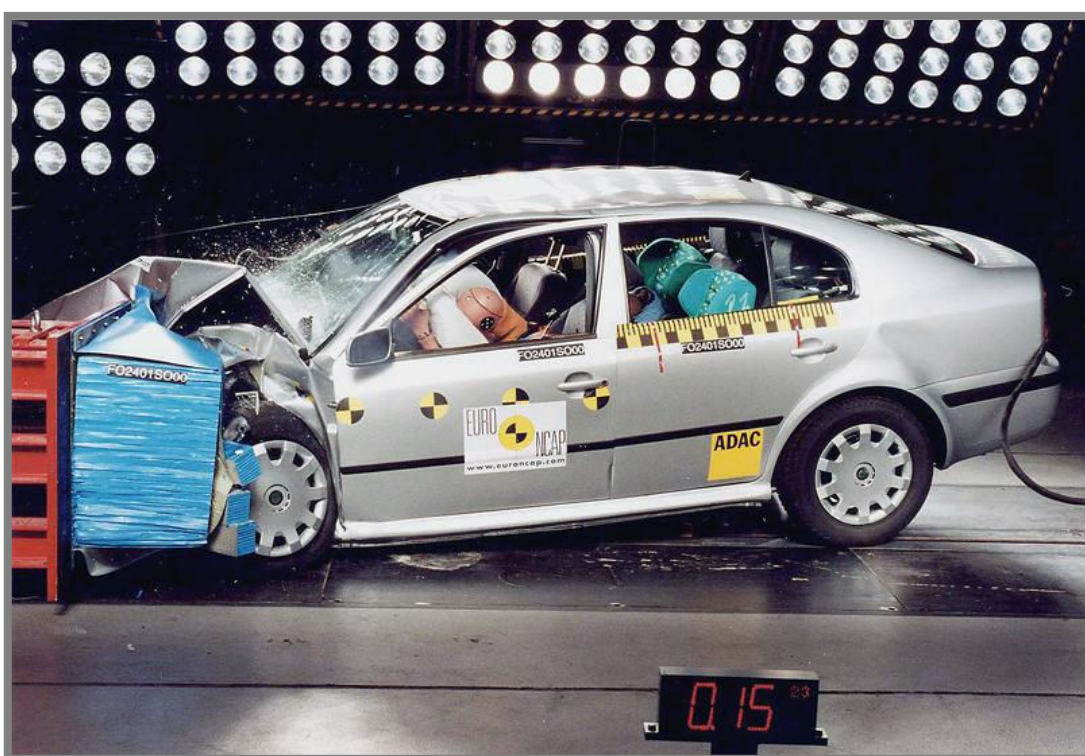
Zkoušky materiálů  
Testování součástí a sestav

**Výzkum**

Biologie  
Zkoumání spalovacích procesů  
Biomechanika  
Dynamika tekutin  
Experimentální aerodynamika

**Výroba**

Nastavení zařízení  
Prediktivní údržba  
Diagnostika strojů  
Údržba a opravy  
Sledování neshodných výrobků



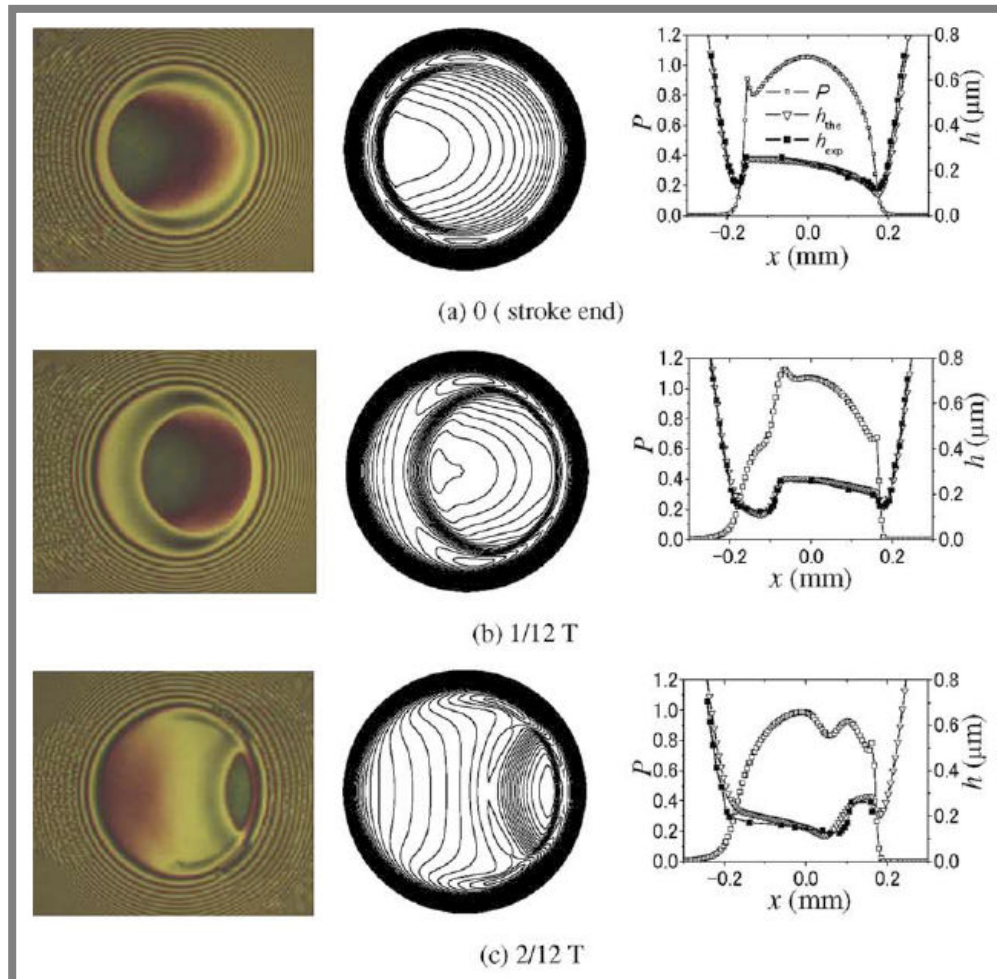
Obr. 2-4 Crashtest Euro NCAP - Škoda Octavia [12]

**2.3 Sledování změn v mazacím filmu**

2.3

Jedno z využití vysokorychlostní kamery v praxi je sledování rychlých změn v mazacím filmu. Tento způsob využití spadá do výše uvedené kategorie výzkum - dynamika tekutin. Vysokorychlostní kamera v tomto případě slouží k experimentálnímu studiu procesů probíhajících při EHD mazání za neustálých provozních u velmi zatěžovaných strojních součástí (valivých ložisek, ozubených soukolí, vaček apod.). Při studiu je použita kolorimetrická interferometrie, která umožňuje stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu s potřebnou přesností a rozlišitelností. Cílem těchto experimentů je objasnit chování a utváření mazacího filmu v EHD kontaktech.

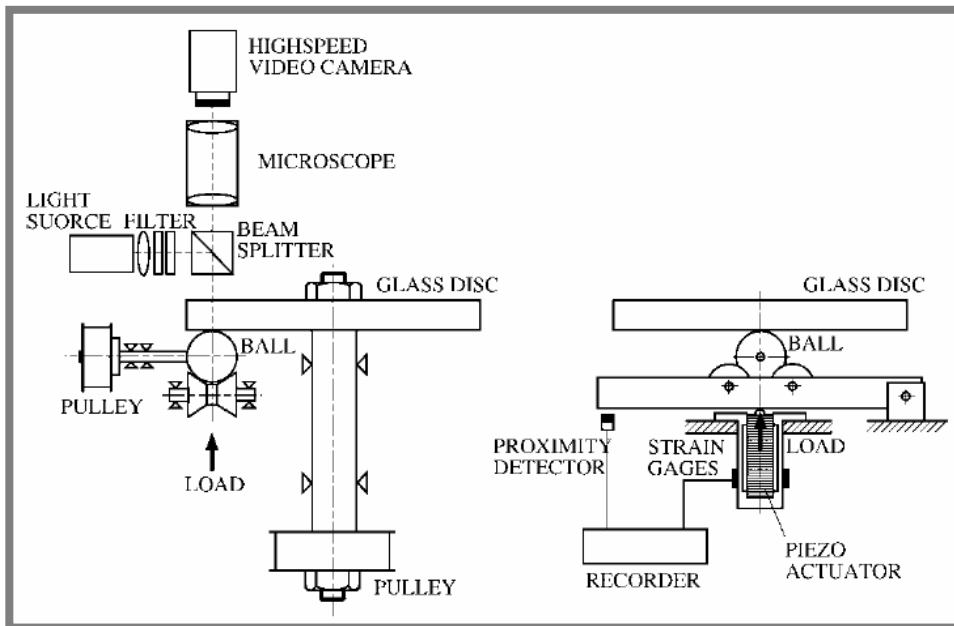
Jeden z experimentů provedl Wang a kol. [13], když studovali chování EHD mazaného kontaktu za podmínek čistého valení s krátkým vratným pohybem, který patří mezi základní typy pohybu v mechanice. Pomocí vysokorychlostní kamery (2000 snímků za sekundu) připojené k mikroskopu zaznamenali interferogramy během celého cyklu vratného pohybu (Obr. 2-5).



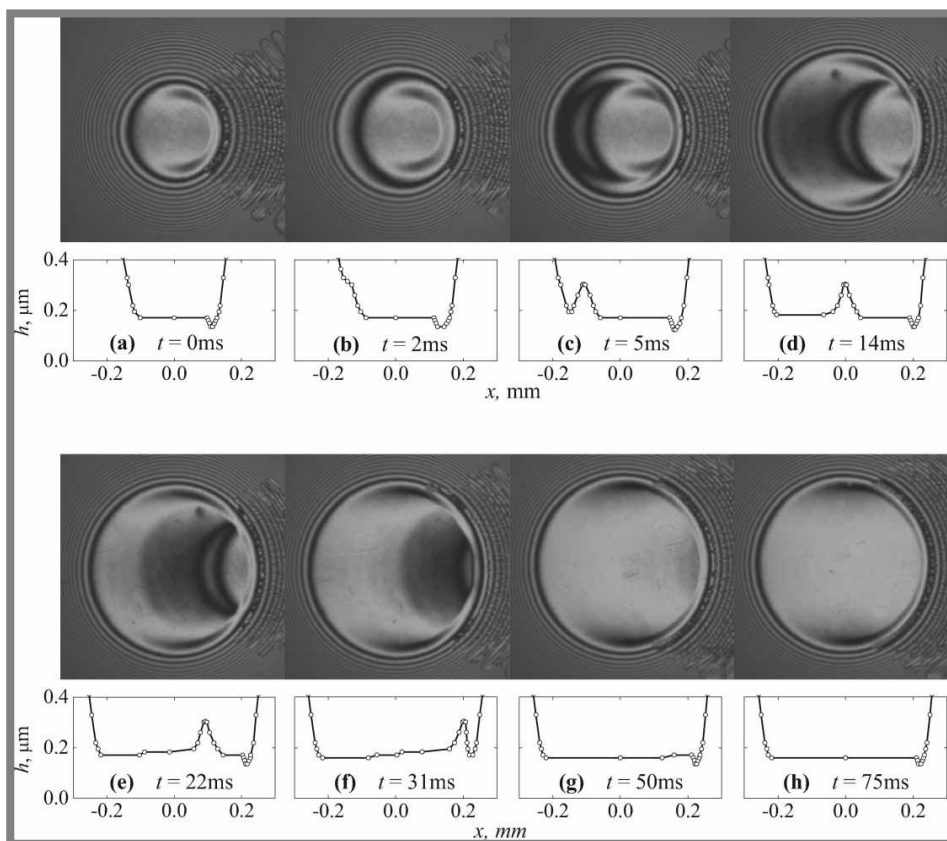
**Obr. 2-5** Srovnání experimentálního a teoretického řešení průběhu tloušťky mazacího filmu [13]

Vliv dynamických změn zatížení na EHD kontakt studoval Kaneta a kol. [14]. Použili experimentální aparaturu (Obr. 2-6) s vysokorychlostní kamerou a piezo lineárním budičem proměnného zatížení. Cílem bylo experimentálně ověřit chování kontaktu při různých rychlostech zatěžování.

Při sérii experimentů se pokusili objasnit chování mazacího filmu při dynamické změně zatížení uvnitř kontaktní oblasti. Byla provedena série experimentů za podmínek čistého valení (Obr. 2-7).



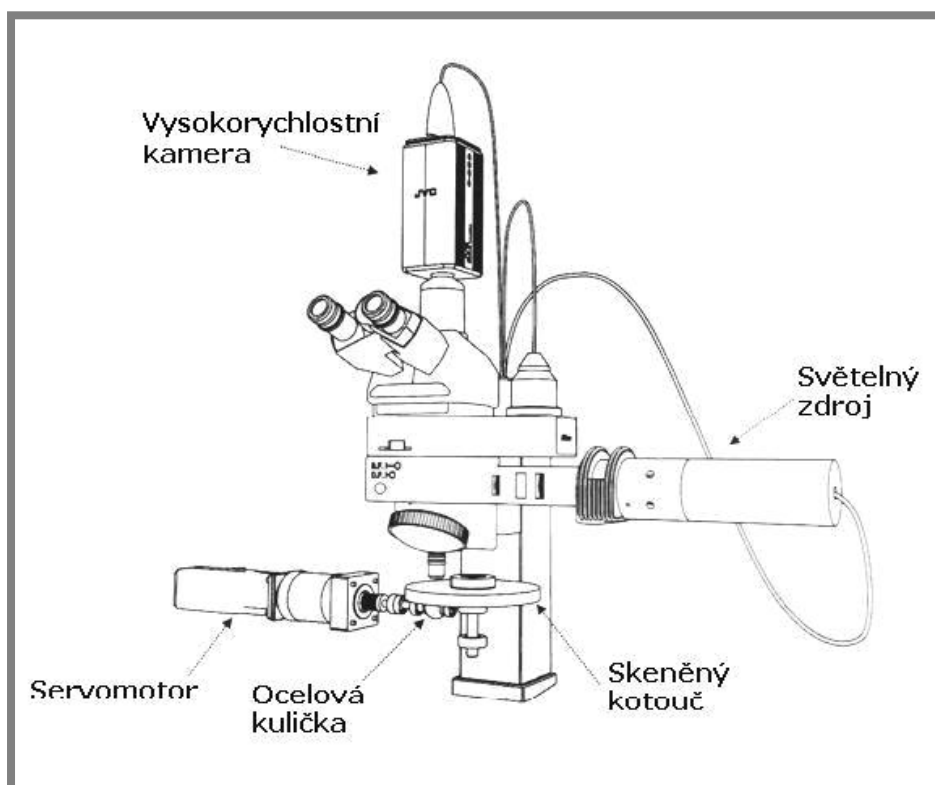
Obr. 2-6 Schéma experimentálního zařízení [14]



Obr. 2-7 Interferogramy a profily tloušťky mazacího filmu při dynamické změně zatížení kontaktu [14]

### 2.3.1 Experimentální zařízení pro studium tenkých mazacích filmů

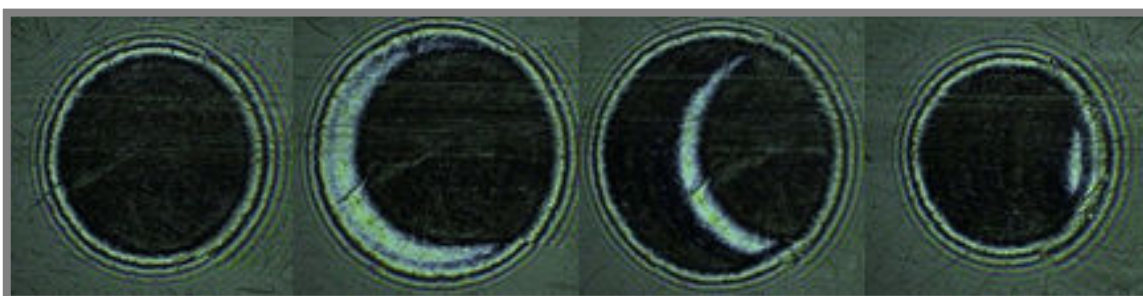
Pro simulování podmínek bodového kontaktu se používá experimentální zařízení (Obr. 2-8). V simulátoru je tenký mazací film utvářen ve styku mezi rotující ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm a rotujícím skleněným diskem o průměru 150 mm, přičemž osy obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. Na kontaktní plochu disku je nanášena vrstva chrómu. Protilehlá strana skleněného disku je opatřena antireflexní vrstvou. Zatížení kontaktu je realizováno pomocí pákového mechanismu. Oba třecí povrchy jsou nezávisle poháněny krokovými motory. To umožňuje experimentální modelování provozních podmínek vyskytujících se ve strojních uzlech.



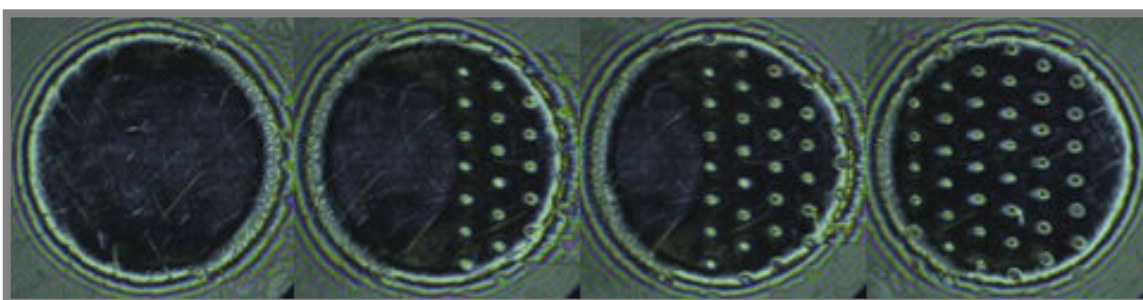
Obr. 2-8 Schéma experimentálního zařízení pro studium tenkých mazacích filmů [15]

### 2.3.2 Série experimentů při nestacionárních provozních podmínkách

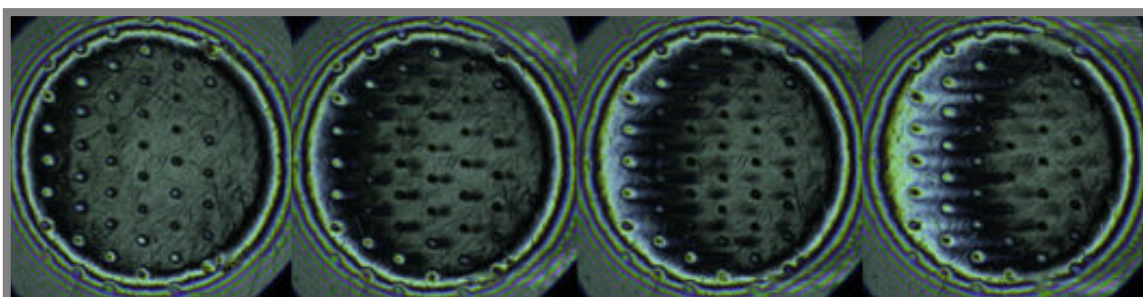
Při experimentech je pomocí vysokorychlostní kamery zachycena série po sobě jdoucích chromatických interferogramů. Mezi pozorované nestacionární provozní podmínky patří například skoková změna zatížení v bodovém kontaktu (Obr 2-9), reverzace pohybu (Obr 2-10) nebo rozběh (Obr 2-11). Použitím vysokorychlostní kamery se při těchto kritických fázích provozu sleduje utváření mazacího filmu.



Obr. 2-9 Chromatické interferogramy během proměnného zatížení kontaktu [16]



Obr. 2-10 Chromatické interferogramy během reverzace pohybu s cíleně modifikovanou topografií povrchu kuličky [16]



Obr. 2-11 Chromatické interferogramy během rozběhu pohybu s cíleně modifikovanou topografií povrchu kuličky [17]

### **3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ**

V technické praxi se vyskytuje mnoho strojních součástí (valivá ložiska, vačky, ozubená soukolí), které pracují za podmínek nestacionárního elastohydrodynamického mazání. Kritické fáze provozu jako rozběh, reverzace, doběh či náhlé změny zatížení, mají zásadní vliv na tloušťku mazacího filmu, což může vést až k poškození kontaktních ploch. V posledních desetiletích se proto výzkum stále více zaměřuje na experimentální a numerické zkoumání mazání v EHD kontaktech. Při experimentálním studiu nestacionárních podmínek je výhodné použít pro vyhodnocení dějů v mazacím filmu vysokorychlostní kameru.

K modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách je využíváno experimentální zařízení, které se nachází v laboratoři Ústavu konstruování VUT v Brně. Chování mazacího filmu v kontaktu se zaznamenává pomocí vysokorychlostní kamery X-Stream VISION XS-3. Tato vysokorychlostní kamera je vybavena obrazovým snímačem CMOS, její barevná hloubka je 10 bit a umožňuje zaznamenat až 630 snímků za sekundu v rozlišení 1280 x 1024 pixelů. Nastavení kamery je různé dle podmínek experimentu, při pozorování změn například během reverzace pohybu je vysokorychlostní kamera nastavena na záznam 440 snímků za sekundu při expozičním čase 2,272 ms. Podstatný vliv na kvalitu zaznamenaného obrazu má osvětlení. K osvětlení kontaktní oblasti se používá 1 kW xenonový zdroj bílého světla, který má dostatečně vysokou barevnou teplotu. Tvar mazacího filmu je následně určen kolorimetrickou interferometrií, což je měřicí metoda určená ke stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém mazaném kontaktu.

#### 4 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE

Přehled parametrů vysokorychlostních kamer vhodných pro sledování změn v mazacím filmu. Stávající vysokorychlostní kamera používaná v laboratoři Ústavu konstruování VUT v Brně X-Stream VISION XS-3 (Obr. 4-1) a modernější vysokorychlostní kamera PHANTOM v7.3 (Obr. 4-2).



Obr. 4-1 X-Stream VISION XS-3 [3]



Obr. 4-2 PHANTOM v7.3 [18]

Tab. 4-1 Srovnání parametrů vysokorychlostních kamer X-Stream XS-3 a PHANTOM v 7.3

	<b>X-Stream VISION XS-3</b>	<b>PHANTOM v7.3</b>
Maximální rozlišení	1280 x 1024	800 x 600
Počet pixelů	1310720	480000
Max. fps při max. rozlišení	628 fps	6688 fps
Maximální snímkový kmitočet	32000 fps při rozlišení 1280 x 20	500000 fps při rozlišení 32 x 8
Barevná hloubka	10 bit	8-, 10-, 12-, 14-bit volitelně
Velikost pixelu	12 $\mu\text{m}$	22 $\mu\text{m}$
Paměť	1 GB, 2 GB, 4 GB standardně, upgrade od 8 GB do 16 GB	2 GB, 4 GB, 8 GB, 16 GB, 32 GB standardně, upgrade až na 320 GB
Objektiv	Standardní C-mount, F mount volitelně	Standardní F-mount, C mount volitelně
Rozměry	125 mm x 125 mm x 254 mm	109 mm x 101,6 mm x 241,3 mm
Napájení	100 - 240V	100 - 240V, baterie 24V
Hmotnost	1.2 kg	3.175 kg
Teplota	+5°C do +40°C	+10°C do +40°C
Maximální vlhkost	80% při 31°C	80% při 5°C

Dá se předpokládat, že se v následujících letech budou zdokonalovat všechny základní parametry vysokorychlostních kamer. Od většího rozlišení, vyšší rychlosti snímání, až po menší rozměry a s tím spojenou nižší hmotnost. Lze očekávat i vyšší odolnost, což znamená využití při nestandardních teplotách a vysoké vlhkosti. Pro sledování změn v mazacím filmu je však důležitá hlavně vyšší barevná hloubka, která poskytuje kvalitnější obraz. Další předpokládané zlepšení je navýšení kapacity paměti, což umožňuje zaznamenat více dat a tak i delší dobu záznamu. V neposlední řadě lze očekávat vývoj osvětlení, které má zásadní vliv na kvalitu záznamu. V této oblasti se stále více prosazuje LED osvětlení, které dokáže poskytnout větší vysokou barevnou teplotu světla při nízké spotřebě a dlouhé životnosti.

Vysokorychlostní kamery obecně směřují širšímu rozšíření, tomu však zatím brání jejich cena. Díky rychlému vývoji nových technologií jsou cenově stále dostupnější, přesto se dnes použití vysokorychlostních kamer omezuje pouze na specializovaná pracoviště. Je však velmi pravděpodobné, že se vysokorychlostní kamery v budoucnosti stanou běžně dostupné i pro domácí použití.



## **5 ZÁVĚR**

Tato práce podává přehled současného stavu poznání v oblasti využití vysokorychlostní záznamové techniky pro sledování změn v mazacím filmu. První část práce podává přehled základních pojmů v oblasti vysokorychlostních kamer. Další část se věnuje historii vysokorychlostních kamer, jejich využitím v praxi a sledování změn v mazacím filmu. Závěr práce se věnuje analýze a zhodnocení získaných poznatků a popisuje směr budoucího vývoje. Tím jsou cíle bakalářské práce splněny.

## 6 SOUHRNNÁ BIBLIOGRAFIE

### 6.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Wikipedia.org – otevřená encyklopedie* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupné na World Wide Web: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1\\_hloubka](http://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1_hloubka)>.
- [2] JADRNÝ, J. *Extranotebook.cz : vyznáte se v rozlišení?* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.extranotebook.cz/node/7>>.
- [3] *IDT - Integrated Design Tools, Inc. - High Speed Camera Terminology – manuál*
- [4] *Netcam.cz : obrazové snímače CCD vs. CMOS* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/obrazove-snimace-ccd-cmos.php>>.
- [5] FILIPI, D. *Fotografovani.cz : Kodak představil nový typ barevného filtru pro snímáče* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.fotografovani.cz/art/fotech\\_df/kodak-barevny-filtr-p.html](http://www.fotografovani.cz/art/fotech_df/kodak-barevny-filtr-p.html)>.
- [6] *Wikipedia.org – otevřená encyklopedie* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>>.
- [7] *MediaCollege.com - free educational and resource website : Colour Temperature Chart* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.mediacollege.com/lighting/colour/colour-temperature.html>>.
- [8] *Adorama - The Photography People : Lighting* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.adorama.com/LLD2102.html>>.
- [9] *Integrated Design Tools* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.idtpiv.com/>>.
- [10] *Wikipedia.org – otevřená encyklopedie* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupné na World Wide Web: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard\\_Muybridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge)>.
- [11] *Visinst.com* [online]. 2009 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.visinst.com/Hycam.html>>.
- [12] *Auto.cz : crashtesty* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.auto.cz/main.php?site=crashtesty\\_detail&kod=skoc2001](http://www.auto.cz/main.php?site=crashtesty_detail&kod=skoc2001)>.
- [13] WANG, J., HASIMOTO, T., NISHIKAWA, H., KANETA, M. (2005): *Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion.*, Tribology International 38, s. 1013-1021.
- [14] KANETA, M., OZAKI, S., NISHIKAWA, H., GUO, F., "Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films", Journal of Engineering Tribology, vol. 221, no. 3, 2007, pp. 271-278.
- [15] Svoboda, P.: *Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní barevnou kamerou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 30 s. Vedoucí pojednání ke státní závěrečné zkoušce: Doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D
- [16] ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. *Experimentální studium mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách*. In FSI Junior konference 2008. Brno, FSI Brno 2009. ISBN 978-80-214-3834-7.
- [17] KŘUPKA, I.; HARTL, M.; SVOBODA, P. *Effects of Roughness Features on Lubrication Film Formation within Mixed Lubricated Contacts*. In 2nd

- International Conference on advanced Tribology 2008. 1. Singapore, Research Publishing Services. 2008. p. 482 - 483. ISBN 978-981-08-2067-1.
- [18] *Vision Research - HIGH SPEED DIGITAL IMAGING SYSTEMS* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.visionresearch.com/index.cfm?sector=htm/files&page=camera\\_v73\\_new](http://www.visionresearch.com/index.cfm?sector=htm/files&page=camera_v73_new)>.
- [19] KOMENDA, J., NOVÁK, M. *Rucevzhuru.cz : Vysokorychlostní kamera* [online]. 2009 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.rucevzhuru.cz/index.php/component/content/article/53-rychlokamery/133-kamery.html>>.
- [20] KRŮPKA, I.: *Studium elasto-hydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav*. Brno, 2002, 120s., Habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [21] *VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY: Obecné informace* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.proxis.cz/hsv.htm>>.
- [22] *FASTEC IMAGING : ABOUT HIGH SPEED DIGITAL VIDEO CAMERAS* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.fastecimaging.com/about\\_hs.html](http://www.fastecimaging.com/about_hs.html)>.
- [23] *Camera Basics for Slow Motion* [online]. 2007 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.mikrotron.de/index.php?en\\_hsv\\_kamerabegriffe](http://www.mikrotron.de/index.php?en_hsv_kamerabegriffe)>.
- [24] *WP's Home Page High-Speed Imaging* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.fen-net.de/walter.preiss/index.html>>.
- [25] *Tmvss.cz - měřicí a diagnostická technika : Vysokorychlostní kamery* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.tmvss.cz/Aplikace/Vysokorychl.-kamery.html>>.
- [26] *Howstuffworks.com* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://electronics.howstuffworks.com/question362.htm>>.
- [27] *Azfoto.cz : snímací čip* [online]. 2008 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.azfoto.cz/\\_web/\\_informace/digital\\_pod\\_lupou.php?t=snimaci\\_cip](http://www.azfoto.cz/_web/_informace/digital_pod_lupou.php?t=snimaci_cip)>.
- [28] SVOBODA, Š. *Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek* [online]. 2004 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32518](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518)>.
- [29] PATA, V. *Vysokorychlostní kamerové systémy*. 1. vyd. Brno : CERM, 2006. 94s. ISBN 80-7204-480-X.

## 6.2 Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>fps</i>	- frames per second (snímky za sekundu)
<i>ms</i>	- jednotka času (milisekunda) $10^{-3}$ s
<i>mm</i>	- délková jednotka (milimetr) $10^{-3}$ m
$\mu\text{m}$	- délková jednotka (mikrometr) $10^{-6}$ m
<i>GB</i>	- jednotka množství dat v informatice (gigabyte) $10^9$ byte
<i>bit</i>	- základní a současně nejmenší jednotkou informace
<i>RoI</i>	- <i>Region of interest</i> - oblast sledovaná vysokorychlostním snímáním
<i>RGB</i>	- barevný model - <i>red, green, blue</i> (červená, zelená, modrá)
<i>LED</i>	- <i>light-emitting diode</i> - světlo vyzařující dioda
<i>kW</i>	- jednotka výkonu (kilowatt)

<i>K</i>	- jednotka termodynamické teploty (Kelvin)
<i>°C</i>	- jednotka teploty (stupeň Celsia)
<i>CCD</i>	- Charged Coupled Device (zařízení s vázanými náboji) - obrazový snímač
<i>CMOS</i>	- Charged Coupled Device (zařízení s vázanými náboji) - obrazový snímač
<i>EHD</i>	- elastohydrodynamické mazání
<i>V</i>	- jednotka elektrického napětí (Volt)
<i>kg</i>	- jednotka hmotnosti (kilogram)

### 6.3 Seznam obrázků

<b>Obr. 1-1</b> Nejčastěji používané barevné hloubky [1]	13
<b>Obr. 1-2</b> Přehled nejběžnějších rozlišení [2]	13
<b>Obr. 1-3</b> Okno RoI Dialog [3]	15
<b>Obr. 1-4</b> CCD snímač – velikost 1/3 palce [4]	16
<b>Obr. 1-5</b> CMOS snímač – velikost 1/4 palce [4]	16
<b>Obr. 1-6</b> Bayerův filtr [5]	17
<b>Obr. 1-7</b> Interpolace barev z Bayerova filtru [6]	17
<b>Obr. 1-8</b> Barevná teplota charakterizuje spektrum bílého světla [7]	17
<b>Obr. 1-9</b> Halogenové svítidlo DP Light 1000W [8]	18
<b>Obr. 1-10</b> LED osvětlení IDT - 08 LED, 12 LED [9]	18
<b>Obr. 1-11</b> Synchronizační zařízení MotionPro Timing Hub [9]	18
<b>Obr. 2-1</b> Eadweard Muybridge [10]	19
<b>Obr. 2-2</b> Vysokorychlostní fotografie od Eadwearda Muybridge [10]	19
<b>Obr. 2-3</b> Vysokorychlostní kamera HYCAM [11]	20
<b>Obr. 2-4</b> Crashtest Euro NCAP - Škoda Octavia [12]	21
<b>Obr. 2-5</b> Srovnání experimentálního a teoretického řešení průběhu tloušťky mazacího filmu [13]	22
<b>Obr. 2-6</b> Schéma experimentálního zařízení [14]	23
<b>Obr. 2-7</b> Interferogramy a profily tloušťky mazacího filmu při dynamické změně zatížení kontaktu [14]	23
<b>Obr. 2-8</b> Schéma experimentálního zařízení pro studium tenkých mazacích filmů [15]	24
<b>Obr. 2-9</b> Chromatické interferogramy během proměnného zatížení kontaktu [16]	25
<b>Obr. 2-10</b> Chromatické interferogramy během reverzace pohybu s cíleně modifikovanou topografií povrchu kuličky [16]	25
<b>Obr. 2-11</b> Chromatické interferogramy během rozběhu pohybu s cíleně modifikovanou topografií povrchu kuličky [17]	25
<b>Obr. 4-1</b> X-Stream VISION XS-3 [3]	27
<b>Obr. 4-2</b> PHANTOM v7.3 [18]	27

### 6.4 Seznam tabulek

<b>Tab. 4-1</b> Srovnání parametrů vysokorychlostních kamer X-Stream XS-3 a PHANTOM v 7.3	27
---	----