



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

MOŽNÉ APLIKACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH KAMEROVÝCH SYSTÉMŮ V PRŮMYSLU

POSSIBLE APPLICATIONS OF HIGH-SPEED CAMERA SYSTEMS IN INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN HUDEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JANA DOŇAROVÁ, 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): Jan Hudeček

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:

Možné aplikace vysokorychlostních kamerových systémů v průmyslu

v anglickém jazyce:

Possible Applications of High-Speed Camera Systems in Industry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracovat rešerši na dané téma

Cíle bakalářské práce:

- základní pojmy a možnosti VKS
- technické parametry
- literární a internetový průzkum

Seznam odborné literatury:

Vladimír Pata - Vysokorychlostní kamerové systémy (CERM, 2006)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Doňarová, Ph.D.

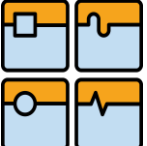
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 21.11.2012

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	Str. 5
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na vysokorychlostní kamery a jejich možné aplikace v průmyslu. Práce se zabývá popisem vysokorychlostních kamer, jejich historií a následným popisem jejich možných aplikací v průmyslu spolu s několika příklady jejich využití v praxi.

KLÍČOVÁ SLOVA

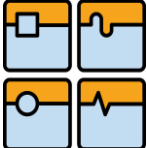
Vysokorychlostní kamera, historie vysokorychlostních kamer, rozdělení vysokorychlostních kamer, možné aplikace vysokorychlostních kamer v průmyslu.

ABSTRACT

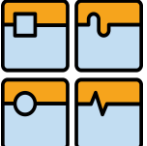
This thesis is focused on high-speed cameras and their possible applications in industry. Thesis is aimed on description of high-speed cameras, their history, and their possible applications in industry with few examples of their using.

KEYWORDS

High-speed camera, history of high-speed cameras, division of high-speed cameras, possible applications of high-speed cameras in industry

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

HUDEČEK, Jan. Název: *Možné aplikace vysokorychlostních kamerových systémů v průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2013. s., 37. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jana Doňarová, Ph.D.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

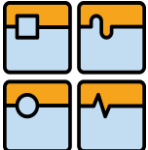
PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Možné aplikace vysokorychlostních kamerových systémů v průmyslu* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne

.....

Jan Hudeček

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 8
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janě Doňarové, Ph.D. za vedení, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu a spolužákům za pomoc při studiu.

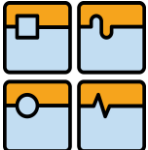
V Brně dne

.....

Jan Hudeček

Obsah:

Úvod	10
1 Vysokorychlostní kamery	11
1.1 Popis vysokorychlostních kamer.....	11
1.2 Princip vysokorychlostních kamer.....	13
1.3 Kapacita nahrávání.....	14
1.4 Osvětlení	14
1.4.1 Plošná osvětlovací pole.....	15
1.4.2 Kruhové osvětlovače.....	16
1.4.3 Kopulové osvětlovače.....	16
2 Historie	17
2.1 Historie vysokorychlostní fotografie	17
2.2 Historie vysokorychlostních kamer	18
3 Aplikace vysokorychlostních kamer v průmyslu	21
3.1 Výroba	22
3.1.1 Výrobní linky.....	22
3.1.2 Strojové vidění.....	22
3.2 Zkušebnictví.....	23
3.2.1 Automobilový průmysl.....	24
3.2.2 Drop test – zkouška pádem.....	26
3.2.3 Zbrojní průmysl – balistické zkoušky.....	27
3.2.4 Analýza tvorby třísky.....	28
3.2.5 Rázové zkoušky - metoda „Charpy“.....	28
3.3 Věda a výzkum	29
3.3.1 Rychlost světla.....	29
3.3.2 Biomechanika.....	30
3.3.3 Video analýzy v chemii.....	32
4. Závěr	33
5. Seznam použitých zdrojů	34
6. Seznam obrázků	37

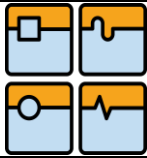
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Úvod

V dnešním světě rychlých strojů a ještě rychlejších operací je lidské oko nebo klasická kamera již nedostatečné záznamové zařízení. Pokud tedy chceme sledovat, co se vlastně odehrálo, musíme zvolit takové záznamové zařízení, kterému pozorovaná událost neunikne. Pro zachycení dějů dlouhých několik milisekund budeme tedy potřebovat vysokorychlostní kameru se schopností zachytit tisíce snímků za sekundu.

Tyto vysokorychlostní kamery se využívají ve vědě, výzkumu a průmyslu. Využívají se hlavně k optimalizování, k odborným analýzám, k hledání vad ve výrobě a taky třeba jen k pozorování dějů v běžném životě. Proto používání vysokorychlostních kamer vedlo třeba k záchraně životů při dopravních nehodách, ke zrychlení a optimalizování mnoha automatických linek, anebo k detailnímu pozorování chování střely při balistických zkouškách.

Již z úvodu je zřejmé, že možnosti aplikování vysokorychlostních kamer jsou velice rozsáhlé. V mojí práci se zaměřím na popis vysokorychlostních kamer, historii, možné aplikace, jejich rozdělení, popis a taky se na některé detailně podíváme.



1 Vysokorychlostní kamery

1.1 Popis vysokorychlostních kamer

Vysokorychlostní kamera (anglicky High-Speed Camera) je optoelektronické zařízení schopné zaznamenat téměř každou rychlou událost či děj odehrávající se v rozmezí i několika milisekund. Tato schopnost je docílena vysokou frekvencí snímkování. Dolní hranice pro označení kamery jako vysokorychlostní je snímkovácí frekvence 60 obrázků za sekundu a horní hranice se neuvádí, neboť se neustále zvyšuje.

V současné době se využívají dva druhy konstrukce kamer:

- kamery s ovládáním a displejem přímo na přístroji
- kamery s dodatečným příslušenstvím (PC, CDU – Controller Display Unit)

Kamery řešené prvním způsobem jsou více rozšířené a to z důvodu jejich snadnějšího použití, dostačující nahrávací frekvenci a jejich příznivé ceně. Jedná se o kamery se snímkovácí frekvencí 25-1000Hz, která dostatečně splňuje požadavky v oboru jejich nejčastějším použití. Jsou lehčí, kompaktnější a vhodnější jak do výrobních linek v továrnách, tak pro využití třeba ve sportu.



Obr 1-1 Vysokorychlostní kamera TroubleShooter [1]

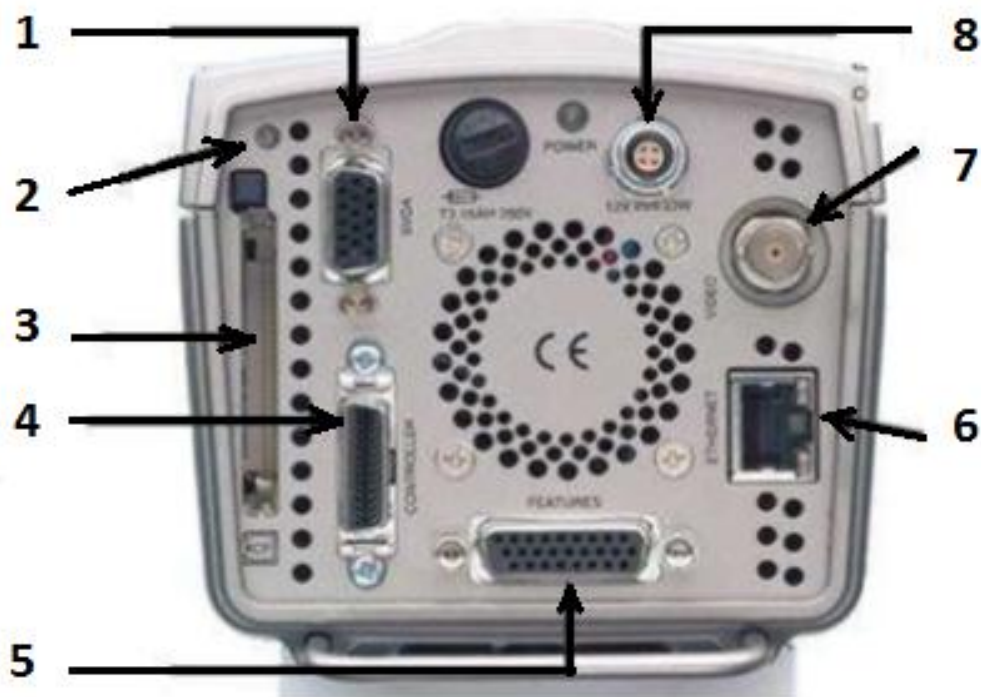


Obr 1-2 Vysokorychlostní kamera i-SPEED 2 [2]

Pro snímání těch rychlejších dějů je lepší využít druhé konstrukce a využít kameru s mnohem větší snímkovácí frekvencí, jmenovitě jde o tisíce až milióny obrázků za sekundu. Pro zpracování tolika dat je třeba mít kameru připojenou k počítači nebo k CDU. Jednotka CDU obsahuje uživatelské rozhraní, s kterým můžeme kameru lehce ovládat. Jejich největší nevýhodou je cena a potřeba většího prostoru a více dodatečného vybavení. Tento kamerový systém je

nejčastěji používán ve výzkumu a zkušebnictví, kde se člověk zabývá ději doopravdy vysokých rychlostí, dějích jako je například šíření světla, balistické testy nebo crash testy automobilů.

Na obrázku můžeme vidět připojovací schéma takovéto vysokorychlostní kamery. Jedná se o kameru i-SPEED 2 od firmy Olympus:



Obr 1-3 Připojovací schéma i-SPEED 2

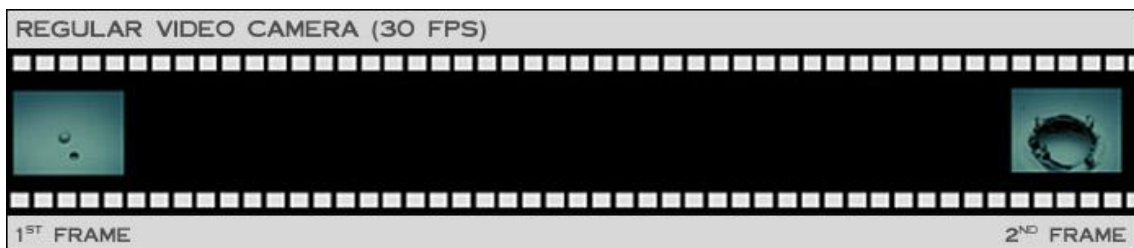
- 1 - Konektor SVGA
- 2 - Spínač Reset
- 3 - PCMCIA slot
- 4 - Ovládací konektor
- 5 - Konektor rozšiřujících funkcí
- 6 - Konektor Ethernet
- 7 - BNC konektor kompozitního videa
- 8 - Napájecí konektor



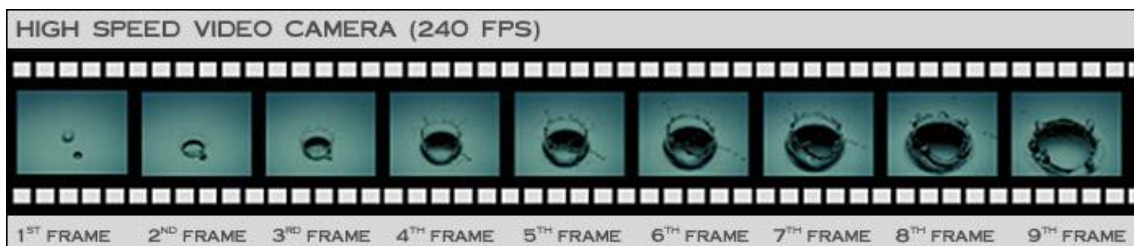
1.2 Princip vysokorychlostních kamer

Ve srovnání s klasickými kamerami je vysokorychlostní kamera schopná zachytit mnohonásobně více snímků za sekundu (jedná se o 2-4 řády více). U klasických kamer počítáme se schopností zachytit 25 snímků za sekundu, což se schopností zachytit tisíce až desetitisíce snímků za sekundu u vysokorychlostních kamer je velice znatelný rozdíl. (Pro příklad uvedu kameru FASTCAM SA5 od firmy Photron, která dokáže při rozlišení 64 x 16 zachytit až milion snímků za sekundu.)

Na snímcích padající kapky jde názorně vidět výhody takovýchto zařízení. Klasickou kamerou se snímkovací frekvencí 30 obrázků za sekundu zachytíme pouze dva snímky a to je pro sledování tohoto děje doopravdy nedostačující. Pro studování velmi rychlých dějů a pohybů je potřeba více dat, více informací, a to nám vysokorychlostní záznamové zařízení poskytnou.



Obr 1-4 Kamera se snímkovací frekvencí 30 obrázků za sekundu [3]



Obr 1-5 Kamera se snímkovací frekvencí 240 obrázků za sekundu [3]

Běžné a vysokorychlostní kamery mají princip snímání obrazu stejný. Světlo odražené od snímaného objektu prochází objektivem a přes soustavu zrcadel dopadá na světlo citlivý snímací čip (v minulosti na snímací elektronku). Tam je přeměněno na elektrický proud, který elektronika kamery zpracuje buď na analogový televizní obraz, nebo dnes častěji na digitální obraz. Používají se přitom především CCD a CMOS snímače obrazu. V amatérských CCD videokamerách se používá jeden snímač, na jehož pixelech jsou naneseny filtry, které propouští jen jednotlivé RGB kanály. U poloprofesionálních kamer se používají snímače tři. Obraz je cestou rozložen soustavou polopropustných zrcadel nebo hranolem na jednotlivé složky, ze kterých každá barva RGB dopadne na jiný snímač. [3]

Při vysoké kvalitě záznamu, parametrů a nastavením kamery lze vysokorychlostní kamery využít nejen při kvalitativním analyzování ale taky při

kvantitativních analýzách, tedy při využití okamžitých fyzikálních veličin. Jelikož můžeme k jednotlivým snímkům přidat relativní čas, tak jsme schopni z pořízených obrázků následně určit vektory zrychlení, rychlosti, jejich změnu a tvar těles. Přesnost této analýzy je závislá na dobrém zkalibrováním vysokorychlostní kamery.

1.3 Kapacita nahrávání

S větším počtem snímků přichází i problém s jejich zpracováním. Při používání klasických kamer je velikost dat malá (desetiny megabytů), při používání vysokorychlostních kamer se velikost přenášených dat z kamery do datového úložiště pohybuje v řádu stovek až tisíců megabytů. Proto je nutné počítat s větším množstvím příslušenství a větším datovým úložištěm.

Pro názornost uvedu tabulku s kapacitou digitální vysokorychlostní kamery TroubleShooter 1000 (Obr 1-6):



Obr 1-6 Vysokorychlostní kamera TroubleShooter [4]

Tabulka 1 Kapacitní tabulka TroubleShooter 1000 [4]

Záznamová rychlost (snímky za sekundu)	Rozlišení v pixelech	Standartní paměť – 512Mb		Rozšířená paměť – 1Gb	
		Počet obrázků	Nahrávací čas	Počet obrázků	Nahrávací čas
Nahrávací parametry					
125	640x480	2184	17.5	4368	34.9
250	640x480	2184	8.7	4368	17.5
500	640x480	2184	4.4	4368	8.7
1000	640x480	2184	2.2	4368	4.4
125	320x240	8736	69.9	17472	139.8
250	320x240	8736	34.9	17472	69.9
500	320x240	8736	17.5	17472	34.9
1000	320x240	8736	8.7	17472	17.5

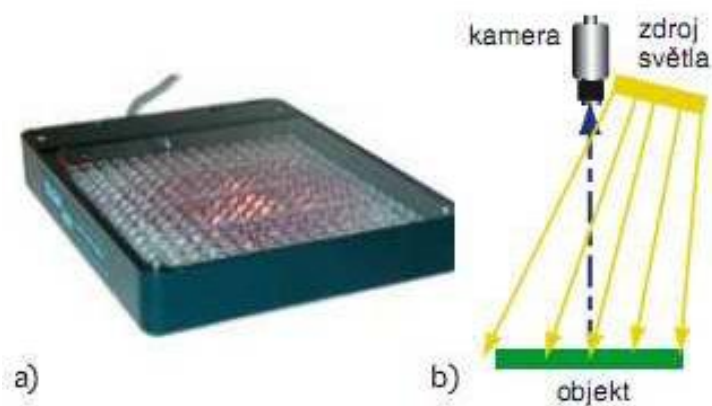
1.4 Osvětlení

S vyšší frekvencí snímkování nám klesá rozlišení záznamu a tak je nutné dávat pozor, aby rozlišení pro potřebný záznam nebylo nepoužitelné. S vyšší frekvencí snímkování nám tedy nastává problém s osvětlením. Při pořizování vysokofrekvenčních záznamů (třeba při desetitisícím snímků za sekundu) běžné denní svícení rozhodně nestačí a na pořizovaném záznamu je vidět šero nebo úplnou tmou. Pro dosažení potřebného osvětlení scény je proto nutné přidat světelných zdrojů záření, jako například halogenová svítidla s vysokým příkonem, LED svítidla a třeba pro balistické experimenty se často používá osvětlení pomocí synchronizovaných výbojkových blesků.

Na trhu je velký výběr osvětlovačů pro realizaci zmíněných způsobů osvětlení. V současné době se již téměř výhradně používají osvětlovače s diodami LED jako zdroji světla. LED nepotřebují vysoké napětí a jejich světelný tok se snadno reguluje. Vykazují dlouhou životnost a vlastnosti jejich světla se mění jen málo. Většina výrobců dodává základní druhy osvětlovačů, které pokrývají používané geometrie osvětlení. Každý výrobce má v nabídce základní druhy uvedené v následujících odstavcích. V katalogích lze nalézt i další druhy osvětlovačů, které jsou založeny na patentovaném řešení a jejichž některé parametry výrobce ještě dále zlepšuje. Osvětlovače se dodávají v různých velikostech, s různou barvou světla a různým způsobem řízení (nepřetržité světlo, záblesky nebo stroboskopické osvětlení). [5]

1.4.1 Plošná osvětlovací pole

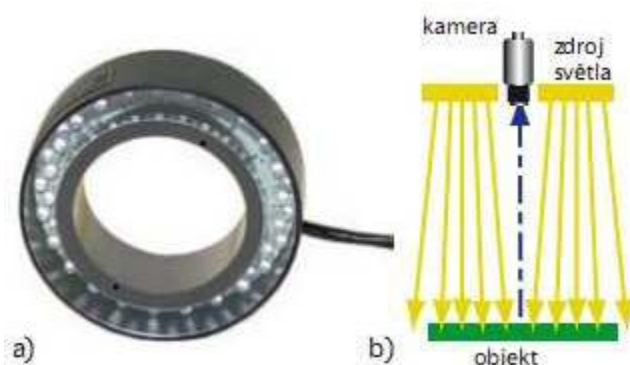
Plošná osvětlovací pole (Obr 1-7) většinou poskytují směrované světlo. Rozptýlení je dáno vyzařovacím úhlem použitých diod LED. V nenáročných úlohách mohou nahradit i nákladnější osvětlovače pro osvětlení s jasným obrazovým polem a rozptýleným světlem. Často se používají jako zdroje směrovaného světla pro osvětlení s tmavým zorným polem. Malá a speciální pole se využívají i jako pomocná světla nebo jako zdroje pro složitější osvětlovací soustavy. [5]



Obr 1-7 Schéma plošného osvětlení pole [5]

1.4.2 Kruhové osvětlovače

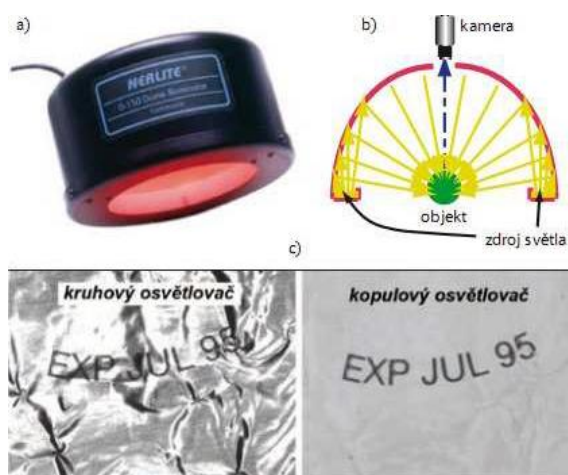
Kruhový osvětlovač (Obr 1-8) poskytuje více rozptýlené světlo směřující od objektivu kamery. V principu jde o osvětlovač pro osvětlení s jasným obrazovým polem a rozptýleným světlem, nemá ovšem zcela ideální vlastnosti, zvláště v provedení jednoduchého kruhu LED, který výrobci někdy přidávají okolo objektivu kamery. [5]



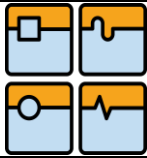
Obr 1-8 Schéma kruhového osvětlovače [5]

1.4.3 Kopulové osvětlovače

Kopulové osvětlovače (Obr. 1-9) se používají pro osvětlení s jasným obrazovým polem kdy je nezbytně nutné osvětlit objekt světlem skutečně rozptýleným. To je, například, úloha čtení tištěných nápisů na zmačkané lesklé fólii. Rozptýlené světlo se v osvětlovači vytváří difuzním odrazem na vnitřní ploše polokoule. Osvětlení se někdy říká bezstínové (*shadowless*). [5]



Obr 1-9 Schéma kopulového osvětlovače [5]



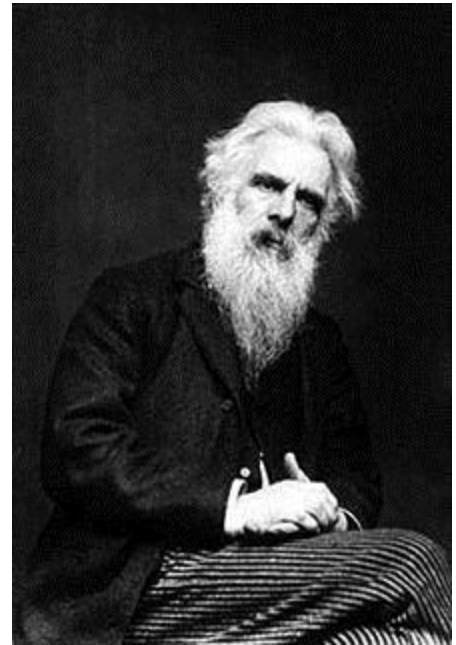
2 Historie

2.1 Historie vysokorychlostní fotografie

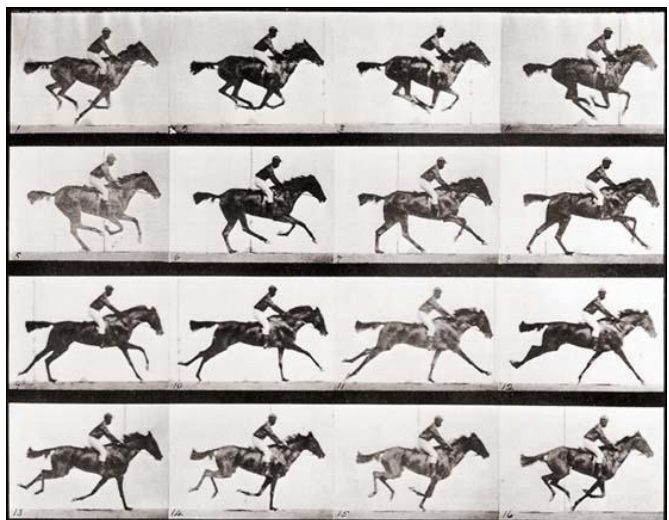
První pokusy, týkající se vysokorychlostních kamer se datují do 80. let 19. století. Jsou připisovány Edwardu Jamesovi Muggeridgeovi (1830-1904, známému také pod jménem Eadweard J. Muybridge), který je považován za průkopníka vysokorychlostní fotografie. Princip jeho pokusů spočíval v současném použití několika fotoaparátů zároveň, nutno dodat, že na svou dobu používal Eadweard J. Muybridge (Obr. 1.1) velmi krátké expoziční časy (až 1/6000 sekundy). Byl zakladatelem zoopraxiskopu a kinematoskopu, což jsou zařízení určená k promítání pohyblivých obrázků, přičemž klasický celuloidový kinofilm ještě nebyl znám.[7]

O pohybu se začal zajímat v roce 1873, kdy se Leland Stanford, železniční magnát a chovatel koní, vsadil o 25 000 amerických dolarů, že v určitém stadiu koňského klusu se ani jedna ze čtyř nohou nedotýká země. Muybridge se rozhodl dokázat, že Stanford má pravdu a s jeho finanční podporou vytvořil sérii snímků na mokřích kolodiových deskách, které tento výrok potvrdily.

V dřevěné budově postavil 24 fotografických přístrojů, na jeden okraj závodního závěsu zavěsil bílý horizont a na druhý umístil v pravidelných intervalech řadu fotoaparátů. Přes dráhu položil provázky, které v okamžiku, kdy je běžící kůň přetrhl, postupně uvolnily pružinové závěrky fotoaparátů. Práce na důkazu mu trvala šest let (1873 - 1878), vytvořil řadu fotografických přístrojů a nafotografoval přes 20.000 snímků. Po kterých potvrdil Stanfordovo tvrzení. Ve vydání z května 1882 byl v časopisu Nature zveřejněn Muybridgeův článek, ve kterém napsal, že „v blízké budoucnosti, budou výsledky důležitých závodů záviset na fotografii, která bude určovat vítěze“. Nedlouho poté 25. června 1890 byla při koňských dostizích v New Jersey pořízena nejstarší známá cílová fotografie.



Obr 2-1 Eadweard J. Muybridge [6]



Obr 2-2 Výsledek pokusu Eadwearda J. Muybridge[6]

O největší problém při pořizování vysokorychlostních fotografií a taky filmu se brzy začal zajímat Harold Edgerton (1903-1990, Obr 2-3). Jeho výzkum dal zelenou pro další využívání vysokorychlostních kamer. Harold Edgerton přišel na způsob jak osvětlit scénu natolik, aby zachytil i velice rychlé děje a jevy, které již lidské oko není schopno zaznamenat. Pomocí stroboskopického světla dokázal zachytit třeba rozbití žárovky nebo let kulky. Díky jeho bádání dneska můžeme používat noční vidění, fotografovat pod vodou a podobné.



Obr 2-3 Harold Edgerton při jeho pokusech [8]

2.2 Historie vysokorychlostních kamer

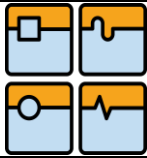


Obr 2-4 Vysokorychlostní kamera HYCAM [9]

V 30. letech 20. století se Bell Telephone Laboratories stala prvním zákazníkem pro vysokorychlostní kameru vyvinutou Estmanem Kodakem. Bell Labs využívali nahrávání na 16 mm filmu s rychlostí až 1000 obrázků za sekundu a měl 30 metrovou nahrávací kapacitu. Když Kodak odmítl vyvinout novou, ještě rychlejší kameru, tak Bell Labs si vytvořili vlastní vysokorychlostní kameru, Fastmax. Fastmax zvládl nahrát až 5000 obrázků za sekundu. Tuto kameru nakonec prodali společnosti Wester Electric, která ji okamžitě prodala společnosti Wollensak Optical, kde se její nahrávací rychlost vyšplhala až na 10000 obrázků za sekundu.

Fastmax se používala třeba při zachycení exploze nukleárních zbraní.

V 60. letech 20. století firma Redlake Laboratorie sestavila vysokorychlostní kameru s rotujícím hnanem HYCAM (Obr 2-4), která používala standartní 16 mm film a zaznamenávala taky až 10000 snímků za sekundu.



V 70. letech 20. století firma Video Logic Corporation (VLC) představila vysokorychlostní systém Instar, jenž byl schopen snímkovat. Dalším prosazovaným systémem byl systém značky Unilux, který využívala například společnost Sony, jenž dokázala zaznamenat 10 sekund dat o snímkovací frekvenci 120 snímků za sekundu.

V 80. letech 20. století se s prudkým rozvojem elektroniky prudce rozvinuly i vysokorychlostní kamery a objevily se první kamery schopné barevně nahrávat. Chopnost barevného zpracování obrazu představila jako první firma NAC a to v podobě svojí technologii NAC 200. Ale nebyla na trhu jediná. Společnost Palaroid představila svůj systém Mekel 300 schopný snímkovat s frekvencí až 300 snímků za sekundu a tento systém se prodával až do roku 1982, dokud se firma nerozhodla věnovat se filmařskému průmyslu.

Po roce 1980 se na trh vrátila firma Kodak se svojí vysokorychlostní kamerou MASD – 1000 a poté s novou verzí MASD - SP2000, který byl schopný nahrávat pouze černobíle ale za to mohl zaznamenat až 2000 snímků za sekundu při největším rozlišení 192 x 240 pixelů, pokud se rozlišení zmenšilo, tak tato kamera zaznamenala až 12 000 snímků za sekundu. Cena MASD - SP2000 se pohybovala kolem 140 000 USD a odbyt této kamery na trhu nebyl moc vysoký.

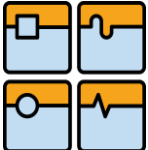


Obr 2-5 Vysokorychlostní kamera Kodak 4540 s příslušenstvím [10]

Roku 1991 vytvořila firma Photron kamerový systém 4540 (Obr 2-5), který začala vydávat pod záštitou známějšího gigantu – Kodaku. Tento systém byl schopen při plném rozlišení (256 x 256 obrazových bodů) zaznamenat až 4500 snímků za sekundu a při použití nižšího rozlišení až 40500 snímků za sekundu. Maximální paměť zařízení byla 1,1 sekundy, což byla zároveň maximální délka jedné sekvence. Cena tohoto zařízení se pohybovala stejně jako cena Kodaku MASD SP2000 (viz. obr. 1.5) okolo 140000 USD. [11]

Počínaje rokem 1994 na trh s vysokorychlostními kamerami vstoupila i další firma – Redlake Imaging. Ta nejprve uvedla na trh systém MotionScope MS 300, poté taky MS 250 a MS 500. Ty později nahradila přístroji HR 250 a HR 500. [11]

Firma Redlake Imaging ale změnila již navždy trh s vysokorychlostními kamerami, a sice díky malým pořizovacím nákladům. V dalších letech vývoj poskočil vývoj rapidně dopředu. [11]

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

Připomeňme si důležité milníky v historii vysokorychlostních kamer: [11]

- 1980 – První vysokorychlostní kamera využívající VHS záznam (HSV-200).
- 1983 – První vysokorychlostní kamera specializována pro vojenské účely (FHS-200).
- 1985 – První vysokorychlostní kamera specializována pro využití ve vzduchu (HVRB 200).
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající S-VHS záznam (HSV-1000).
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající technologii CMOS (HSV-1000).
- 1994 – První barevná vysokorychlostní digitální kamera (Memrecam Ci).
- 1994 – První vysokorychlostní digitální kamera využívající CMOS technologii (Memrecam Ci).
- 1995 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera (Memrecam C2S).
- 1997 – První vysokorychlostní kamerový systém schopný ukládat digitální i analogový záznam na pásku S-VHS (Memrecam C3 a HSV-500 C3).
- 2003 – První jednočipová vysokorychlostní digitální kamera s HD rozlišením 720p využitá v živém sportovním vysílání (Memrecam fx K3).
- 2005 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera s full HD rozlišením 1080i využitá současně jak pro vytváření zpomalených záznamů tak pro živé vysílání během sportovních utkání (Memrecam Hi- Motion).

Dneska vysokorychlostní kamery dokáží standardně zachytit 100 000 obrázků za sekundu. Takhle rychlé kamery jsou používány primárně ve výzkumu. Zatím nejrychlejší kamera dokáže zachytit šíření světelné vlny a toho dosahuje pomocí snímkovací frekvence až jednoho triliónu obrázků za sekundu.



3 Aplikace vysokorychlostních kamer v průmyslu

Průmysl se neustále vyvíjí. Je všeobecná snaha ještě o rychlejší výrobu, bezpečnější pracovní linku a kvalitnější výrobek. Abychom toho docílili, je třeba nejprve získat co nejvíce dat o daném problému, ději či pohybu a následně ho vyhodnotit. Tímto můžeme odstranit nedokonalosti a daný proces zrychlit nebo odstranit běžnému oku skryté chyby a nedokonalosti.



Obr 3-1 Využití v průmyslu [12]

Nyní se konečně dostáváme ke skutečným vysokorychlostním kamerám. Tyto kamery již nenajdete na pultech v běžných obchodech a ani na ně nenarazíte na internetových obchodech pro běžné spotřebitele. Většina takových kamer je totiž určena a využívána v průmyslu a tak je i podpora výrobců v tomto směru zaměřena. Výjimkou je pár firem, které se uvědomují, že jejich kamery je možné využít i ve sportu. [12]

V dnešní době bych rozdělil aplikaci vysokorychlostních kamer v průmyslu na tři hlavní oblasti:

- **Výroba**
- **Zkušebnictví**
- **Věda a výzkum**

Toto rozdělení je pouze zavádějící a v realitě se navzájem velice prolínají a zahrnují nespočet různých aplikací a využití.

3.1 Výroba

Ve výrobě se využívají pomalejší kamerové systémy s nejčastějším rozmezím 30 až 120 obrázků za sekundu. Je to z důvodu potřeby více menších kamer zároveň a to za co nejpříjemnější cenu. Kamery sledují buďto celou výrobní linku a kontrolují její chod nebo pouze sledují kvalitu vyráběných výrobků – tomuto využití kamer se říká „strojové vidění“

3.1.1 Výrobní linky

V každé výrobě je snaha vytvořit co nejplynulejší a co nejrychlejší výrobní linku. U sestavování takovýchto linek často lidskému oku unikne spousta drobných vad a nepřesností, které nakonec vedou k vyšší poruchovosti nebo zmetkovosti výroby. Na záznamech z vysokorychlostních kamer jsou jakékoliv nedokonalosti výrobní linky jasně viditelné a to je první krok k jejich odstranění. Využití se tedy najde u:

- nastavování, seřizování a diagnostika strojů a zařízení
- prediktivní údržbě
- výrobním, balících a třídících linek (Obr 3-2)
- etiketovacích strojích
- dopravnících
- obráběcích, řezacích a stříhacích stojích



3.1.2 Strojové vidění

Obr 3-2 Snímek pořízený při snímání rychlé výrobní linky na zátkování lahví [13]

Optické metody měření a následné zpracování digitalizovaného obrazu umožňují v průmyslu řešit většinu problémů spojených s měřením tvaru, rozměrů, barev, potisku, polohy, počtu identifikace, kvality povrchu, jejich vad a odchylek a dalších problémů spojených se všeobecnou kontrolou jakosti ve výrobě. [14]

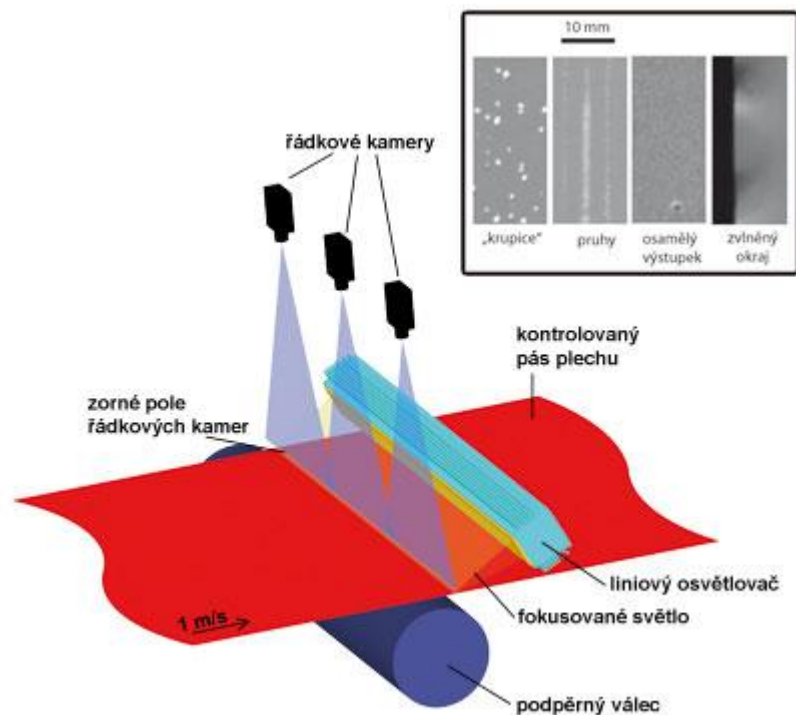
Výhody aplikací strojového vidění jsou v objektivizaci měření, nezávislých na lidském faktoru, v rychlosti a přesnosti, a dále v možnosti začlenit měřicí zařízení do výrobní linky a tím i přímo automaticky ovlivňovat parametry výroby. [14]

Základní princip systémů strojového vidění spočívá v tom, že kamery zachytí obraz zkoumaného předmětu a vyhodnotí ho podle předepsaného algoritmu. Na základě výsledku vyhodnocení provede řídicí systém akční zásah, nejčastěji je to označení nebo vyřazení vadného kusu. [14]

Takovéhoto využívání kamer při výrobě je nespočet. Pro příklad uvedu použití kamer firmou FCC Průmyslové systémy při kontrole kvality lakování plechu.



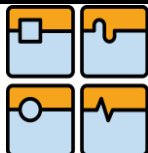
Na pásu plechu šíře 1,5 m běžícím rychlostí téměř 1 m/s bylo třeba detekovat a klasifikovat vady o rozměrech od 0,5x0,5 mm. Proto byly ve výšce cca 1,2 m nad povrchem plechu umístěny tři řádkové kamery s rozlišením 2 048 pixelů. Kamery jsou propojeny gigabitovým ethernetem s průmyslovým PC, kde se provádí analýza obrazu. Software vyvinutý ve firmě FCC průmyslové systémy rozliší vady izolované (nečistota, bublinky, kapky), vady shlukové (lak s povrchem „krupice“), vady okraje plechu (zvlněný okraj, barva steklá do kapek na okraji), vady spojitě (čáry, rýhy), vady plošné (výpadky v nanášení laku) a vady periodické (způsobené např. poškrábaným válcem).[15]



Obr 3-3 Strojové vidění [15]

3.2 Zkušebnictví

Vysokorychlostní kamery najdou uplatnění i při mechanických zkouškách odolnosti a vlastností různých materiálů (odolnost proti nárazu a průrazu, průběh lomu, průběh tvorby třísky) anebo při zkouškách celých výrobků nebo sestav, kde se kontroluje působení vibrací, rázu, tlaku a deformací. Velké uplatnění si vysokorychlostní kamery našly hlavně v leteckém, automobilovém a zbrojním průmyslu, kde zkoušky probíhají za velmi vysokých rychlostí a kde je důležitý každý snímek navíc.



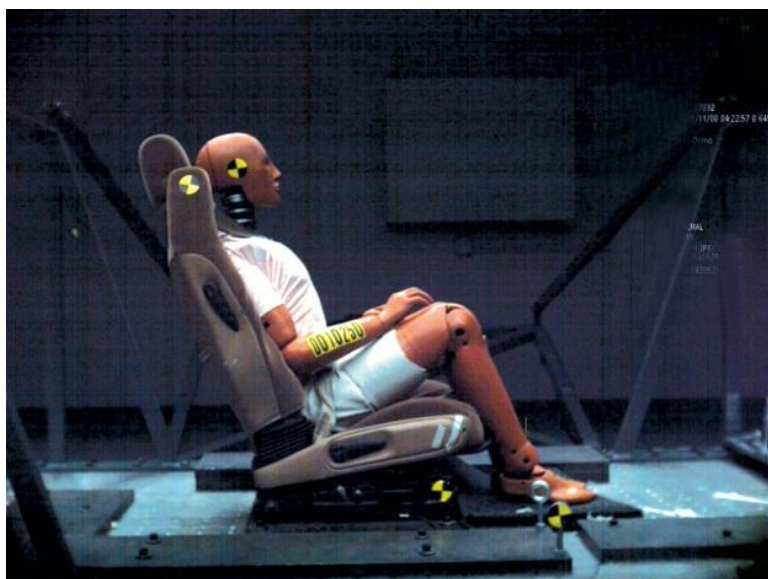
3.2.1 Automobilový průmysl



Obr 3-4 Crash test [16]

Bezpečnost se v automobilovém průmyslu stala velice důležitým faktorem a za její neustálé zlepšování stojí právě vysokorychlostní kamery, které dokážou náraz automobilu spolehlivě zachytit. Samotný náraz se odehrává ve zlomku sekundy a je toho spousta co je nutné zachytit a zkoumat. Jedná se o:

- čelní nárazová zkouška se provádí při rychlosti 64 km/hod do přesazené deformovatelné bariéry (Obr 3-5)
- boční nárazová zkouška při rychlosti 50 km/hod
- boční náraz do stromu při rychlosti 29 km/hod
- zkoušky bezpečnosti chodců při rychlosti 40 km/hod.



Obr 3-5 Pozorování nárazu na figuríně [17]



Výsledky crash testů se následně vyhodnocují podle míry nárazu na jednotlivé lidské partie (Obr 3-6). Na jednotlivých částech lidského těla jsou přidány body, které kamera snímá. Tento záznam dále putuje do speciálního softwaru na vyhodnocení. Z výsledků lze zjistit, jak velké zranění daný náraz způsobí. Vyhodnocuje se zranění jak u řidiče, tak u spolujezdce, dítěte a chodce.



Obr 3-6 Grafické znázornění míry bezpečí dospělé posádky vozu [17]

Vysokorychlostní kamery se v automobilovém průmyslu dále využívají při:

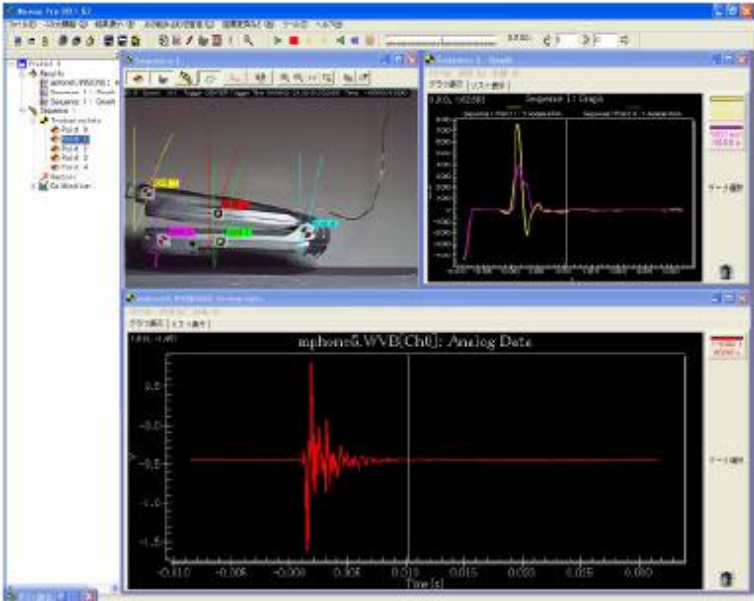
- zkoumání proudění vzduchu v aerodynamických tunelech
- testech brzdových systémů
- účinnosti air bagů a pásů (Obr 3-7)
- pozorování vstřikování paliva v motoru



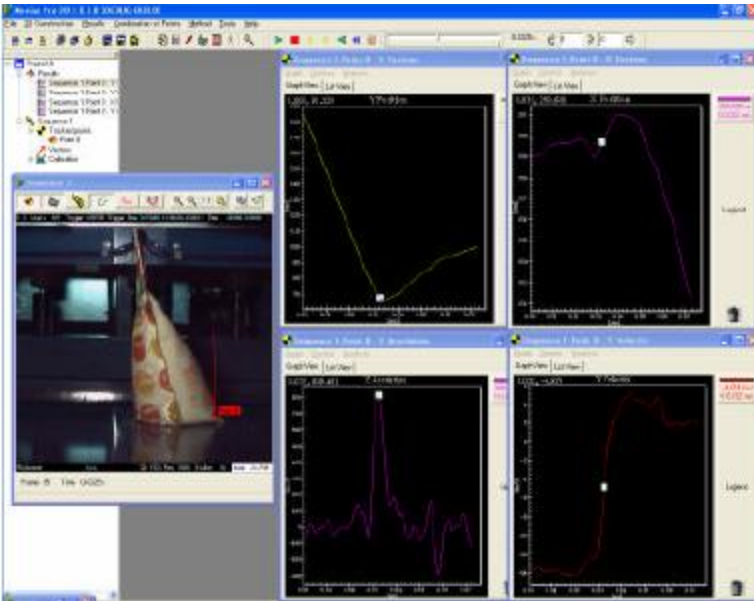
Obr 3-7 Test účinnosti airbagů [18]

3.2.2 Drop test – zkouška pádem

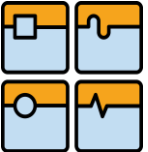
Další možnost kontroly výdrže vyrobených zařízení nebo jakýkoliv předmětů je drop test neboli zkouška pádem. Zde se vysokorychlostní kamery (na obrázku 3-8 a 3-9 je použita kamera HotShot 512 sc) využívají při nahrávání padajícího předmětu a poté se pořízený záznam, třeba pomocí USB2.0, přenesou do PC. Pro ještě přesnější měření se používají vysokorychlostní kamery současně s akcelerometry. Nasnímaný záznam se poté převede na obrázky pomocí speciálního softwaru MOVIAS. To trvá několik minut vzhledem k výkonosti PC. Jednotlivé obrázky jsou následně softwarem vyhodnoceny a zobrazeny do grafů. Jedná se o graf polohy, posunutí a zrychlení.



Obr 3-8 Výsledky drop testu s mobilem [19]



Obr 3-9 Výsledky drop testu se sáčkem s tekutinou [19]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 27
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE		

3.2.3 Zbrojní průmysl – balistické zkoušky



Obr 3-10 Projektil broku [20]

Při **balistických experimentech** umožňuje rychlokamera analyzovat velmi rychle probíhající jevy související s výstřelem střelné zbraně. Ve vnitřní balistice jsou možnosti studia pohybu střely s využitím rychlokamery omezené. Stěny hlavní bohužel nejsou transparentní a v brzké době určitě ani nebudou. Určité možnosti využití rychlokamery jsou při snímání pohledem do ústí hlavně s využitím prostřelovaného zrcadla. [20]

V oblasti přechodové balistiky umožňuje rychlokamera zobrazit chování střely na ústí hlavně, výtok plynů z hlavně a jejich dodatečný účinek na střelu. Významnou úlohu může sehrát i při analýze funkce různých ústřových zařízení (kompenzátor zdvihu, ústřová brzda, tlumič plamene, tlumič hluku apod.). Ve vnější balistice lze obrazový záznam rychlokamery využít pro analýzu pohybu střely na dráze, hodnocení její rychlosti (postupného i rotačního pohybu) a stability. V koncové balistice lze kamerou sledovat dopad střely do cíle, popř. i pronikání střely cílem, které je doprovázeno funkčními změnami samotné střely i cíle. V ranivé balistice jsou zaznamenávány interakce střely s tkáněmi, resp. jejich substitucemi, zejména substitucemi transparentními, jako jsou želatiny a gely. Velký prostor se otvírá pro použití rychlokamer při hodnocení účinků neletálních střel na živé cíle nebo jejich substituce. [20]

U zbraní lze kamerou zaznamenat a posléze kvantifikovat pohyb různých důležitých i méně důležitých prvků, které mohou ovlivňovat (kladně i záporně) funkci zbraně. Pro konstruktéry samonabíjecích a především automatických zbraní je důležité znát určující parametry pohybu závěrového mechanismu. Pokud je použito kontaktních metod měření, dochází těmito metodami k ovlivnění pohybu funkčních částí zbraně a tím i ke zkreslení skutečného děje. Vysokorychlostní kamery zaznamenávají děj nekontaktně a ten tudíž není snímáním negativně ovlivněn. Další výhodou je sledování součástí zbraně, na které nelze (podobně jako u munice) umístit snímač, nebo nelze jejich pohyb zaznamenat jinými nekontaktními metodami. Záznam vysokorychlostní kamery umožňuje kvalitativně nové přístupy k analýze funkce zbraně s uvážením vysokofrekvenčního kmitání mechanických částí zbraně, které bylo konstruktérům do nedávné doby "utajeno". Tím lze výrazně přispět k poznání funkce zbraně a k optimalizaci její konstrukce i funkce. [20]

Zbraně jsou nejčastěji snímány rychlokamerou za účelem záznamu funkčního cyklu, s jehož pomocí lze sestavit funkční diagram zbraně (časová závislost dráhy závěru) a také pohybu zbraně (lafetované, nebo držené v ruce). Dále lze sledovat dráhu vyhozené nábojnice, zda nekoliduje se součástmi zbraně. Kamera umožňuje i

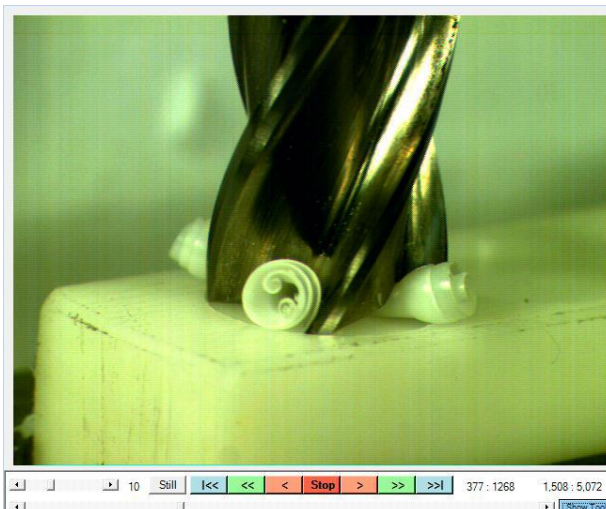
odhalit, zda nedochází k předčasnému otevírání závěru nebo k zádržkám při odemykání závěrového uzlu, či při zasouvání náboje do nábojové komory. Lze sledovat pohyb závěru a dalších částí zbraně při dynamickém namáhání během funkce automatiky zbraně. Dochází-li např. vlivem netěsností k úniku prachových plynů v odběrovém zařízení automatické zbraně s pohonem automatiky odběrem plynů z hlavně, lze tuto skutečnost snadno odhalit právě použitím rychlokamery. [20]

3.2.4 Analýza tvorby třísky

Vysokorychlostní kamery kontrolují správnost chodu výrobních strojů a jejich součástí.

Při frézování a jiných obráběcích prací se zkoumá například vhodnost zvolené geometrie nástroje, zrychlení a rychlost třísky odcházející z místa řezu.

Na obrázku lze vidět správnou tvorbu třísky pořízenou při frézování plastu POM (Polyoxymetylén).

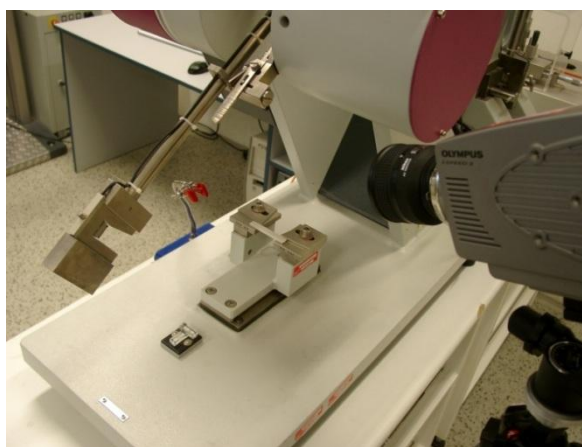


Obr 3-11 Frézování plastu POM [21]

3.2.5 Rázové zkoušky - metoda „Charpy“

Rázové zkoušky určují lomovou houževnatost materiálu tj. odolnost materiálu vůči křehkému lomu. Zkoušení odolnosti materiálu vůči křehkému lomu může mít různé účely: posouzení pravděpodobnosti výskytu křehkého lomu daného materiálu namáhaného za určitých podmínek, výběr nejvhodnějšího materiálu, kontrola kvality při výrobě, vyšetření příčin lomů vyskytnutých v provozu, získání údajů pro potřeby konstrukce

(např. nejnižší provozní teplota, maximální přípustná délka trhliny).



Obr 3-12 Rázová zkouška - metoda "Charpy" a kamera i-SPEED 3 [22]



3.3 Věda a výzkum

Svět vědy a výzkumu neustále posouvá vývoj vysokorychlostních kamer vpřed. Ve výzkumu jde vždy o jednu věc – zachytit děj, pohyb nebo reakci na záznam a následně vyhodnotit. Zní to jednoduše, ale je třeba si uvědomit, že dneska se vědci zabývají ději probíhající v rozmezí několika nanosekund. Těmto kamerám se už neříká vysokorychlostní, ale **ultrarychlé kamery**.

A tímto se dostáváme na fyzickou hranici všech záznamových zařízení, protože nic, se ve vesmíru nepohybuje rychleji než světlo.

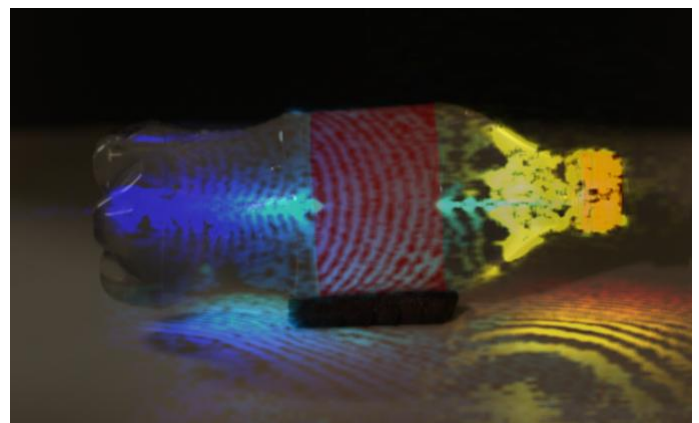


Obr 3-13 Nejrychlejší vysokorychlostní kamera - až jeden bilion snímků za sekundu [23]

3.3.1 Rychlost světla

Fotony jsou ve známém vesmíru nejrychlejší částice a výzkumníkům z americké univerzitní laboratoře MIT Media Lab se povedlo vytvořit kamerový systém, schopný zviditelnit jejich pohyb prostorem lidskému oku. Pro tento pokus vědci sestavili zařízení tvořící sada pěti set senzorů, které se střídaly ve snímání scény s prodlevou jedné bilióntiny sekundy. Pro osvětlení použili titan-safírový laser a z nasnímaných dat následně vytvořili záznam, na němž je vidět pohyb fotonů při kontaktu s různými materiály. Tomuto systému vědci říkají „konečný“ obrazový systém.

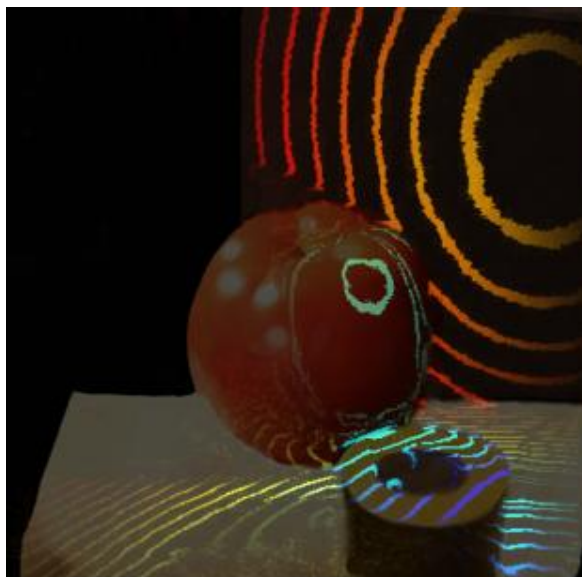
Tento systém je založený na fotoaparátu se sériovým snímáním, který pomocí clony utvoří úzkou štěrbinu a vznikne tak obraz světelných částíček nebo fotonů, které štěrbinou procházejí. Samotné vytvoření videa zachycujícího rychlost světla však trvalo celou hodinu, protože k utvoření dvojrozměrného obrazu museli vědci tento experiment provést opakovaně.



Obr 3-14 Šíření světla v plastové láhvi[24]

Systém má ale velké limitace, není schopen zaznamenat neopakující se děje. Kamera snímá jen velice úzký pruh (max. 0.5mm), takže pro sestavení celé zaznamenávané scény je třeba stále se opakujícího děje, jako je právě šíření světla. Fotony totiž statisticky neustále cestují jednou a tou samou cestou v opakujících se pulzech.

Takhle rychlý kamerový systém se v budoucnu bude využívat třeba při záznamu průchodu světla přes lidské orgány v medicíně. Tímto bude možné nahradit ultrazvuk a v průmyslu bude pomocí světla možné odhalovat mikroskopické defekty různých materiálů.

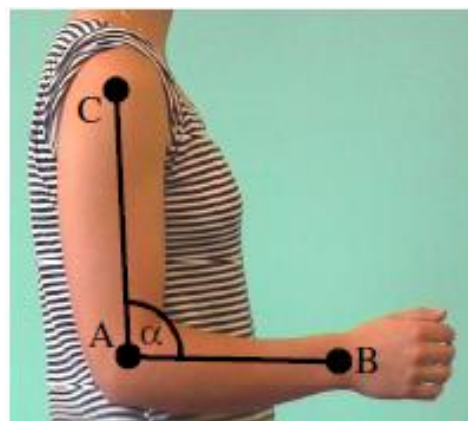


Obr 3-15 Šíření světla na různých materiálech (jablko) [24]

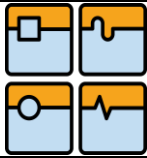
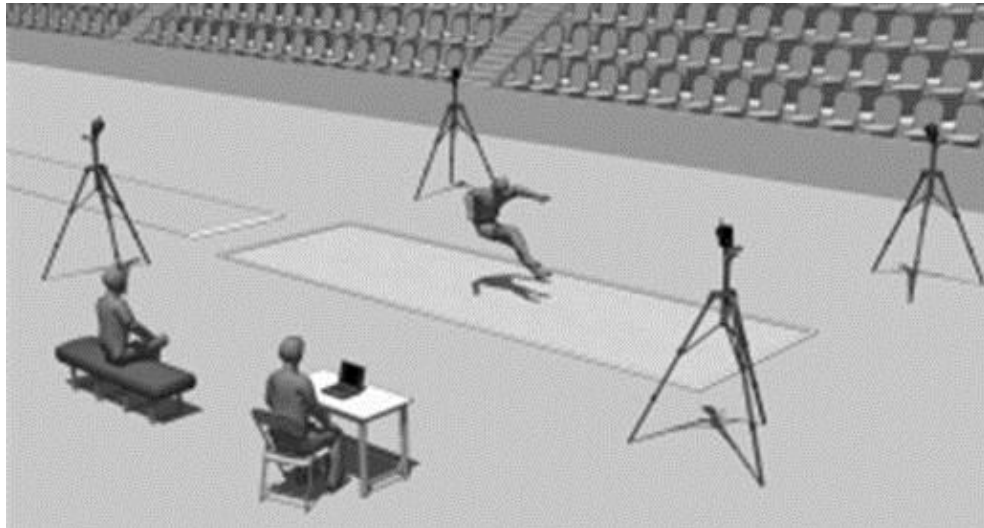
3.3.2 Biomechanika

Vysokorychlostní záznam pohybu nám v biomechanice umožní studovat jakékoliv pohyby člověka a zvířat. Po následné důkladné analýze (2D a 3D analýza) jsou konstruktéři a designéři schopní tyto pohyby napodobit nebo se jimi nechají inspirovat.

Vzhledem k tomu, že je biomechanika zjednodušeně spojením mechaniky, vědy o pohybu, a biologie, vědy o živých organismech, můžeme její metody rozdělit na takové, zabývající se fyzikální podstatou pohybu, zjišťující jeho příčiny, charakteristiky a parametry, a na metody biologické, věnující se vlastnostem a možnostem živých organismů a jejich částí v souvislosti s pohybem. Mezi metody zkoumající pohyb z fyzikálního pohledu patří kinematická analýza. [26]



Obr 3-16 Anatomické body pro digitalizaci [25]

**Kinematická analýza pohybu:**

Obr 3-17 Umístění kamer při kinematické analýze [26]

Kinematická analýza se dělí na:

- **Kvalitativní analýzu**
- **Kvantitativní analýzu**

Při kvalitativní analýze se popisuje a hodnotí pohyb pouze slovně ze záznamu a to bez znalosti konkrétních fyzikálních veličin. Při této analýze se pouze seznamuje s daným pohybem. Zde záleží na zkušenosti a odbornosti posuzovatele ve vyhodnocení záznamu. Neznalost veličin neumožní další studování tohoto pohybu.

Při kvantitativní analýze jsou naopak výstupem už přímo číselné hodnoty (udávající velikost fyzikálních veličin – Obr 3-18). Tyto hodnoty jsou získávány pomocí zachycení pohybu daných bodů na zkoumaném objektu a jejich následným sledováním. Při využití vysokorychlostních kamer se vyhodnocují kinematické veličiny jako je dráha a úhel. Jejich derivacemi v závislosti na čase se odvodí další veličiny.

<i>Veličina</i>	<i>Značka</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Značka</i>
čas	t	sekunda	s
dráha	s	metr	m
lineární rychlost	v	metr za sekundu	$m \cdot s^{-1}$
lineární zrychlení	a	metr za sekundu na druhou	$m \cdot s^{-2}$
úhel	φ	radián	rad
úhlová rychlost	ω	radián za sekundu	$rad \cdot s^{-1}$
úhlové zrychlení	ε	radián za sekundu na druhou	$rad \cdot s^{-2}$

Obr 3-18 Veličiny pro kvantitativní analýzu [25]

Kvantitativní analýza se provádí pomocí programů jako je Logger Pro 3. Jako příklad může sloužit výzkum z Cambridgeské Univerzity, kde za pomoci vysokorychlostních kamer a kvantitativní analýzy zjistili zrychlení blechy ve skoku. Tato hodnota činila 1500 m/s^2 , to je přetížení 150g! A to nebylo jediné překvapení v pozorování vysokorychlostního záznamu. Při skoku blecha vůbec nepoužívá její kolena, ale pouze palce na nohou.

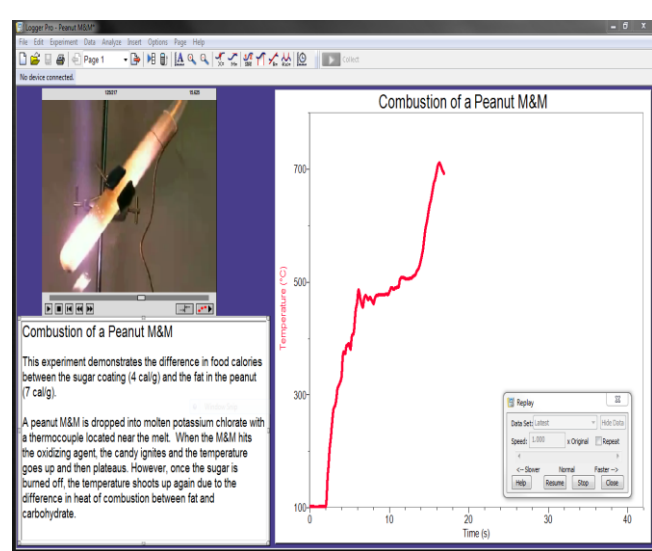


Obr 3-19 Blecha ve skoku [27]

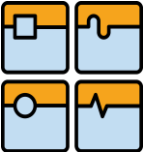
3.3.3 Video analýzy v chemii

V laboratořích probíhá pozorování nejrůznějších chemických reakcí. Před vynálezem vysokorychlostní kamery bylo u rychlých dějů možné pozorovat látky pouze před a po reakci. S vysokorychlostní kamerou se vědcům otevírá nový rozměr, kterým je zkoumání látek přímo v průběhu rychlých reakcí.[28]

Spojením vysokorychlostních kamer s programem Logger Pro, umožní pořizovat záznam chemických reakcí různých látek a v reálném čase je vyhodnocovat. U pokusu na Obr 3-20 se sleduje uvolňování energie při reakci cukru s chlorečnanem draselným. Při chemických dějích, vysokorychlostní kamery slouží k sledování nárůstu teploty a stanovování bodu tání.



Obr 3-20 Video analýza [29]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 33
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

4. Závěr

V první části práce jsem se snažil o stručný popis vysokorychlostních kamer. V tomto popisu vysokorychlostních kamer jsem se zaměřil hlavně na jejich, podle mě, nejdůležitější rozdělení a tím je jejich konstrukce. Ta určuje jejich následné použití v různém odvětví průmyslu. Při popisu principu fungování vysokorychlostních kamer jsem se snažil zase o názorné zdůvodnění jejich potřeby při pozorování velice rychlých jevů a dějů. Vysokorychlostní kamery používané v průmyslu jsou specializované zařízení, která jsou pro běžné lidi skoro nedostupné a na trhu se výrobou vysokorychlostních kamer zabývají převážně jen velké společnosti.

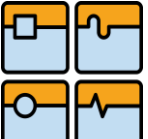
Už z historie je vidět jejich potřeba a důležitost při zkoumání jevů a získávání tak důležitých odpovědí. Dříve vysokorychlostní záznam sloužil k určení vítěze v sázkách boháčů, dneska slouží k zvyšování bezpečnosti automobilů, kontrole kvality výrobků, zkoumání pohybů atd.

V poslední části jsem se snažil o rozdělení a popis jejich možných aplikací přímo v průmyslu. Rozdělení, které jsem zvolil je pouze zavádějící a některé jejich aplikace tak mohou spadat pod více než jeden bod tohoto rozdělení. Z každé kategorie jsem se snažil vybrat nejdůležitější aplikace a názorně je popsat. Jejich další možné aplikace jsou nespočetné, ale musí se dbát na jejich rozumném využití a nutnosti potřeby při daném problému.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 34
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

5. Seznam použitých zdrojů

- [1] SVOBODA, Štěpán. Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek. In: [Http://www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz) [online]. 2004 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518
- [2] I-SPEED 2. In: OLYMPUS [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/hsv-products/i-speed-2-new-features/>
- [3] Photron.com: information on high speed imaging [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Photron. Dostupné z: <http://www.photron.com/index.php?cmd=camera>
- [4] FAST VIDEO NW. The TroubleShooter: Put the the power of high-speed imaging in tha palm of your hand [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.fastvideonw.com/TroubleShooter_Datasheet.pdf
- [5] HAVLE, Otto. Strojové vidění IV: Osvětlovače. In: [Http://www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz) [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36988
- [6] Eadweard Muybridge. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge
- [7] Osobnosti.cz [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Eadweard Muybridge. Dostupné z: <http://zivotopis.osobnosti.cz/eadweard-muybridge.php>
- [8] Massachusetts Institute of Technology [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Harold Edgerton. Dostupné z: http://web.mit.edu/invent/iow/images/flashes_balloon.gif
- [9] Visinst.com [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupný z: <http://www.visinst.com/Hycam.html>
- [10] [Http://www.techsales.pro](http://www.techsales.pro) [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Kodak 4540. Dostupné z WWW: <http://www.techsales.pro/sites/prodimages/kodak-4540-ektapro-high-speed-video-camera-251630-a.jpg>
- [11] MEJZLÍK, Tomáš. Vysokorychlostní kamera v akci. In: [Http://www.tvfreak.cz](http://www.tvfreak.cz) [online]. 11.11.2010 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: : <http://www.tvfreak.cz/vysokorychlostni-kamera-v-akci/3762-2>
- [12] Hi-Speed - vysokorychlostní kamery. In: [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.videoanalyza.cz/vysokorychlostni-kamery>
- [13] SVOBODA, Štěpán. [Http://www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz) [online]. 2004 [cit. 2013-05-23]. Digitální vysokorychlostní kamery pomáhají řešit problémy chodu strojů a výrobních linek. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32518

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 35
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE		





- [14] SYSTÉMY STROJOVÉHO VIDĚNÍ: „ŘÍDÍME KVALITU“. In: <http://www.eola.cz> [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.eola.cz/cs/produkty-a-sluzby/opticka-kontrola-kvality>
- [15] Strojové vidění hlídá kvalitu v lakovně plechu. In: [Http://www.strojovevideni.cz](http://www.strojovevideni.cz) [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.strojovevideni.cz/default.asp?inc=inc/reference.htm&id=20>
- [16] [Http://www.nacinc.com](http://www.nacinc.com) [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Autosafety2. Dostupné z: <http://www.nacinc.com/images/autosafety2.jpg>
- [17] [Euroncap.com](http://www.euroncap.com) [online]. 2001 [cit. 2013-05-23]. EURONCAP. Dostupné z: http://www.euroncap.com/tests/peugeot_307_2001/107.aspx
- [18] An airbag deploying during a crash test. In: [Http://www.masterfile.com](http://www.masterfile.com) [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.masterfile.com/stock-photography/image/653-03613134/An%20airbag%20deploying%20during%20a%20crash%20test>
- [19] CAMPBELL, Bill. Drop Testing of Small Size Product Packaging Designs. In: [Http://www.nacinc.com](http://www.nacinc.com) [online]. 2006 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.nacinc.com/support/how-are-others-using-nac-high-speed-cameras/application-note-drop-testing.pdf>
- [20] KOMENDA, Jan; NOVÁK, Miroslav. Ruce vzhuru: Co je vysokorychlostní kamera? [online]. 2008 [cit. 2013-05-23]. Rucevzhuru.cz. Dostupné z: <http://www.rucevzhuru.cz/index.php/component/content/article/53-rychllokamery/133-kamery.html>
- [21] ANALÝZA TVORBY TŘÍSKY POMOCÍ DIGITÁLNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY. Brno, 2010/2011. ISBN 80-85825-10-4. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=33770. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [22] Krátkodobé zkoušky mechanických vlastností materiálů. In: [Http://www.chempoint.cz](http://www.chempoint.cz) [online]. 31.10.2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kratkodobe-zkousky-mechanicky-vlastnosti-materialu>
- [23] ROZEHNAL, Ivo. Nová kamera dokáže zachytit rychlost světla In: [Http://procproto.cz](http://procproto.cz) [online]. 20.12.2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://procproto.cz/veda-a-technika/technologie/nova-kamera-dokaze-zachytit-rychlost-svetla/>
- [24] Femto-Photography: Visualizing Photons in Motion at a Trillion Frames Per Second. In: [Http://web.media.mit.edu](http://web.media.mit.edu) [online]. 2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://web.media.mit.edu/~raskar/trillionfps/>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 36
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

- [25] JANURA, M. METODY BIOMECHANICKÉHO VÝZKUMU: Kinematická analýza pohybu v biomechanice. In: [Http://ftk.upol.cz](http://ftk.upol.cz) [online]. 2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://ftk.upol.cz/fileadmin/user_upload/FTK-katedry/biomechanika/BIOM_Metody_biomechanickeho_vyzkumu.pdf
- [26] VÝZKUMNÉ METODY V BIOMECHANICE. In: [Http://www.fsps.muni.cz](http://www.fsps.muni.cz) [online]. 2012 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/inovace-SEBS-ASEBS/elearning/biomechanika/vyzkumne-metody-v-biomechanice>
- [27] SUTTON, G. P a M. BURROWS. Biomechanics of a Jumping Flea. In: [Http://www.vernier.com](http://www.vernier.com) [online]. 2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.vernier.com/innovate/biomechanics-of-a-jumping-flea/>
- [28] Video Analysis in Chemistry. In: [Http://www.vernier.com](http://www.vernier.com) [online]. 29.7.2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.vernier.com/innovate/video-analysis-in-chemistry/>

6. Seznam obrázků

Obr 1-1 Vysokorychlostní kamera TroubleShooter [1]	11
Obr 1-2 Vysokorychlostní kamera i-SPEED 2 [2]	11
Obr 1-3 Připojovací schéma i-SPEED 2	12
Obr 1-4 Kamera se snímkovací frekvencí 30 obrázků za sekundu [3]	13
Obr 1-5 Kamera se snímkovací frekvencí 240 obrázků za sekundu [3]	13
Obr 1-6 Vysokorychlostní kamera TroubleShooter [4]	14
Obr 1-7 Schéma plošného osvětlení pole [5]	15
Obr 1-8 Schéma kruhového osvětlovače [5]	16
Obr 1-9 Schéma kopulového osvětlovače [5]	16
Obr 2-1 Eadweard J. Muybridge [6]	17
Obr 2-2 Výsledek pokusu Eadwearda J. Muybridge[6]	17
Obr 2-3 Harold Edgerton při jeho pokusech [8]	18
Obr 2-4 Vysokorychlostní kamera HYCAM [9]	18
Obr 2-5 Vysokorychlostní kamera Kodak 4540 s příslušenstvím [10]	19
Obr 3-1 Využití v průmyslu [12]	21
Obr 3-2 Snímek pořízený při snímání rychlé výrobní linky na zátkování lahví [13] ...	22
Obr 3-3 Strojové vidění [15]	23
Obr 3-4 Crash test [16]	24
Obr 3-5 Pozorování nárazu na figuríně [17]	24
Obr 3-6 Grafické znázornění míry bezpečí dospělé posádky vozu [17]	25
Obr 3-7 Test účinnosti airbagů [18]	25
Obr 3-8 Výsledky drop testu s mobilem [19]	26
Obr 3-9 Výsledky drop testu se sáčkem s tekutinou [19]	26
Obr 3-10 Projektil broku [20]	27
Obr 3-11 Frézování plastu POM [21]	28
Obr 3-12 Rázová zkouška - metoda "Chapry" a kamera i-SPEED 3 [22]	28
Obr 3-13 Nejrychlejší vysokorychlostní kamera - až jeden bilion snímků za sekundu [23]	29
Obr 3-14 Šíření světla v plastové láhvi[24]	29
Obr 3-15 Šíření světla na různých materiálech (jablko) [24]	30
Obr 3-16 Anatomické body pro digitalizaci [25]	30
Obr 3-17 Umístění kamer při kinematické analýze [26]	31
Obr 3-18 Veličiny pro kvantitativní analýzu [25]	31
Obr 3-19 Blecha ve skoku [27]	32
Obr 3-20 Video analýza [29]	32

		Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 38
		BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	