

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF METROLOGY AND QUALITY ASSURANCE TESTING

METODIKA ZKOUMÁNÍ RYCHLÝCH
A STOCHASTICKÝCH MECHANICKÝCH DĚJŮ
METHODOLOGY OF FAST AND STOCHASTIC MECHANICAL PROCESS RESEARCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr KOLOMAZNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír PATA, Dr.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav metrologie a zkušebnictví

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Kolomazník Petr

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

obor: **Řízení jakosti (3911T023)**

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 diplomové práce:

Metodika zkoumání rychlých a stochastických mechanických dějů

v anglickém jazyce:

Methodology of fast and stochastic mechanical process research

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce s vysokorychlostním kamerovým systémem firmy Olympus při zkoumání a následném vyhodnocení vysoce rychlých a stochastických dějů.

Cíle diplomové práce:

- 1.Seznámení se s řadou norem ČSN EN 10 30 se zaměřením na ČSN EN 13 30 1, 13 30 2, 13 30 10
- 2.Nedestruktivní zkoušení – vizuální kontrola dle ČSN EN 13 018 a 13 927
- 3.Využití systému i-SPEED II firmy Olympus pro zkoumání rychlých a stochastických dějů
- 4.Možnosti softwaru pro vyhodnocování rychlých a stochastických dějů (využití testu USAF 1951 3-Bar Resolving Power Test Chart
- 5.Návrh zpřesnění polohovacího zařízení pro systém i-SPEED II

Seznam odborné literatury:

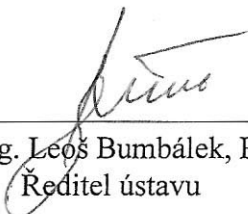
- ČSN EN 1330-1 Nedestruktivní zkoušení - Terminologie –
Část 1: Všeobecné termíny
ČSN EN 1330-2 Nedestruktivní zkoušení - Terminologie –
Společné termíny pro metody nedestruktivního zkoušení
ČSN EN 1330-10 Nedestruktivní zkoušení - Terminologie

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

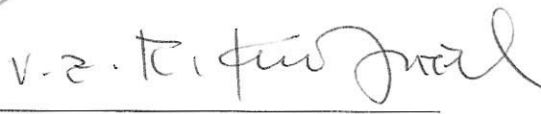
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 3.12.2007





doc. Ing. Leoš Bumbálek, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Petr Kolomazník

Metodika zkoumání rychlých a stochastických mechanických dějů
Diplomová práce, Ústav metrologie a zkušebnictví, VUT FSI v Brně

Tato diplomová práce se zabývá rychlými ději, jejich zachycením a následným vyhodnocením. Rychlé děje jsou snímány vysokorychlostním kamerovým systémem Olympus i-SPEED 2. Předmětem praktického měření je ústová rychlost střely typu Diabolo vystřelené ze vzduchové pistole.

Klíčová slova:

Rychlé děje, vysokorychlostní kamerový systém, balistika.

ANNOTATION

Petr Kolomazník

Methodology of fast and stochastic mechanical process research
Diploma thesis, Institute of Metrology and Quality Assurance Testing, Brno VUT FME

This diploma thesis deals with the research of fast processes. It delineates technique the process is captured by with following interpretation of the results received. Fast processes are captured using high speed video camera system Olympus i-SPEED 2. The actual object of measuring and examination was an air pistol and its initial velocity.

Key words:

Fast process, high speed video camera system, ballistics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLOMAZNÍK, P. Metodika zkoumání rychlých a stochastických mechanických dějů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Pata, Dr.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Místopřísežně prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně. Při jejím vypracování jsem respektoval ustanovení předpisů pro diplomové práce a jsem si vědom toho, že v případě jejich nedodržení nebude moje diplomová práce vedoucím diplomové práce přijata.

V Brně dne

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Za podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimíru Patovi, Dr. a všem, u kterých jsem našel pomoc při řešení dané problematiky.

OBSAH

0	Úvod	10
1	Rychlé děje	11
1.1	Děje periodické	11
1.2	Děje aperiodické	11
1.3	Děje stochastické	11
2	Vysokorychlostní kamerové systémy	11
2.1	Představení	11
2.2	Základní typy vysokorychlostních kamer	12
2.2.1	Kompaktní sestava	12
2.2.2	Modulární systém	13
2.3	Vysokorychlostní kamerový systém Olympus i-SPEED 2	15
2.3.1	Technické údaje	15
2.4	Vysvětlení pojmů	18
2.4.1	Snímkový kmitočet, rozlišení, délka záznamu	18
2.4.2	Doba integrace	18
2.4.3	Vnitřní kruhová paměť kamery	18
2.4.4	Spoušť	19
2.4.5	Snímač, FPN, kalibrace FPN	20
2.4.6	Osvětlení	20
2.4.7	Hledáček	21
2.4.8	Objektivy	21
2.4.9	Elektronická závěrka (Shutter)	22
3	Balistika	25
4	Měření ústřové rychlosti vzduchové pistole	26
4.1	Pomůcky měření	26
4.1.1	Vzduchová pistole	26
4.1.2	Vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED 2	27
4.1.3	Světelný zdroj	28
4.1.4	Další pomůcky měření	29

4.2	Měření.....	29
4.2.1	Příprava měření	29
4.2.2	Vlastní měření.....	32
4.2.3	Přenos nasnímaného děje	32
4.3	Postup při analýze vysoce rychlého děje	33
4.4	Měření střely Diabolo	39
4.5	Analýza vysoce rychlého děje.....	41
4.6	Výpočet neostrosti programem „Lens Calculator“	44
5	Možnosti zpřesnění měření.....	47
5.1	Polohovací zařízení	48
6	Rozvaha nejistoty měření.....	52
6.1	Nejistota snímání	52
6.2	Nejistota analýzy	52
7	Závěr.....	54
8	Seznam použitých zdrojů.....	55
9	Klíčové výrazy v Angličtině.....	57
10	Seznam použitých zkratk a symbolů	58
11	Seznam obrázků	59
12	Seznam tabulek	60
13	Seznam použitého softwaru.....	60
14	Seznam příloh.....	60

0 ÚVOD

Dnešní požadavky na vysokou produktivitu mají za následek zrychlování všech procesů. U rychlých průmyslových zařízení je často třeba provést záznam a analýzu extrémně rychlých dějů pro následnou optimalizaci. Vysokorychlostní kamerové systémy jsou ve světové vědecké praxi stále více využívány. Jedná se nejen o testy bezpečnosti automobilů, ale především o snímání a následné vyhodnocení trajektorií komplikovaných strojních mechanismů, robotických linek, vyšetřování utváření třísek při vysokorychlostních obráběcích procesech a podobně.

Tato diplomová práce si klade za cíl přiblížit využití systému i-SPEED 2 firmy Olympus pro zkoumání rychlých dějů a popsat možnosti softwaru pro vyhodnocení rychlých dějů. Dalším cílem je vytvoření návrhu na zpřesnění polohovacího zařízení pro vysokorychlostní kamerový systém.

1 RYCHLÉ DĚJE

1.1 Děje periodické

Jako periodický děj můžeme obecně nazvat jakýkoli děj, u něhož se pravidelně opakuje změna libovolné fyzikální veličiny (např. teplota, tlak, elektrické napětí) [19]. Obecněji se hovoří o periodickém ději vždy, když veličina X popisující daný děj je periodickou funkcí času [20].

$$X(t) = X(t + T) \quad (1)$$

Kde: T – perioda

1.2 Děje aperiodické

Aperiodický pohyb je zvláštní případ pohybu svou povahou periodického, kdy však tlumení je tak veliké, že periodickému pohybu zabrání [1].

1.3 Děje stochastické

Děje stochastické (náhodné) jsou děje, kde může pozorování v daných podmínkách vést k různým výsledkům [12]. Při stejných podmínkách není výsledek vždy stejný. Závisí tedy na dalších neznámých faktorech. Pokud se při změně podmínek objeví systematickosti, trend, může to pomoci neznámé faktory objevit. Jestliže tomu tak není, zůstávají výsledky neovlivnitelné, jsou náhodné čili stochastické [10].

2 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROVÉ SYSTÉMY

2.1 Představení

Vysokorychlostní kamerové systémy zachycují a ukládají digitální snímky do interní zabudované paměti, odkud se kopírují do počítače, kde mohou být dále softwarově zpracovány a vyhodnocovány. Výhodou těchto zařízení je možnost zpomaleného přehrání, nebo i následná analýza dějů po jednotlivých snímcích, což umožní uživateli podrobně prostudovat snímané děje a rychle odhalit problémy. Kvalitní vysokorychlostní kamery pracují s rychlostí záznamu od 60 snímků za sekundu až do 100 000 snímků za sekundu (tzv. fps – Frames Per Second). Problémem je však proměnná rozlišitelnost, kdy při vyšší rychlosti snímání dochází k záznamu s nižším rozlišením.

2.2 Základní typy vysokorychlostních kamer

2.2.1 Kompaktní sestava

Tyto kamery jsou jednodušší zařízení pro snímání vysokorychlostních dějů. Jejich konstrukce připomíná kompaktní digitální fotoaparát. V těle přístroje je integrován display i objektiv. Výhodami kompaktních vysokorychlostních kamer jsou nižší pořizovací náklady a jednodušší ovládání. Tyto systémy však neumožňují tak důkladnou analýzu pohybu a nelze jimi měřit vzdálenosti a rychlosti. Navíc nedosahují tak vysokého snímkového kmitočtu při snímání. Kompaktní sestavy jsou často využívány při seřizování robotických linek, kde není potřeba složitější analýzy.

Příkladem kompaktní sestavy je kamera TroubleShooter HR firmy Fastec Imaging. Tato kamera snímá rychlostí až 16 000 fps (rozlišení 1280 x 32). Při plném rozlišení 1280 x 1024 bodů snímá rychlostí až 500 fps.



Obrázek 1: Kompaktní kamera TroubleShooter

Elektronické systémy a obvody se neustále zrychlují a vysoké rychlosti snímání se začínají prosazovat i ve spotřební elektronice. Příkladem je kompaktní fotoaparát Casio Exilim Pro EX-F1, který nabízí snímání běžných videosekvencí s rozlišením 1920 x 1080 obrazových bodů rychlostí 60 fps. V režimu „High-speed“ se rychlost záznamu dramaticky zvyšuje. Například s rozlišením 512 x 384 bodů je frekvence snímání 300 fps, při velikosti snímků 432 x 192 bodů je rychlost 600 fps a při nejnižším rozlišení 336 x 96 bodů lze pořídit záznam s frekvencí 1 200 fps.



Obrázek 2: Casio Exilim Pro EX-F1

2.2.2 Modulární systém

Kamerový systém je složen z oddělitelných částí. Základní částí je tělo se zabudovaným obrazovým snímačem, procesorem, vnitřní pamětí a potřebnou elektronikou. K tomuto základu je nutné připojit další periferní zařízení a namontovat objektiv. Mezi nutné příslušenství patří dálkové ovládání a zobrazovací zařízení (PC nebo TV monitor). U některých systémů lze zakoupit také jednoúčelové zařízení obsahující kombinaci zobrazovací jednotky a ovládacích prvků. Mezi další příslušenství patří například dálková spoušť, čtečka paměťových karet pro přenos nasnímaného děje, stativy pro uchycení kamerového systému, atd. Modulární systém nabízí díky výměnným objektivům možnost volby vhodné optiky podle potřeb snímaného děje. Přes adaptér lze taktéž připojit endoskop pro zkoumání rychlých dějů ve stísněných prostorech.

Hlavními výrobci v oboru modulárních vysokorychlostních kamerových systémů jsou společnosti Redlake a Olympus.

Portfolio společnosti Redlake vrcholí modelem MotionXtra HG-XR (viz obrázek 3), který pořizuje videoklipy rychlostí až 100 000 fps při rozlišení 64 x 24 obrazových bodů. Nejvyššího rozlišení 1504 x 1128 obrazových bodů dosahuje zařízení do rychlosti snímání 1 000 fps. Závislost rozlišení na rychlosti snímání znázorňuje tabulka 1.



Obrázek 3: Redlake MotionXtra HG-XR

Tabulka 1: Ukázka vybraných rychlostí a rozlišení kamery Redlake

fps	≈ 4:3	≈ 1:1	≈ 3:1
1 000	1504 x 1128	1120 x 1120	-
2 000	1056 x 792	928 x 896	1504 x 568
3 000	832 x 648	736 x 720	1376 x 416
5 000	640 x 480	544 x 544	1024 x 320
10 000	416 x 320	352 x 368	672 x 216
20 000	256 x 192	224 x 232	448 x 136
30 000	192 x 152	160 x 168	320 x 104
50 000	128 x 88	96 x 104	192 x 64
100 000	32 x 24	24 x 24	64 x 24

Společnost Olympus aktuálně nabízí vysokorychlostní kamerový systém s názvem i-SPEED 2 (viz obrázek 4). Tato kamera nabízí maximální frekvenci snímání 33 000 fps při rozlišení 96 x 72 obrazových bodů. Do rychlosti 1 000 fps poskytuje kamera rozlišení 800 x 600 obrazových bodů.



Obrázek 4: Vysokorychlostní kamerový systém Olympus i-SPEED 2

2.3 Vysokorychlostní kamerový systém Olympus i-SPEED 2

Se systémem Olympus i-SPEED 2 je možné zachytit obraz s rychlostí od 60 do 33 000 snímků za vteřinu, což umožňuje rychlou a jednoduchou identifikaci procesů. Uživatel může na základě získaných výsledků nově upravit seřízení stroje, čímž se zvýší produktivita a minimalizují se náklady na údržbu [13].

Vysokorychlostní kamerový systém i-SPEED 2 zaznamenává extrémně rychle probíhající události. Videozáběry rychlých průběhů a procesů jsou digitálně zachyceny v paměti systému. Ty je možné zapsat na kartu CompactFlash nebo pomocí přípojky Ethernet stáhnout do notebooku či PC. Video pak lze přehrát nižšími rychlostmi, dovolujícími rozbor snímků po snímku. Uživatel tak může událost posoudit v detailu a rychle identifikovat zdroje chyb nebo poruch. Software dodávaný spolu s vysokorychlostním kamerovým systémem umožňuje analýzu a zpracování záběrů. Rovněž je možné měření rychlostí a vzdáleností [13].

2.3.1 Technické údaje

2.3.1.1 Fyzické parametry

Rozměry kamery: 106 mm x 98 mm x 264 mm (š x v x d)

Hmotnost: 2 kg

2.3.1.2 Mechanická upevnění

Závit pro stativ: Standardní závit pro stativ 1/4" Whitworth

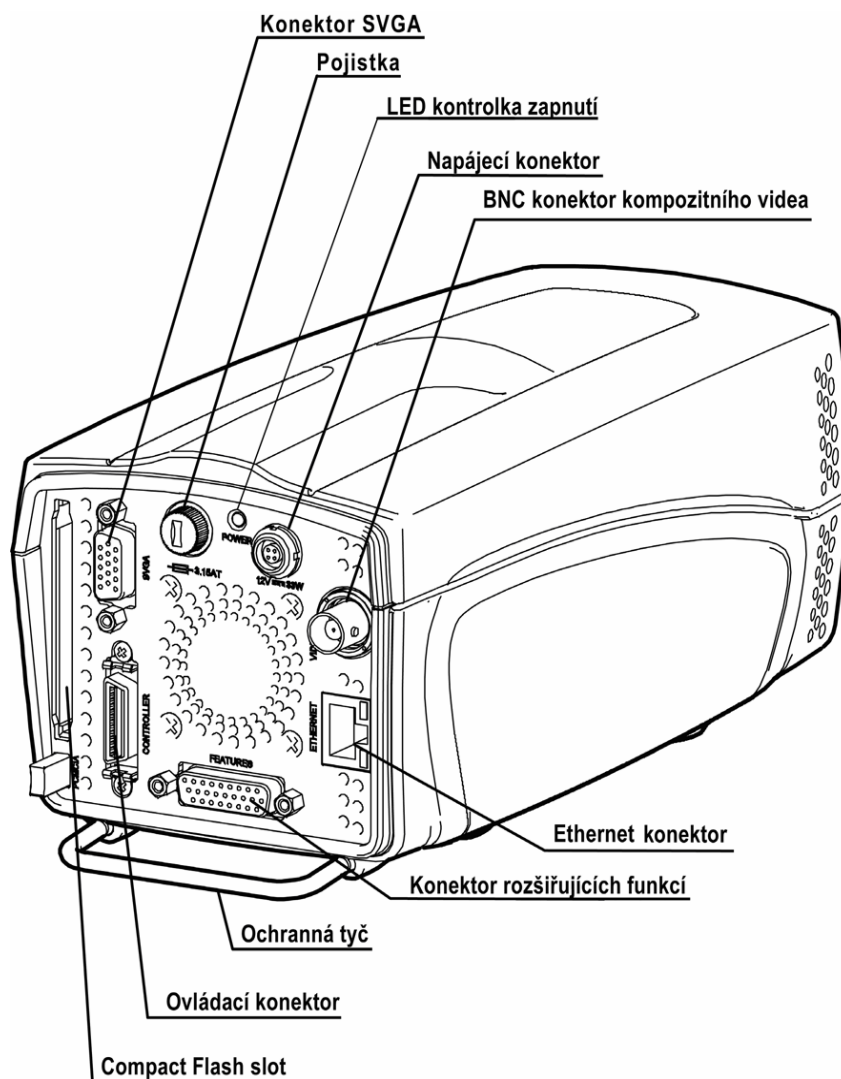
Upevnění objektivu: Držák standardu C-mount

Ovládání ostření: Držák C-mount lze zašroubovat 1 mm do těla kamery a vyšroubovat o 3 mm proti jmenovité poloze 17 mm

Upevnění příslušenství: 4 x závit 1/4" Whitworth na spodní straně

2.3.1.3 Elektrická připojení

Vstupní napětí:	12 V DC \pm 10 %
Příkon:	Kamera – max. 28 W Systém – max. 36 W
Další propojení:	Ovládací konektor – 26pinový MDR Konektor rozšiřujících funkcí – 26pinový D-Sub Ethernetový konektor – RJ-45 SVGA – 15pinový D-Sub dle PC normy Kompozitní video výstup – BNC CompactFlash slot – Standard Type I a II



Obrázek 5: Konektorové osazení zadní stěny kamery

2.3.1.4 Rozlišení, rychlost a doba záznamu

- Typ snímače: CMOS snímač
- Rozlišení snímače: 800 x 600 obrazových bodů
- Provozní režimy: Normální snímání, intervalové snímání
- Rychlost snímání: Maximálně 33 000 fps
Minimálně 0,0667 fps (4 snímky za minutu v režimu intervalového snímání)
Maximální rychlost snímání v plném rozlišení: 1 000 fps
- Úsporné režimy: Výškový režim, šířkový režim a čtvercový režim

Tabulka 2: Jmenovité hodnoty rychlostí a rozlišení

Rozlišení		Počet pixelů na snímek	Poměr zvětšení	Počet snímků za sekundu	Maximální počet snímků v paměti *	Doba záznamu [s]*
H	V					
800	600	480000	1,00	60	4473	74,55
800	600	480000	1,00	100	4473	44,73
800	600	480000	1,00	150	4473	29,82
800	600	480000	1,00	200	4473	22,37
800	600	480000	1,00	300	4473	14,91
800	600	480000	1,00	400	4473	11,18
800	600	480000	1,00	500	4473	8,95
800	600	480000	1,00	600	4473	7,46
800	600	480000	1,00	800	4473	5,59
800	600	480000	1,00	1000	4473	4,47
672	504	338688	1,19	1500	6340	4,23
576	432	248832	1,39	2000	8630	4,32
448	336	150528	1,79	3000	14266	4,76
384	288	110592	2,08	4000	19418	4,85
320	240	76800	2,50	5000	27962	5,59
288	216	62208	2,78	6000	34521	5,75
256	192	49152	3,13	8000	43690	5,46
224	168	37632	3,57	10000	57065	5,71
160	120	19200	5,00	15000	111848	7,46
128	96	12288	6,25	20000	174762	8,74
96	72	6912	8,33	30000	310689	10,35
96	72	6912	8,33	33000	310689	9,41

* Standardní kapacita vnitřní paměti kamery je 2 GB

2.4 Vysvětlení pojmů

2.4.1 Snímkový kmitočet, rozlišení, délka záznamu

Kamera Olympus i-SPEED 2 využívá ke snímání specializovaný snímač. I přes to existuje limit počtu obrazových bodů, které kamera dokáže za sekundu zpracovat, a tím je rychlost snímání omezena na 1 000 fps. Pokud je požadováno rychlejší snímání, je nutno snížit počet bodů tvořících jeden snímek. Tato funkce je nazvána „výřez“ a systém Olympus i-SPEED 2 díky tomu dokáže zpracovat až 33 000 snímků za sekundu. Omezení plochy obrazového snímače zajišťuje obvod „zoomování“ zabudovaný do elektroniky kamery.

Kamera obsahuje elektronickou paměť pro ukládání zaznamenávané videosekvence. Do paměti se při plném rozlišení obrazového snímače vejde určitý počet snímků a také je pevně dána maximální rychlost snímání 1 000 fps. Pokud je nastavena rychlost snímání nižší než 1 000 fps, doba záznamu se prodlouží, neboť budou snímky ukládány v delších intervalech. Je-li nastavena rychlost snímání vyšší než 1 000 fps, doba záznamu se významně nezmění, protože i když jsou snímky ukládány častěji, jsou menší a tyto dva efekty se vyruší.

2.4.2 Doba integrace

Obrazový snímač zachycuje dopadající světlo a převádí jej na elektronický signál, který přenáší do paměti, zatímco se cyklus zachycování obrazu již začíná opakovat. Dobu, po kterou se shromažďuje světlo dopadající na snímač, nazýváme „doba integrace“, „expoziční čas“ nebo „čas závěrky“.

2.4.3 Vnitřní kruhová paměť kamery

V režimu záznamu kamera neustále ukládá snímky do vnitřní paměti. Tato paměť má kruhové uspořádání, proto po zaplnění paměti nejnovější snímek automaticky přemaže snímek nejstarší. Kamera tak neustále uchovává průběžný záznam scény a tento proces se může neustále opakovat. Takový systém zápisu dat se nazývá „kruhová vyrovnávací paměť“. Poté, co nastane požadovaná událost, lze snímání zastavit stiskem tlačítka v menu nebo zmáčknutím spouště.

2.4.4 Spoušť

Způsob ovládání záznamu je velmi důležitý, neboť rozhoduje o tom, zda bude zachycena událost, která je předmětem našeho zájmu. Existují dvě metody, jak zastavit záznam prováděný kamerou i-SPEED 2. První možností je stisknout tlačítko v menu, a tím okamžitě zastavit nahrávání. V paměti zůstane záznam videa pořízený před stiskem tlačítka.

Další možností je využít vnější elektrický signál spouště, který kameru zastaví po uplynutí uživatelem nastavené prodlevy. Umožněním záznamu i po vnější události spouště se zachytí jak úsek děje před touto událostí, tak i po ní. Kamera tak uchová záznam celé akce, i pokud stisknutí spouště nastane už v jejím průběhu. Prodleva mezi stlačením spouště a zastavením záznamu se nastavuje počítadlem snímků, které se označuje jako počítadlo spouště. Délka tohoto úseku se nastavuje v menu a vyjadřuje se jako procentní podíl z celkové kapacity paměti. Hodnota počítadla se udává z pohledu výsledné videosekvence, takže při nastavení 0 % se celá paměť kamery zaplní až po vnější události spouště. Snímek pořízený v okamžiku spuštění je tak prvním snímkem výsledného videoklipu. Pokud je spouštění nastaveno na 100 %, záznam se při vnější události spouště okamžitě zastaví a snímek pořízený v okamžiku stisknutí spouště je posledním snímkem výsledného videoklipu.

Signál spouště je elektrický, proto lze kameru Olympus i-SPEED 2 nastavit tak, aby reagovala na náběžnou nebo sestupnou hranu příslušného pulzu.

Kamera Olympus i-SPEED 2 nabízí dvě rozšíření výše popsaného běžného způsobu spouštění. Tyto režimy se nazývají Record On Command (ROC) a Burst Record On Command (BROC). Po výběru režimu záznamu ROC kamera zaznamenává video jen po dobu, kdy je přítomen signál spouště (spoušť je stlačena).

Režim BROC je rozšířením režimu ROC, kdy kamera zaznamenává videosekvenci předem definované délky jen po příchodu hrany signálu spouště (kamera nereaguje na samotnou úroveň signálu). Přitom vůbec nezáleží na tom, jak dlouho je signál spouště aktivní. Tato funkce je vhodná pro případ, nebude-li kamera obsluhována a nastane více krátkých dějů. Doba záznamu každé z dávek se nastavuje v menu.

V režimech ROC a BROCC je kruhová organizace paměti zrušena a videozáznam se do ní zapisuje od začátku do konce. Po vyčerpání kapacity paměti již nelze pořizovat další záznam. Zobrazuje se pruh signalizující využití paměti.

Kamera nabízí funkci umožňující vymazání naposledy pořízené videosekvence, pokud byl spínač spouště stisknut omylem, a také vymazání celého obsahu paměti.

2.4.5 Snímač, FPN, kalibrace FPN

Obrazový snímač kamery Olympus i-SPEED 2 je typu CMOS a jako všechny snímače CMOS zanášá do obrazu pevný obrazec rušení (FPN). Kamera Olympus i-SPEED 2 je vybavena plně automatickým kalibračním systémem umístěným mimo snímací čip, který kalibraci provede za méně než sekundu. Tento systém je vybaven mechanickou závěrkou, která se při kalibraci automaticky uzavře. Závěrka se při aktivaci projeví typickým cvaknutím. Systém kalibrace se samočinně aktivuje při zapnutí kamery a také v krátké době po zapnutí. Tyto aktivace by měly být v běžných případech postačující. V extrémních případech, zejména při používání kamery za vysokých teplot okolí, je nutno kalibrační systém aktivovat po uplynutí určité doby od zapnutí. Upozorňuje na to přítomnost pevného obrazce rušení v obrazu. FPN způsobuje zrnitý vzhled snímku a může také do obrazu promítat tenké svislé čáry. Ruční aktivaci systému kalibrace lze provést ovládacím prvkem v menu.

2.4.6 Osvětlení

Převážná část aplikací vysokorychlostního videozáznamu vyžaduje silné osvětlení. U většiny záběrů v interiéru je třeba použít přídavné osvětlení s příkonem 500 až 2 000 W. Obvyklým řešením je zamířit na scénu několik výkonných bodových reflektorů. U menších zkoumaných objektů je optimálním řešením využití průmyslových svítidel a světlovodů. Ve většině aplikací nestačí pouze použít svítidla s vysokým příkonem. Světlo musí být především pečlivě zaostřeno a zacíleno. Množství světla není ani zdaleka tak důležité, jako jeho soustředění.

2.4.7 Hledáček

Kamera Olympus i-SPEED 2 zobrazuje živý náhled na jednotce CDU nebo připojeném monitoru vždy, když je to možné. Některá menu vyžadují, aby byl tento náhled zakryt a k tomuto účelu slouží úvodní obrazovka s logem. Obrazovka přehrávání nezobrazuje živý náhled, ale samozřejmě obsah paměti. Během živého zobrazení a během záznamu je neustále přenášén obraz v reálném čase, aktualizovaný 60krát za sekundu.

2.4.8 Objektivy

Výběr objektivu může významně ovlivnit kvalitu získané videosekvence. Výběr objektivu začíná volbou ohniskové vzdálenosti, která se udává v mm. Objektiv s dlouhou ohniskovou vzdáleností se obvykle používá, je-li potřeba sledovat malou plochu nebo pokud musí být kamera umístěna dál od scény. Dlouhá ohnisková vzdálenost znamená větší zvětšení. Nevýhodou tohoto typu objektivu je zmenšení zdánlivé vzdálenosti objektů v záběru ve směru osy pohledu. Tento jev se nazývá komprese perspektivy. Objektiv s dlouhou ohniskovou vzdáleností také obvykle mívá nižší světelnost (vyšší clonové číslo) a proto obraz není tak jasný.

Objektiv s krátkou ohniskovou vzdáleností se obvykle používá, je-li potřeba sledovat velkou plochu nebo pokud podmínky vyžadují umístění kamery blízko u scény. Objektivy s velmi krátkou ohniskovou vzdáleností deformují perspektivu záběru a tento jev je nazýván soudkové zkreslení.

Světelnost je jedním ze základních parametrů objektivů. Hodnoty světelnosti jsou udávány bezrozměrným základním clonovým číslem (k), které vyjadřuje poměr ohniskové vzdálenosti [mm] ku průměru vstupní pupily [mm]. Pro objektiv se vždy uvádí nejvyšší možná hodnota. Používá se zápis f/k , 1:k.

Běžné objektivy mají nastavitelnou clonu. Clona umožňuje korigovat množství světla vstupujícího do kamery. Čím je clonové číslo vyšší, tím méně světla projde clonou. Zvýšení clonového čísla na 1,4 násobek (např. z hodnoty $f/4$ na hodnotu $f/5.6$) nazýváme změnou o 1 clonové číslo a odpovídá mu pokles množství procházejícího světla na polovinu.

Zvýšení clonového čísla (zmenšení otvoru v cloně) má vliv na zvýšení hloubky ostrosti. To znamená, že objektiv dokáže ostřeji zachytit blízké i vzdálené objekty. Tato výhoda je ovšem v rozporu s požadavkem vysokorychlostního záznamu, kdy je pro snímání potřeba co nejvíce světla, zejména při vysokých snímkových kmitočtech a krátkých časech závěrky. Je tedy nutné vhodným výběrem objektivu a jeho nastavením dosáhnout ideální rovnováhy, kdy jsou všechny objekty zaznamenávané scény ostré a současně je obraz dostatečně jasný.

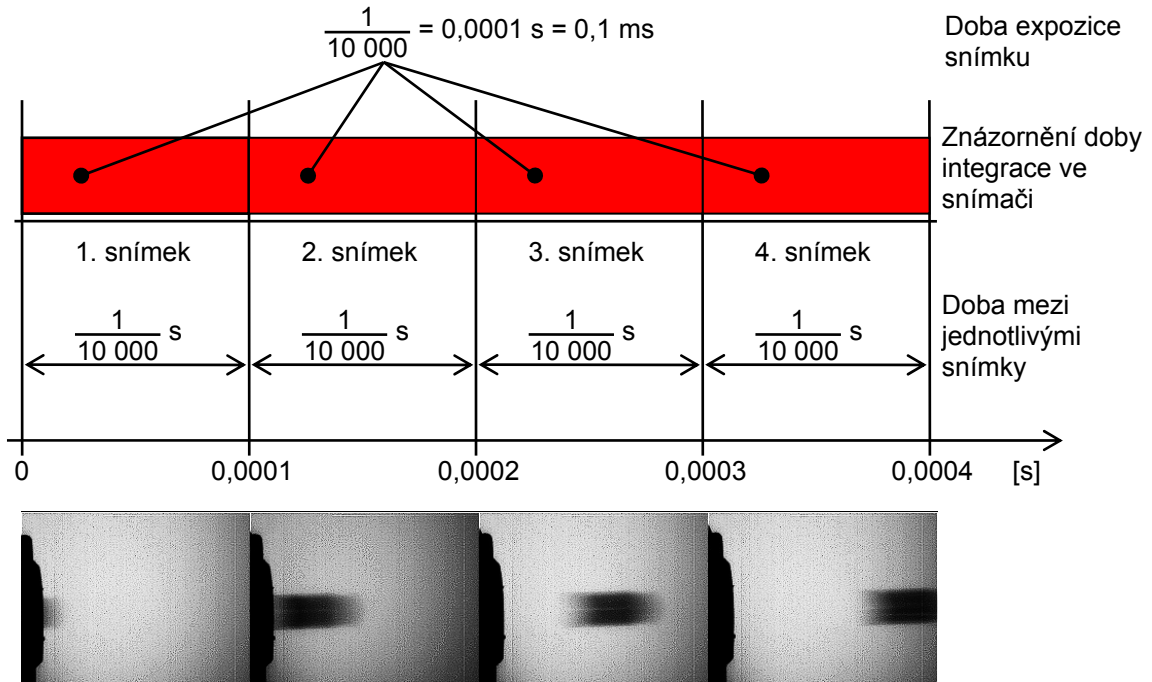
Při nákupu objektivů pro kameru Olympus i-SPEED 2 je nutno brát v úvahu, že obrazový snímač typu CMOS je poměrně velký a je nutno požadovat objektiv nejméně pro formát 1".

2.4.9 Elektronická závěrka (Shutter)

Elektronická závěrka je velice praktická funkce pro zmenšení pohybové neostrosti snímaného objektu. Čas závěrky obvykle maximálně využívá celou dobu odpovídající převrácené hodnotě snímkového kmitočtu. Pokud se sledovaný objekt ve scéně pohybuje velmi rychle, může se během doby snímání posunout tak, že je obraz rozmazaný. Pohybová neostrost je někdy nepřijatelná a kamera Olympus i-SPEED 2 proto nabízí možnost zkrácení času závěrky na zlomek doby snímku, čímž se eliminuje pohybová neostrost. Čas závěrky je udáván jako poměr převrácené hodnoty snímkového kmitočtu a čísla shutteru. Například shutter nastavený na hodnotu 10x znamená, že je závěrka otevřena jen po 1/10 možné doby. Zkrácením času závěrky však klesne množství světla dopadajícího na snímač a obraz bude tmavší. Z tohoto důvodu je nutno při zkrácení času závěrky zvýšit intenzitu osvětlení scény. [16]

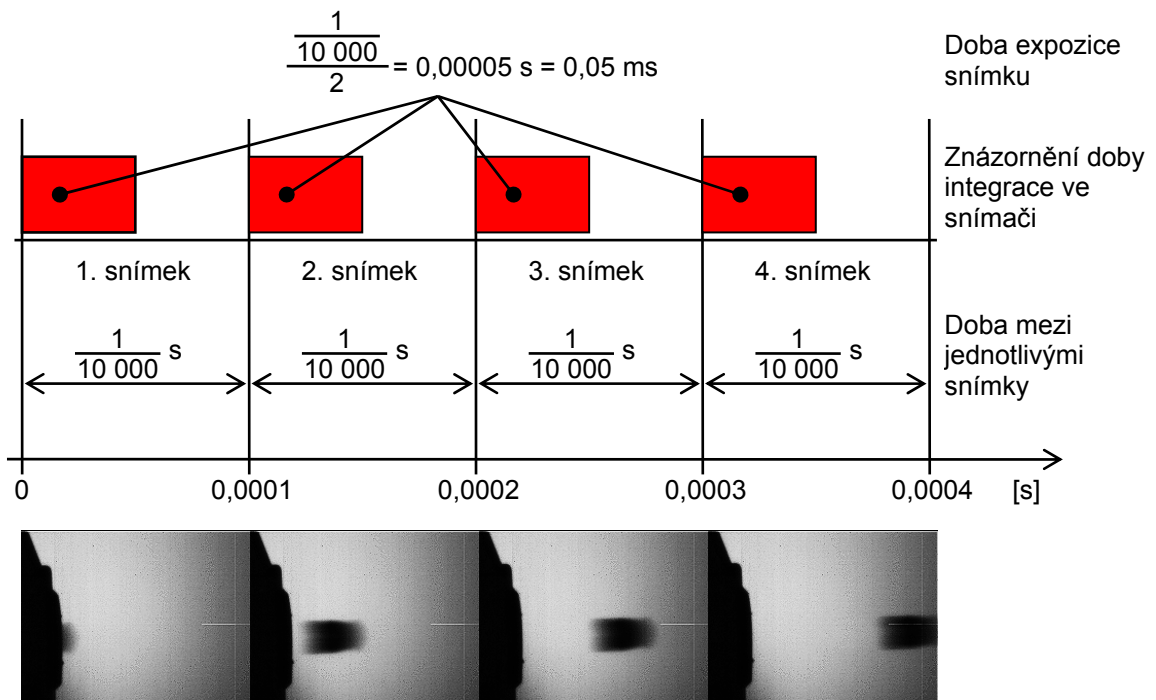
Snižování času závěrky pod dobu převrácené hodnoty snímkové frekvence se nejčastěji využívá při snímání velmi rychlých dějů, kde by mělo pouhé zvyšování snímkového kmitočtu nepříznivý vliv na rozlišení obrazu. Zvyšování hodnoty shutteru je tedy využitelné až od rychlosti snímání vyšší než 1 000 fps. Při snížení doby expozice proti převrácené hodnotě snímkového kmitočtu je vypuštěna část obrazové informace, proto je dobré tuto funkci využívat pouze u dějů, kde je dráha pohybu jasná.

2.4.9.1 Shutter 1x při 10 000 fps



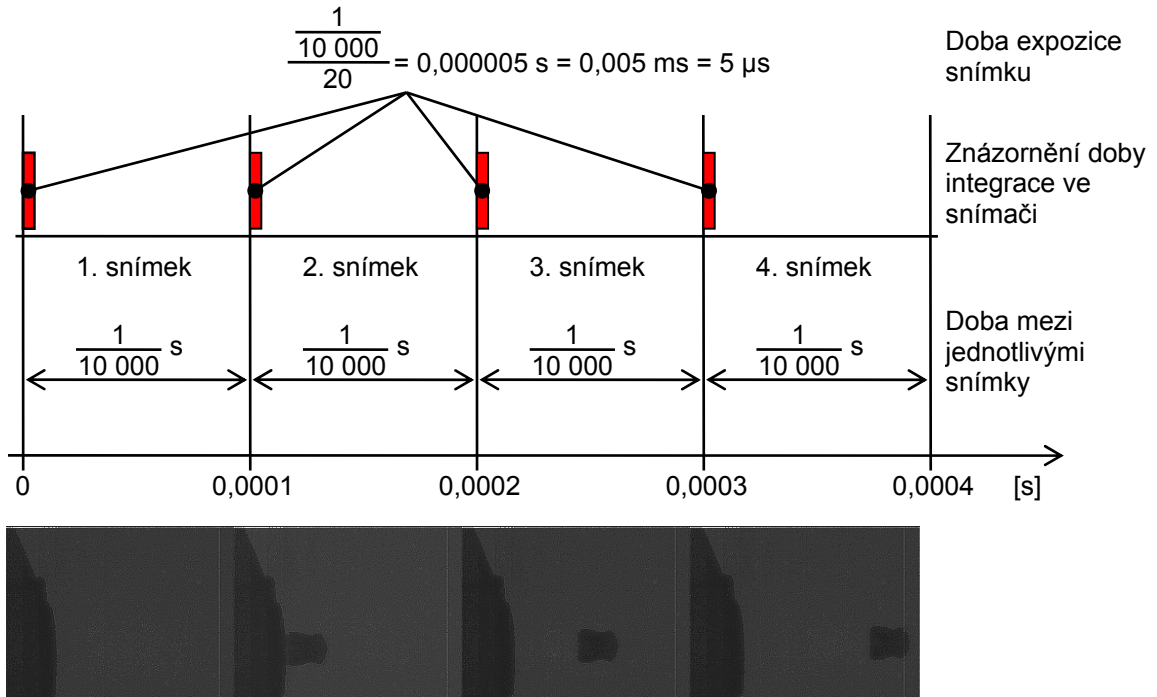
Obrázek 6: 10 000 snímků za sekundu, shutter 1x

2.4.9.2 Shutter 2x při 10 000 fps



Obrázek 7: 10 000 snímků za sekundu, shutter 2x

2.4.9.3 Shutter 20x při 10 000 fps



Obrázek 8: 10 000 snímků za sekundu, shutter 20x

3 BALISTIKA

Slovo „balistika“ je řeckého původu. Označuje vědeckou disciplínu, jejímž předmětem zkoumání jsou dráhy letu vržených těles. V souvislosti s rozšířením palných zbraní se z balistiky stala věda, která zkoumá všechny děje a jevy, související s pohybem střely. Časem se vyvinula specializovaná odvětví balistiky:

- vnitřní balistika: zabývá se ději probíhajícími při výstřelu v hlavní palné zbraně,
- přechodová balistika: zkoumá pohyb střely na ústí hlavně a všechny rušivé vlivy zbraně a prachových plynů působících v tento okamžik na střelu,
- vnější balistika: zkoumá dráhy střel ve vzduchu a děje, které mohou pohyb střely ovlivnit,
- koncová (cílová) balistika: studuje průběh vnikání střely do cíle o hustotě podstatně větší než je hustota vzduchu.

Vnější balistika patří do oblasti klasické mechaniky, která se od počátku 17. století stala pevnou součástí výzkumu přírodních věd. V 18. století se objevil zájem o zkoumání jevů v palných zbraních a uskutečnila se první měření počáteční rychlosti střely pomocí balistického kyvadla.

Děje v hlavní zbraně patří k nejextrémnějším dějům klasické fyziky. Jedná se o velmi krátký děj, při němž působí velké síly, zrychlení a vysoké teploty. Jeho matematický popis a zpracování jsou velmi složité. I s pomocí nejmodernější výpočetní techniky se problematika výstřelu řeší jen se značnými obtížemi.

V okamžiku, kdy střela opouští ústí hlavně, je tlak plynů v hlavní ještě poměrně vysoký. Vzhledem k velkému rozdílu mezi ústřovým a atmosférickým tlakem dochází na ústí hlavně k velmi rychlému proudění plynů, které ovlivňují letící střelu. Plyny vytékají z ústí hlavně nejvyšší možnou rychlostí, která je vyšší než rychlost střely, proto plyny střelu obtékají a předbíhají. Kromě nepatrného urychlení letící střely plyny způsobují vznik příčných sil, které vyvolávají její kmitání.

Po opuštění ústí hlavně se střela pohybuje ve vzduchu až do doby, než dopadne na překážku nebo na terén. Pohyb střely je ovlivněn především tíhovou silou a odporem vzduchu. Na letící střelu působí celá řada dalších (rušivých) vlivů, které se projevují změnami dráhy. [9]

4 MĚŘENÍ ÚŠŤOVÉ RYCHLOSTI VZDUCHOVÉ PISTOLE

Pro praktické měření s využitím vysokorychlostního kamerového systému Olympus i-SPEED 2 bylo vybráno snímání úšťové rychlosti střely typu Diabolo vystřelené ze vzduchové pistole. Tento děj byl vybrán kvůli jeho předpokládané vysoké rychlosti, která měla dle výrobce činit $105 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento pokus má taktéž sloužit jako praktická ukázka pro studenty předmětu optická metrologie, proto byl kladen důraz na atraktivitu daného měření a proveditelnost v laboratorním prostředí.

4.1 Pomůcky měření

4.1.1 Vzduchová pistole

Pro účel měření byla použita jednoranná zlamovací vzduchová pistole Gamo P-800 ráže 4,5 mm (viz obrázek 9). Výrobce udává úšťovou rychlost je $105 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z informací poskytnutých v manuálu není zřejmé, zda byla tato rychlost změřena nebo je pouze výsledkem teoretického výpočtu. Nejistota údaje o rychlosti nebyla v dokumentaci uvedena. Celková délka pistole je 295 mm a má hmotnost 0,58 kg. Funkční části pistole jsou vyrobeny z oceli a části na povrchu zbraně jsou vyrobeny z tvrzeného plastu. Pro střelbu jsou doporučeny střely typu Diabolo jakéhokoliv tvaru.



Obrázek 9: Vzduchová pistole Gamo P-800

Při experimentu byla vzduchová pistole upnuta do přípravku upevněného na stativu (viz obrázek 10). Střela byla cílena do lapače diablek. Mezi pistolí a lapačem byla ponechána jen nezbytně nutná vzdálenost pro provedení měření, aby se co nejvíce eliminovala pravděpodobnost nepřesného zamíření a vyloučila se tak možnost, že by střela nebyla zachycena.



Obrázek 10: Uchycení vzduchové pistole

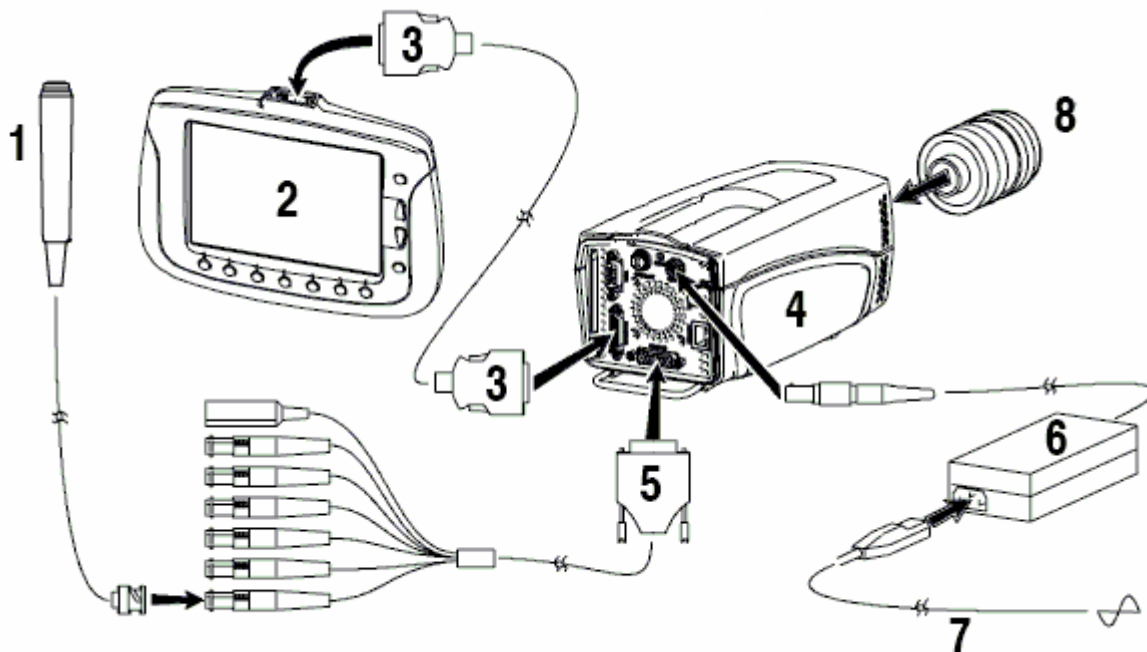
4.1.2 Vysokorychlostní kamera Olympus i-SPEED 2

Vysokorychlostní kamerový systém Olympus i-SPEED 2 byl konfigurován v podobě s ovládací jednotkou displeje (CDU). Pro přesnější nahrávání videosekvencí byla využita drátová spoušť, která byla připojena přes konektor rozšiřujících funkcí. K přenosu snímků sloužila paměťová karta typu CompactFlash, jenž byla před začátkem měření instalována do slotu čtečky kamery. Pro měření byl použit objektiv PENTAX TV ZOOM LENS 12,5 – 75 mm 1:1,8 (viz obrázek 11). Ohnisková vzdálenost objektivu je proměnná v rozsahu 12,5 – 75 mm. Nastavení clonového čísla je možné v rozmezí 1,8 až 22. Ostření, zoomování i nastavení clony je manuální. Konfigurace vysokorychlostního kamerového systému je znázorněna schematicky níže (viz obrázek 12).



Obrázek 11: Použitý objektiv

- | | | | |
|---|------------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | Spínač spouště | 5 | Kabel konektoru rozšiřujících funkcí |
| 2 | Ovládač displeje (CDU) | 6 | Napájecí zdroj |
| 3 | Ovládací kabel | 7 | Síťový napájecí kabel |
| 4 | Kamera | 8 | Objektiv s držákem C-mount |



Obrázek 12: Konfigurace kamerového systému

4.1.3 Světelný zdroj

Pro použité rychlosti snímání je třeba umělé přisvětlení snímané scény. K tomuto účelu byl využit průmyslový světelný zdroj Olympus ILP-1. Osvětlovacím prvem ILP-1 je UHP (Ultra High Performance) výbojka o výkonu 120 W. Tento zdroj vyvíjí světlo s barevnou teplotou 5 600 stupňů Kelvina. Přenos světla od výbojky a zacílení na požadovaný objekt je realizován optickým kabelem. Na konec optického vedení byl připevněn koncentrátor světelných paprsků pro zaměření na snímané místo. Osvětlení měřeného objektu bylo provedeno přímou metodou.



Obrázek 13: Světelný zdroj Olympus ILP-1

4.1.4 Další pomůcky měření

Pro měření byly použity následující pomůcky:

- Střely typu Diabolo Standard 4,5 mm od výrobce Kovohutě Příbram.
- Kloubový stativ kamery s libelou indikující vodorovnou polohu kamery.
- Bílé promítací plátno se stojanem, kterým se zvýšil kontrast snímané scény.
- Počítač pro přenos nasnímaných videoklipů.

4.2 Měření

4.2.1 Příprava měření

Příprava před snímáním rychlých dějů je velice důležitá a relativně zdouhavá část. Nejprve se musí připravit scéna, zkompletovat a nastavit vysokorychlostní kamerový systém a zajistit bezpečnost experimentu.

Příprava snímané scény obnášela vhodné umístění stativu pro uchycení vzduchové pistole, nastavení výšky stativu a montáž přípravku pro upnutí zbraně. Nabitá a zajištěná pistole se přiměřeně utáhla do přípravku tak, aby se zpětným rázem neuvolnila. V dalším kroku byl připraven cíl střelby. K tomuto účelu sloužil lapač diablek, který byl umístěn na stolek v přiměřené vzdálenosti od vzduchové pistole. Následně bylo provedeno zamíření pistole do středu lapače. Po celou dobu experimentu bylo velmi důkladně dbáno na bezpečnost. Nikdo se nesměl pohybovat před hlavní pistole ani v blízkosti předpokládané dráhy střely. Za snímanou scénu bylo umístěno bílé promítací plátno pro zvýšení kontrastu záběru.

V další části přípravy byl sestaven vysokorychlostní kamerový systém Olympus i-SPEED 2. Stativ kamery byl umístěn do vzdálenosti 1,4 m od hlavně vzduchové pistole a seřízen na potřebnou výšku. Do rychloupínací hlavy stativu bylo připevněno tělo kamery a poté provedeno zajištění uzavíracího mechanismu. Na tělo kamery byl našroubován objektiv Pentax s držákem C-mount. Podle libely na stativu byla kamera kloubovým mechanismem ustavena do vodorovné polohy a zaměřena kolmo na snímanou scénu. Na stůl byl umístěn ovládač displeje (CDU) a byl s kamerou spojen příslušným ovládacím kabelem. Dále byl na kameru napojen kabel konektorů rozšiřujících funkcí a na konektor označený nápisem „TRIG IN“ obsluha připojila dálkovou spoušť kamery. Do elektrické zásuvky byl připojen síťový napájecí kabel zdroje a konektor z výstupu tohoto zdroje byl připraven v blízkosti kamery. Tímto bylo sestavení vysokorychlostního kamerového systému kompletní a po dokončení příprav zbývalo jen připojením konektoru z napájecího zdroje oživit celý systém.

Pro zamýšlené rychlosti snímání je nutné zajistit dostatečný osvit snímané scény. Při optimálním nastavení frekvence snímání ústředí rychlosti byla doba expozice snímku pouze 5 mikrosekund a z toho vyplývá velká náročnost na osvětlení. K tomuto účelu posloužil průmyslový světelný zdroj Olympus ILP-1. Umístění tohoto zařízení je limitováno délkou optického kabelu, který přenáší světlo ke snímanému objektu. Proto zdroj ležel na stole v blízkosti kamery, na kterou se uchytil konec optického kabelu s koncentrátorem světelných paprsků. Toto upevnění je výhodné pro použitou metodu přímého nasvícení snímaného objektu, protože osa snímání je jen mírně odkloněna od osy světelných paprsků. Po zapnutí spínače na světelném zdroji a náběhu je zdroj připraven k použití. Vzhledem k omezené době životnosti výbojky byl nastaven plný výkon jen při měření. Mimo měření lze výkon snížit na minimum potenciometrem umístěným na těle světelného zdroje.

Následovalo oživení kamery připojením napájecího konektoru. Po potvrzení úvodní obrazovky se na jednotce CDU zobrazí živý náhled. Dále bylo provedeno nastavení ohniskové vzdálenosti objektivu. Po úpravě úhlu záběru kamery bylo nutné provést zaostření snímaného objektu. Při nejnižším clonovém čísle ($f/1,8$), malé vzdálenosti kamery od snímaného objektu a dlouhém ohnisku pro silné přiblížení je problémem malá hloubka ostrosti. Zaostření na nepřítomný objekt (střela Diabolo) je značně obtížné. Bylo tedy ostřeno na kovovou tyčku o průměru 4 mm, která byla při zaostřování zasunuta do hlavně. Po každé manipulaci se zbraní, například nabíjení, bylo nutné zkontrolovat a upravit zaostření.

Nastavení parametrů snímání kamerového systému jako je rychlost snímání (počet snímků za sekundu) a shutter (elektronická závěrka) je nutné pečlivě promyslet. Úvahy vycházely ze znalosti teoretické ústředí rychlosti udávané výrobcem vzduchové pistole a z velikosti snímaného pole. Pro co největší přesnost měření a tím nejmenší možnou chybu je důležité nastavit nejvyšší možné rozlišení a mít snímaný objekt co nejvíce přiblížen, aby jeho známý průměr, využívaný při výpočtech, pokrývalo co nejvíce snímaných obrazových bodů. Vysoké rozlišení je ovšem v rozporu s potřebou použití vysoké frekvence snímání vyplývající z extrémně rychlého pohybu objektu. Je nutné najít správný kompromis v nastavení.

K přibližnému určení rychlosti snímání a rychlosti závěrky může být využit program „Lens Calculator“ (Kalkulačka objektivů), který je součástí programu i-SPEED 2. Pro měření ústřední rychlosti vzduchové pistole se ukázalo jako nejlepší nastavení rychlost 10 000 snímků za sekundu a Shutter 20x, což znamená, že délka expozice snímku byla 5 μ s. Hloubka ostrosti se při daném nastavení ukázala jen v rozmezí 3,5 mm. Pohybovou neostrost vyčíslil program „Lens Calculator“ na 3,5 pixelů. Bez použití elektronické závěrky (Shutter 1x) byla pohybová neostrost vyhodnocena na 70 pixelů. Při takové neostrosti nelze dostatečně přesně určit hranice objektu a proto by byla následná analýza velice nepřesná.

Stiskem tlačítka „Quick“ bylo vyvoláno rychlé menu a tlačítka „Speed“ a „Shutter“ nastavena snímková frekvence na 10 000 fps a závěrka na 20x (viz obrázek 14). Dále byla provedena korekce kompozice nahrávané scény a doostření, protože zvýšením rychlosti nad 1 000 fps je při snímání využit pouze výřez ze snímacího senzoru. Tím je zvýšen poměr zvětšení, v tomto případě na 3,57:1, a rozlišení zaznamenaného videoklipu klesne z maximální hodnoty 800 x 600 pixelů na hodnotu 224 x 168 pixelů.

V posledním kroku přípravy byla nastavena spoušť nahrávání do režimu „ROC“ (Record On Command). Tento režim umožňuje začátek nahrávání po stisku dálkové spouště a následné ukončení nahrávání po uvolnění spouště. „ROC“ režim lze nastavit pomocí funkce „Trigger Mode“, která se objeví po stisknutí tlačítka „Live“ ve výchozím menu a tlačítka „Setup“ v následující nabídce. Po nastavení trigger modu je na CDU jednotce zobrazena hláška „Waiting for trigger“.



Obrázek 14: Rychlé menu

4.2.2 Vlastní měření

Snímání je nejkratší částí celého experimentu a vyžaduje dobrou koordinaci obsluhy. Před vystřelením projektilu je pistole odjištěna, dále je stlačen spínač dálkové spouště kamery, poté následuje výstřel a bezprostřední uvolnění spouště. Klip je zaznamenán do paměti kamery a připraven na další zpracování. Pro účely experimentu bylo nasnímáno asi 25 videoklipů výstřelu se zaměřením na zjištění nejvhodnějšího nastavení pro změření ústřední rychlosti vzduchové pistole. Dalším cílem experimentu bylo pořízení vhodných ukázek pro prezentaci praktického významu použití elektronické závěrky (Shutter) při snímání vysoce rychlých dějů.

4.2.3 Přenos nasnímaného děje

Po zachycení rychlého děje následuje přenesení významné části videoklipu na kartu CompactFlash a z ní pak do počítače, kde je možné sekvenci dále analyzovat.

Na jednotce CDU byl navolen režim přehrávání (viz obrázek 15) a zpomaleným přehráváním videoklipu nalezena důležitá část vhodná pro analýzu.



Obrázek 15: Menu přehrávání

Dalším krokem je výběr začátku a konce videoklipu v menu výběru klipu (viz obrázek 16). Následně byl zvolen typ komprese a videoklip byl nahrán na kartu Compact Flash.

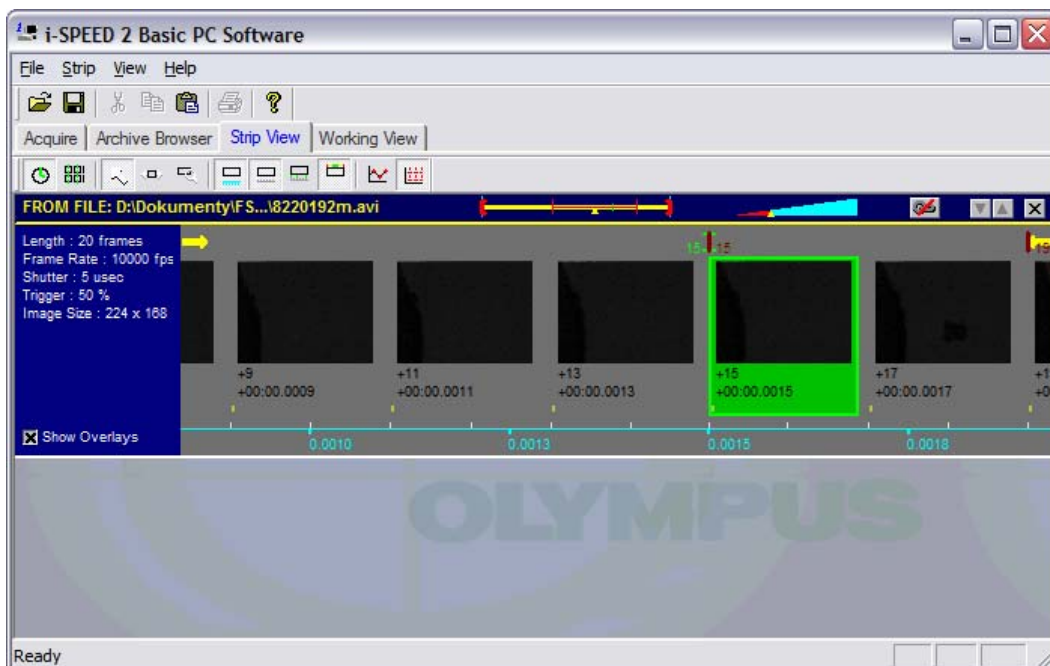


Obrázek 16: Menu výběru klipu

4.3 Postup při analýze vysoce rychlého děje

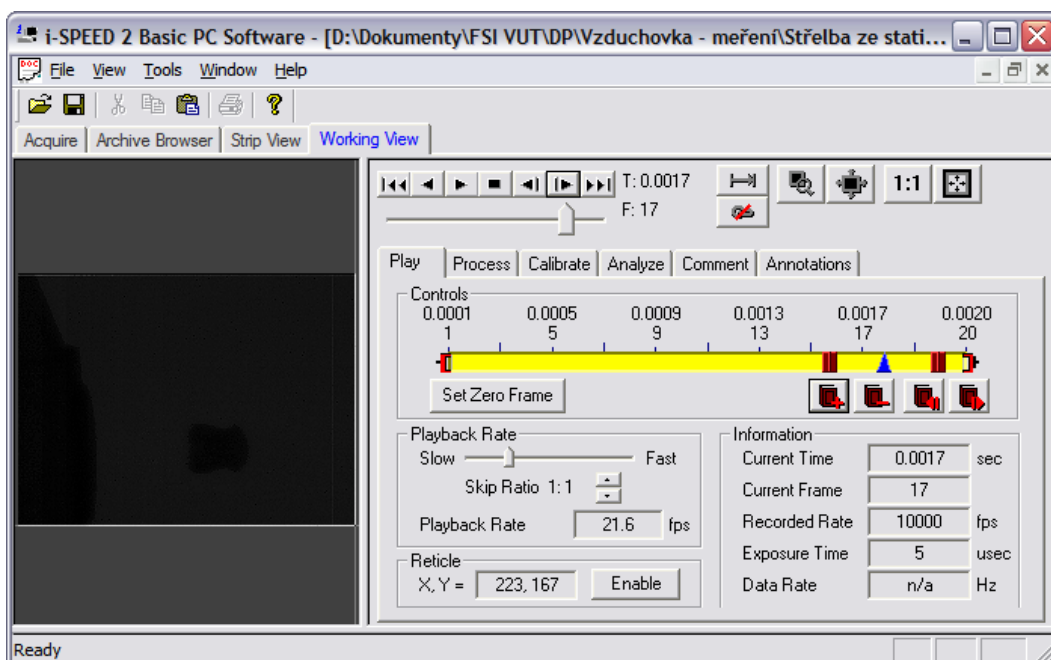
Pro zpracování a analýzu nasnímaného rychlého děje dodává firma Olympus software i-SPEED 2, který je ve verzi Basic zdarma.

V první fázi je videoklip otevřen v programu i-SPEED 2 (viz obrázek 17).



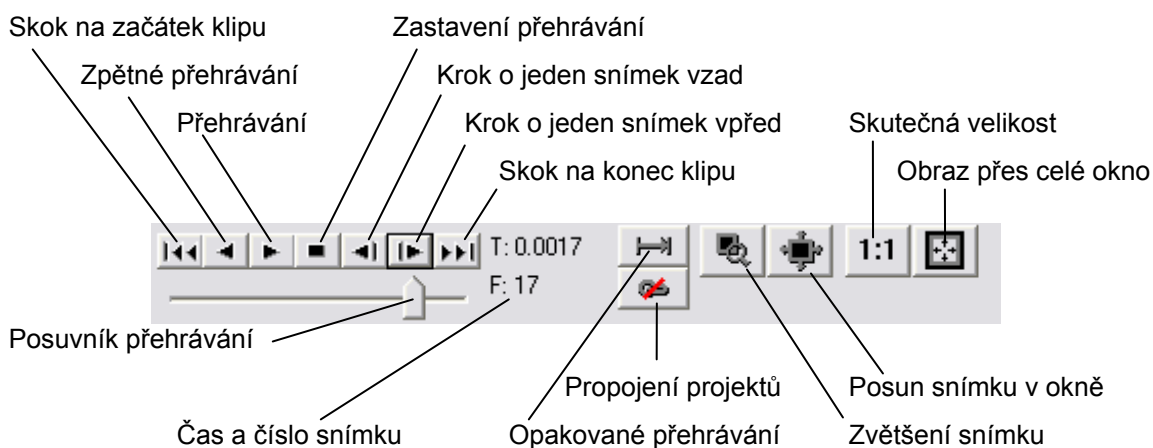
Obrázek 17: Strip View

Dvojitým klepnutím myši na vybranou část klipu se program přepne do pracovního okna „Working View“ (viz obrázek 18). Zde je možné klip spustit se zvolenou rychlostí přehrávání (Playback Rate) a zadaným poměrem přehraných a přeskočených snímků (Skip Ratio). Při navolení poměru 1:2 bude přehrán pouze každý druhý snímek záznamu. V klipu lze také vytvořit záložky pro následné lepší vyhledávání zajímavého místa záznamu. Ve spodní části okna jsou informace o čase od začátku klipu, ve kterém byl zobrazený snímek zachycen, pořadí snímku od začátku záznamu, rychlost snímání, doba exponování jednotlivého snímku a frekvence záznamu uživatelských dat.

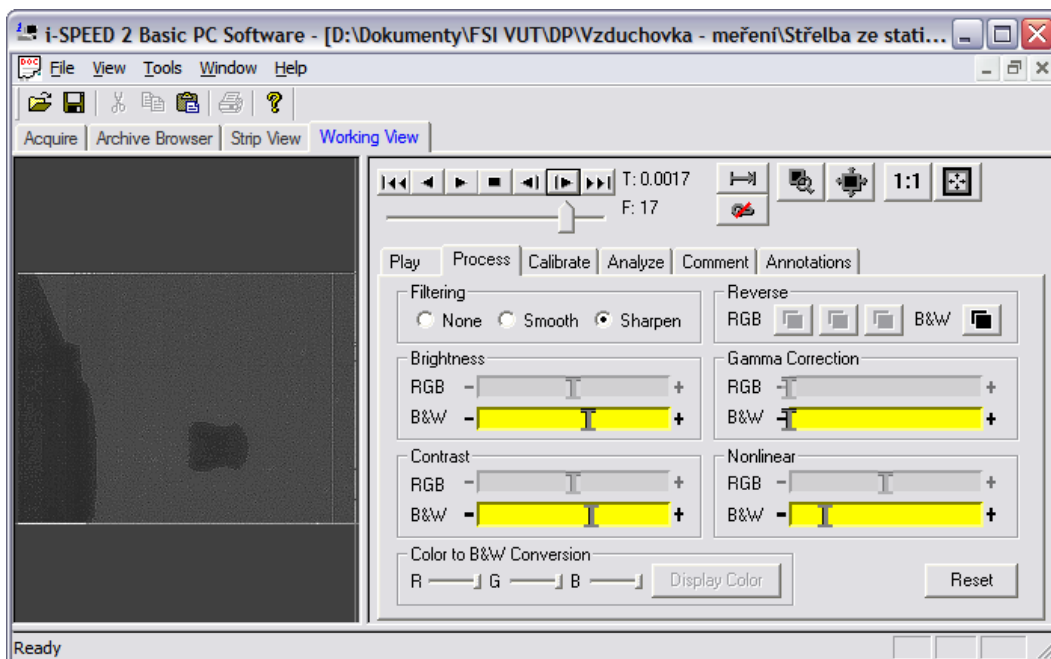


Obrázek 18: Pracovní okno - přehrávání

Ovládací prvky v horní části pracovního okna jsou společné pro všechny záložky tohoto okna. Jejich funkce je popsána níže.

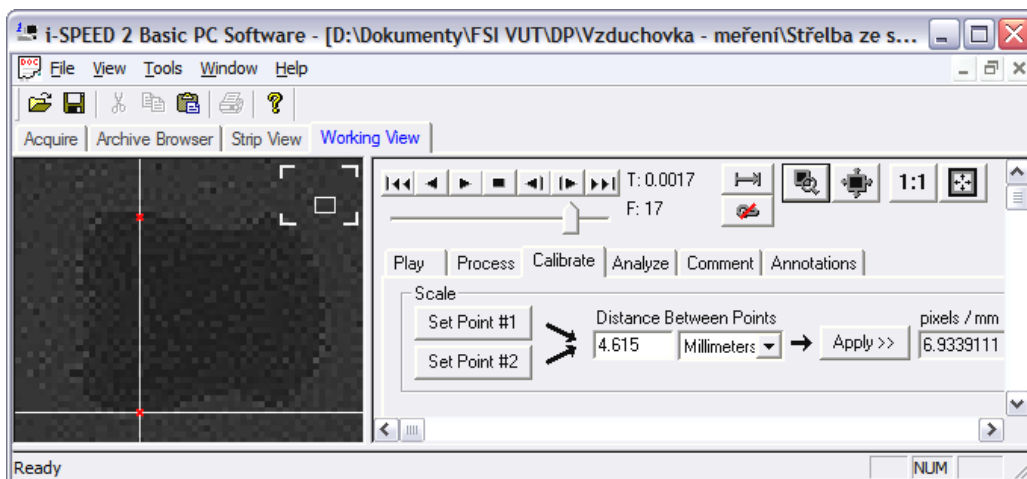


Z důvodu velice krátké expozice snímků rychlého děje je obraz klipu velmi tmavý. Pro jeho analýzu je třeba obraz upravit. Čím je doba expozice kratší, tím je úprava složitější. Vzhled obrazu může být upraven přepnutím na záložku „Process“ a nastavením posuvníků jasu, kontrastu, gamma korekce a nelineárního kontrastu (viz obrázek 19). Pomocí funkce filtrace (filtering) lze vzhled video snímku vylepšit vyhlazením (Smooth), nebo zaostřením (Sharpen). Dále lze funkcí „Reverse“ invertovat barvy. V případě barevného obrazu je možné zvlášť invertovat jednotlivé barevné kanály RGB.



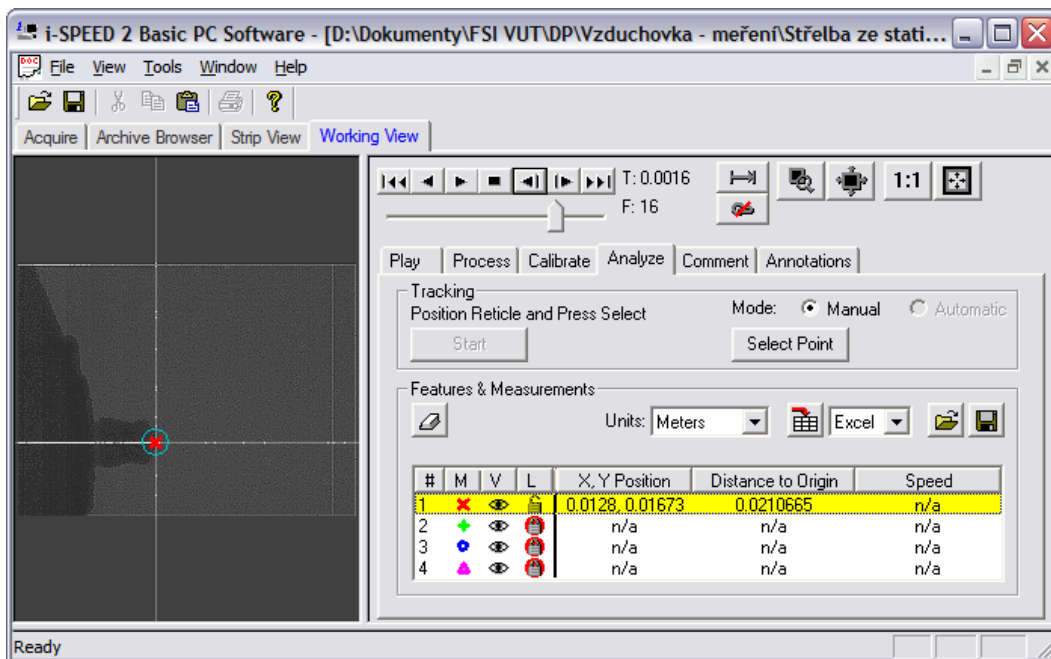
Obrázek 19: Zpracování obrazu

Pro měření vzdáleností a rychlostí je nutné provést kalibraci. V záložce kalibrace se na snímku označí rozměr objektu, který je znám, a do příslušného políčka je vepsána vzdálenost mezi dvěma body. Zvolí se jednotky zadané vzdálenosti a aplikuje se kalibrace (viz obrázek 20). Poté se objeví počet pixelů na jednotku vzdálenosti, se kterou program dále počítá. Při kalibraci je nutné co nej přesněji zaměřit hraniční body, proto je doporučeno obraz přiblížit.

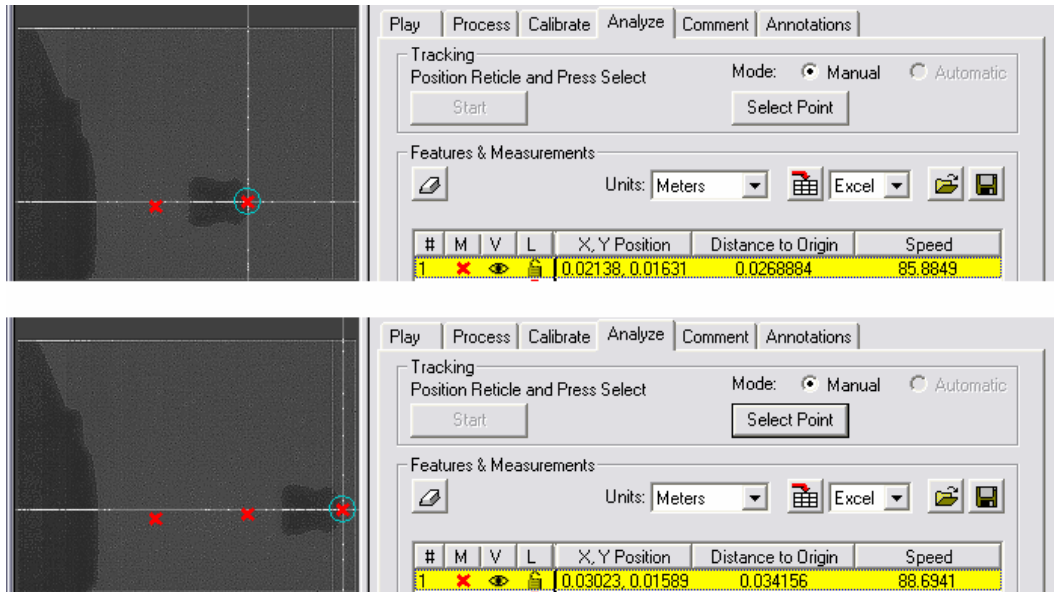


Obrázek 20: Kalibrace

Dalším krokem je vlastní analýza, která se spustí klepnutím na tlačítko start v záložce „Analyze“. Následuje zadání prvního bodu analyzovaného objektu v prvním snímku, na kterém se pozorovaný objekt nachází (viz obrázek 21). Poté je sledován stejný charakteristický bod i na následujících snímcích (viz obrázek 22).

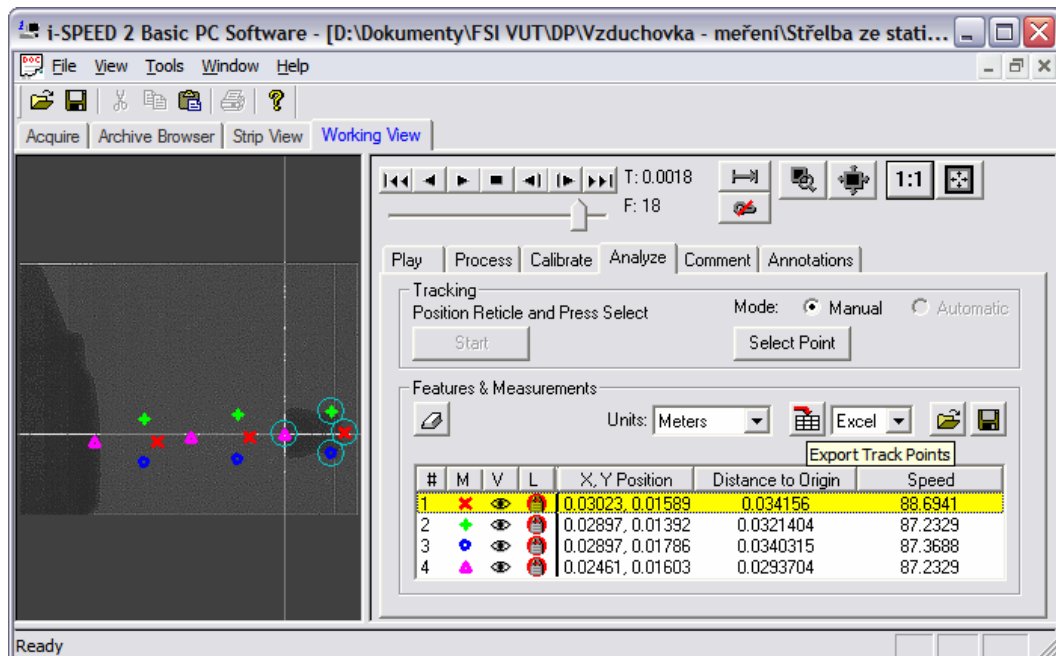


Obrázek 21: První bod analýzy



Obrázek 22: Druhý a třetí bod analýzy

Program i-SPEED 2 ve verzi Basic umožňuje analýzu až čtyř charakteristických bodů sledovaného objektu (viz obrázek 23). Při zadávání jednotlivých bodů, na stejném místě snímaného objektu v různých časech, je výhodné provést uzamčení ostatních sledovaných bodů a pracovat s každým charakteristickým bodem zvlášť, aby nedošlo k omylu.



Obrázek 23: Analýza čtyř charakteristických bodů

Po zadání všech potřebných bodů, výběru jednotek a klepnutí na tlačítko exportu jsou data buďto otevřena v tabulkovém procesoru (MS Excel) (viz obrázek 24) nebo jsou data exportována do textového souboru. Pro další zpracování je výhodnější export do tabulkového procesoru, kde lze následně provést další výpočty jako například statistické vyhodnocení intervalu spolehlivosti.

Analysis Data Sheet										
Test Data										
Date:	4.3.2008									
Time:	1:19:00 odp.									
File Name:	D:\Dokumenty\FSI VUT\DP\Vzduchovka - meření\Střelba ze stativz 20.02.08\8220192m\8220192m.avi									
Calibration										
Calibration	6,933911 Pixels / Millimeter									
Tilt	0 Degrees									
Export Uni Meters										
Tracking Data										
Frame	Time	Track Point 1				Track Point 2				
		x	y	distance	speed	x	y	distance	speed	
16	0,0016	0,013124	0,017162	0,021605	0	0,011826	0,014999	0,0191	0	
17	0,0017	0,021921	0,016729	0,027576	88,07977	0,020768	0,014566	0,025367	89,52024	
18	0,0018	0,031007	0,016297	0,035029	90,96077	0,029709	0,014278	0,032962	89,46214	

Obrázek 24: Data analýzy

Tímto jsou možnosti analýzy v programu i-SPEED 2 ve verzi Basic vyčerpány. Ve vyšší verzi lze nastavit automatické sledování charakteristického bodu, dále provádět podrobnější analýzu pohybu a vytvořit grafy uživatelských údajů. Pro analýzu ústřední rychlosti však plně postačí možnosti programové verze Basic.

4.4 Měření střely Diabolo

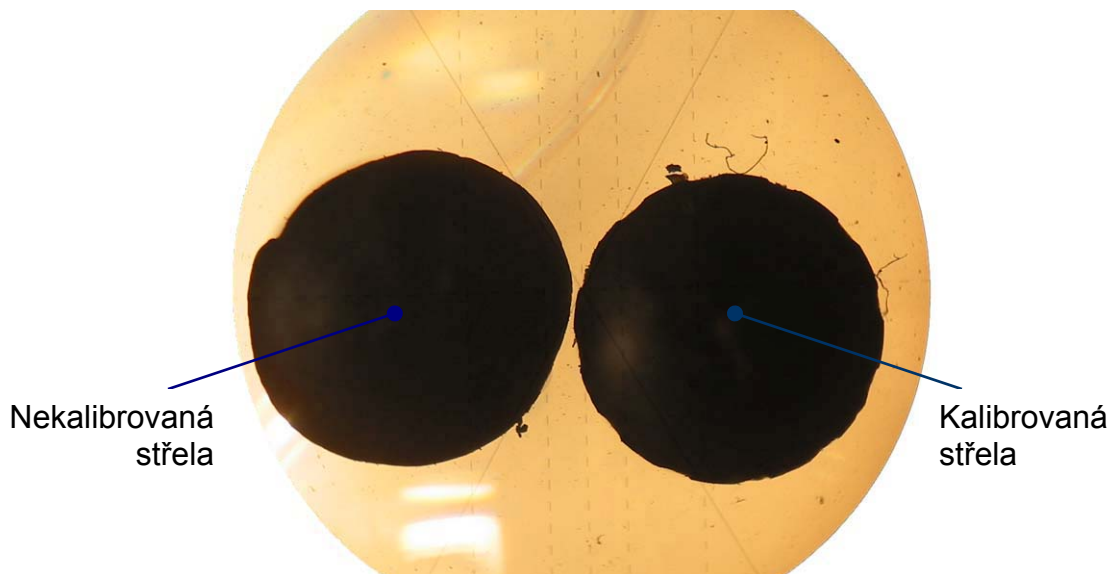
Pro přesnou kalibraci v programu i-SPEED 2 je nutné znát rozměr analyzovaného objektu nebo rozměr jiného objektu na snímku, který leží v rovině analyzovaného objektu. Pro případ měření ústové rychlosti vzduchové pistole byl změřen průměr střely Diabolo.

Pro toto měření byl zvolen univerzální dílenský mikroskop PK3 stavebnicového typu, který je konstruován pro měření délek (v pravouhlých i polárních souřadnicích), úhlů, závitů a porovnávání tvarů závitů. Může být použit i jako prohlížecí mikroskop pro zkoumání opracovaných kovových povrchů, minerálů, atd. Technické údaje měřicího mikroskopu PK3 uvádí tabulka 3.

Tabulka 3: Technické údaje měřicího mikroskopu PK3

Rozlišitelnost	posuv mikrometrického šroubu	0,001	[mm]
	úhel v okuláru pro měření úhlů	1´	[´]
	úhel v revolverovém okuláru	10´	[´]
	úhel na kruhovém stole	6´	[´]
Rozsah měření	mikrometrický šroub v ose x	0 až 20	[mm]
	posuv v ose x	0 až 70	[mm]
	mikrometrický šroub v ose y	0 až 20	[mm]
	posuv v ose y	0 až 50	[mm]
	úhel v okuláru pro měření úhlů	0 až 360	[°]
	úhel na kruhovém stole	0 až 180	[°]
Hmotnost		400	[kg]

Pro zpřesnění bylo změřeno 15 střel typu Diabolo Standard ve dvou na sobě kolmých směrech. Před měřením byla každá střela Diabolo protlačena hlavní vzduchové pistole, protože jednotlivé projektily jsou při průchodu hlavní po výstřelu mírně deformovány a jejich průměry se vyrovnají a nepatrně zmenší. Tato skutečnost je zachycena na obrázku z měřicího mikroskopu (viz obrázek 25). Naměřené hodnoty, aritmetický průměr a interval spolehlivosti udává tabulka 4. Grafické zobrazení naměřených hodnot průměru střely obsahuje graf 1.



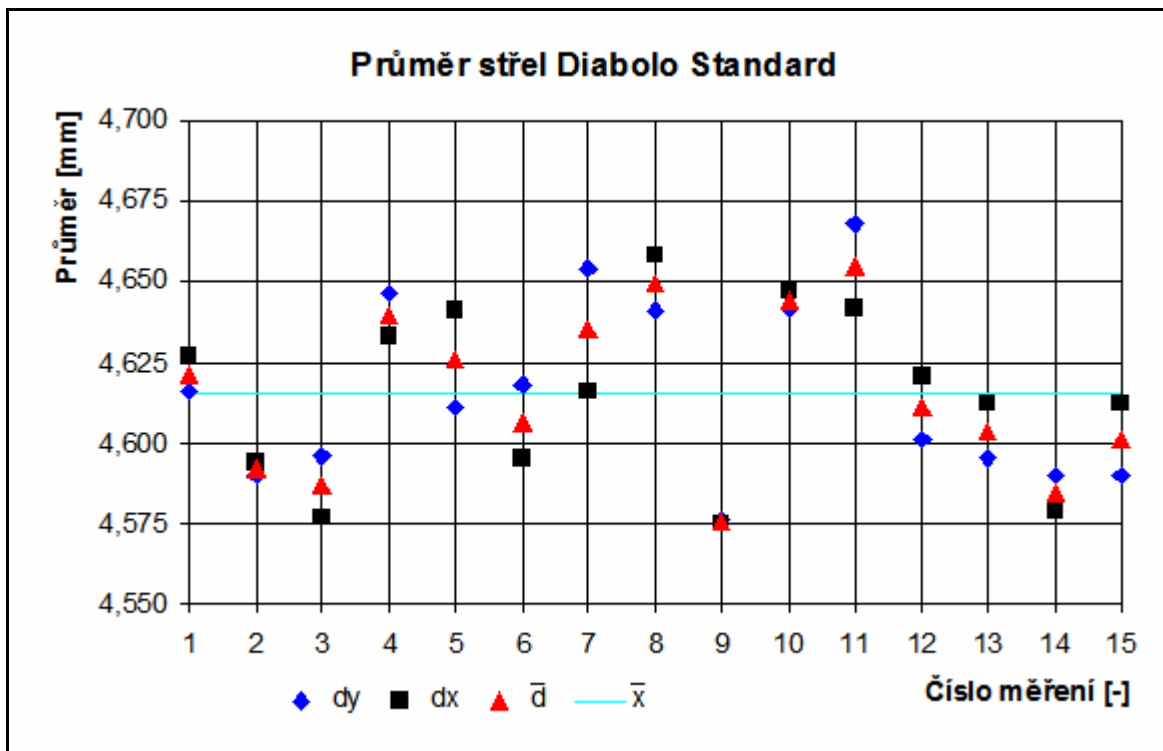
Obrázek 25: Střely Diabolo zvětšené 30x měřicím mikroskopem PK3

Pro interval spolehlivosti byla zvolena spolehlivost $1 - \alpha = 0,95$, tedy 95%. Počet měřených projektilů je 15, proto je použito studentovo rozdělení. Hodnota kvantilu t_p Studentova rozdělení pro spolehlivost 0,975 je $t_{0,975} = 2,131$. Pro výpočet intervalu spolehlivosti byl použit následující vzorec:

$$\bar{x} - t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Tabulka 4: Naměřené hodnoty průměru střely Diabolo

č.m.	y2	y1	dy	x2	x1	dx	\bar{d}
1	46,427	41,811	4,616	76,012	71,385	4,627	4,622
2	47,447	42,857	4,590	76,162	71,568	4,594	4,592
3	48,052	43,456	4,596	74,825	70,248	4,577	4,587
4	48,743	44,097	4,646	75,600	70,967	4,633	4,640
5	50,406	45,795	4,611	75,763	71,122	4,641	4,626
6	49,029	44,411	4,618	74,995	70,400	4,595	4,607
7	48,339	43,685	4,654	75,313	70,697	4,616	4,635
8	48,364	43,723	4,641	76,071	71,413	4,658	4,650
9	48,411	43,835	4,576	76,051	71,476	4,575	4,576
10	46,102	41,460	4,642	74,990	70,343	4,647	4,644
11	46,525	41,857	4,668	71,981	67,339	4,642	4,655
12	47,357	42,756	4,601	71,870	67,249	4,621	4,611
13	49,801	45,206	4,595	70,617	66,005	4,612	4,604
14	50,655	46,065	4,590	70,575	65,996	4,579	4,585
15	47,946	43,356	4,590	70,602	65,990	4,612	4,601
$\bar{x} =$							4,615
$s =$							0,025
$t_{0,975} =$							2,131
$4,601 < \mu < 4,629$							



Graf 1: Průměr střely Diabolo

4.5 Analýza vysoce rychlého děje

Z dat měření lze vygenerovat datový soubor, který je možno otevřít v programu MS Excel nebo jiném tabulkovém procesoru. V datovém souboru jsou uvedeny jednak formální informace o datu, času vygenerování a cestě k výchozímu souboru s jeho názvem. Dále jsou zde přítomny informace o kalibraci známého rozměru pro potřeby počítání vzdáleností a o tom, v jakých jednotkách jsou data vygenerována. Následuje seznam naměřených údajů pro zadané body. Pro každý z nich je zde uvedeno pořadí snímku videoklipu, na kterém se nachází, čas od počátku videoklipu, absolutní vzdálenosti na snímku v ose „x“ a „y“, relativní vzdálenost mezi body a rychlost střely. Rychlost je vypočítána jako podíl vzdálenosti mezi body na dvou po sobě následujících snímcích a rozdílu časů zaznamenání těchto dvou snímků.

$$v = \frac{d}{t_2 - t_1} [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

- Kde:
- v – rychlost
 - d – vzdálenost
 - t_1 – čas záznamu prvního snímku
 - t_2 – čas záznamu druhého snímku

Sledovaná data byla vygenerována 4.3.2008 v 13:19 ze souboru 8220192m.avi programem i-Speed 2. Kalibrací bylo zjištěno měřítko 6,933911 pixelů na milimetr a jednotkou pro export byl zvolen metr.

Tabulka 5: Sledovaná data souboru 8220192m.avi

Frame	Time	Track Point 1		distance	speed
		x	y		
16	0,00159999995958060	0,013124	0,017162	0,021605	0
17	0,00170000002253801	0,021921	0,016729	0,027576	88,07977
18	0,00179999996908009	0,031007	0,016297	0,035029	90,96077
Frame	Time	Track Point 2		distance	speed
		x	y		
16	0,00159999995958060	0,011826	0,014999	0,0191	0
17	0,00170000002253801	0,020768	0,014566	0,025367	89,52024
18	0,00179999996908009	0,029709	0,014278	0,032962	89,46214
Frame	Time	Track Point 3		distance	speed
		x	y		
16	0,00159999995958060	0,011826	0,019181	0,022534	0
17	0,00170000002253801	0,020768	0,018893	0,028075	89,46214
18	0,00179999996908009	0,029709	0,018316	0,034901	89,60152
Frame	Time	Track Point 4		distance	speed
		x	y		
16	0,00159999995958060	0,007067	0,017162	0,01856	0
17	0,00170000002253801	0,016297	0,016729	0,023355	92,40135
18	0,00179999996908009	0,025238	0,016441	0,030121	89,46214

Z vygenerovaných dat bylo pro vybraný snímek zjištěno výše popsaným způsobem 8 údajů o rychlosti střely. Z těchto dat byl vypočten interval spolehlivosti dle vzorce 2.

$$\bar{x} = 89,86876$$

$$s = 1,281513$$

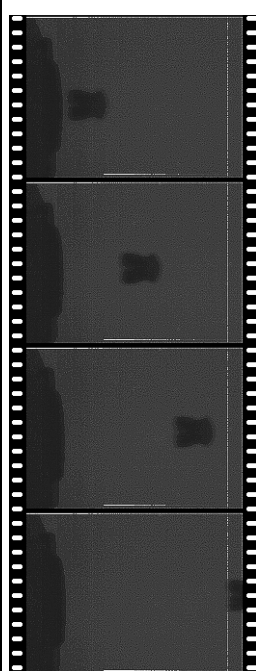
$$t_{0,975} = 2,306$$

$$\bar{x} - t_{0,975} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{0,975} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \Rightarrow \underline{89,10574} < \mu < \underline{90,63178}$$

Jako další snímek pro vyhodnocení byl vybrán 8220191m.avi. Data byla vygenerována 12.3.2008 ve 14:50. Kalibrací bylo zjištěno měřítko 6,717227 pixelů na milimetr.

Tabulka 6: Sledovaná data souboru 8220191m.avi

Frame	Time	Track Point 1		distance	speed
		x	y		
11	0,00109999999403954	0,012207	0,013696	0,018347	0
12	0,00120000005699694	0,020395	0,01325	0,024321	82,00075
13	0,00130000000353903	0,028583	0,012952	0,031381	81,93315
14	0,00139999995008111	0	0	0	0
Frame	Time	Track Point 2		distance	speed
		x	y		
11	0,00109999999403954	0,006253	0,013696	0,015056	0
12	0,00120000005699694	0,014738	0,01325	0,019818	84,97391
13	0,00130000000353903	0,023075	0,012952	0,026461	83,42089
14	0,00139999995008111	0,031114	0,012654	0,033589	80,44544
Frame	Time	Track Point 3		distance	speed
		x	y		
11	0,00109999999403954	0,007444	0,016227	0,017853	0
12	0,00120000005699694	0,015483	0,01578	0,022107	80,51429
13	0,00130000000353903	0,023819	0,015483	0,028409	83,42089
14	0,00139999995008111	0,032156	0,015036	0,035498	83,48729
Frame	Time	Track Point 4		distance	speed
		x	y		
11	0,00109999999403954	0,009974	0,011761	0,015421	0
12	0,00120000005699694	0,018311	0,011463	0,021603	83,42089
13	0,00130000000353903	0,026201	0,011314	0,02854	78,91566
14	0,00139999995008111	0	0	0	0



Z tohoto měření bylo zjištěno 10 údajů o rychlosti střely. Interval spolehlivosti pro tuto analýzu je uveden níže.

$$\bar{x} = 82,25332$$

$$s = 1,844297$$

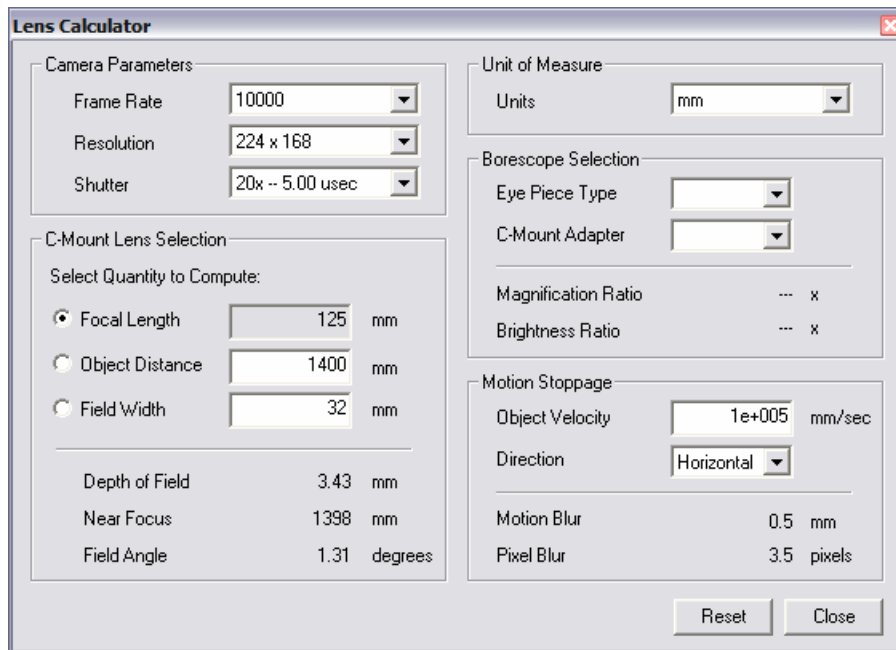
$$t_{0,975} = 2,228$$

$$\bar{x} - t_{0,975} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{0,975} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \Rightarrow \underline{\underline{80,95391 < \mu < 83,55273}}$$

Další pořizené snímky nejsou pro analýzu ústřední rychlosti příliš vhodné, protože díky delší expozici při snímání již vykazují značnou pohybovou neostrost. Na rozmazané objekty se při analýze obtížně umísťují body pro sledování pohybu a proto se do měření vnášejí nepřesnosti.

4.6 Výpočet neostrosti programem „Lens Calculator“

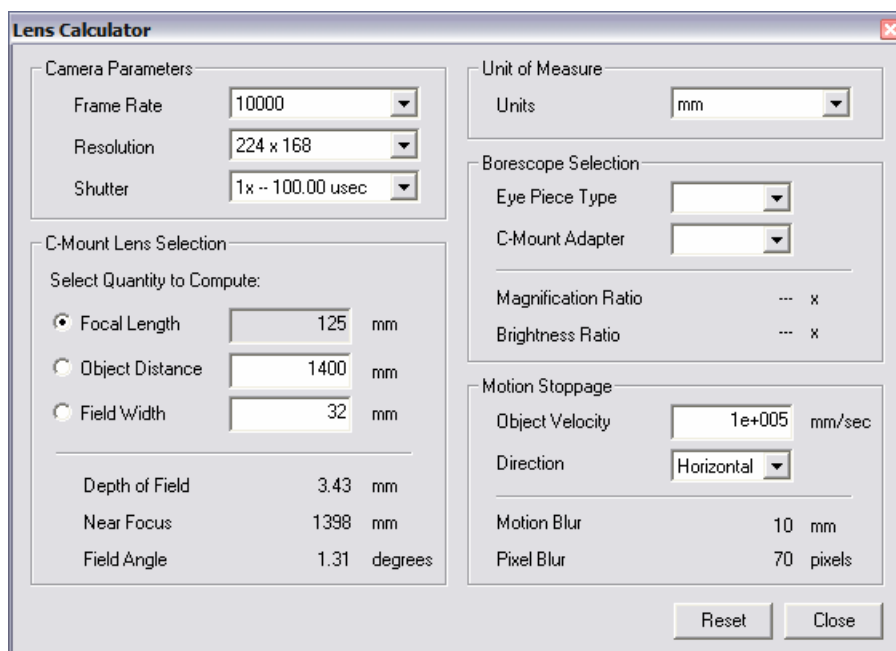
Pro výpočet pohybové neostrosti můžeme využít program „Lens Calculator“ (Kalkulačka objektivů), který je součástí programu i-SPEED 2. Po zadání požadovaných údajů do tohoto programu je bezprostředně vypočítána velikost neostrosti, hloubka ostrosti a úhel záběru. V prvním oddílu zobrazeného okna programu je nutné zadat jednotlivé parametry nastavení kamerového systému – rychlost snímání, rozlišení a rychlost elektronické závěrky. Další oddíl se zabývá objektivy C-Mount. Dva údaje ze tří je nutné vyplnit a třetí (v šedém poli) je automaticky doplněn. Obrázek 26 znázorňuje případ, kdy je zadána vzdálenost objektu od objektivu a šířka snímaného pole. Ohnisková vzdálenost je programem dopočítána. Dále je v druhém oddílu zobrazen výpočet hloubky ostrosti, nejbližší zaostřené vzdálenosti a úhlu záběru. Třetí oddíl obsahuje nabídku jednotek, ve kterých jsou zadávány a počítány příslušné údaje. Oddíl pro výběr boroskopu obsahuje nabídku různých firemních typů zařízení, které lze přes adaptér namontovat namísto objektivu k vysokorychlostní kameře. Poslední oddíl programu vyžaduje zadání rychlosti snímaného objektu a informace, zda bude pohyb objektu na snímku zachycen v horizontální nebo vertikální ose. Ve spodní části tohoto oddílu je pak spočítána pohybová neostrost v jednotkách vzdálenosti i v počtu rozmazaných pixelů. Rychlost snímání a násobek elektronické závěrky by měly být voleny tak, aby byla velikost pohybové neostrosti co nejmenší a přitom bylo zachováno co možná největší rozlišení snímání. Některé typy dějů však není vhodné snímat s vyšší rychlostí závěrky, protože by nebyla správně zachycena kontinuita děje. Pak je nutné ponechat shutter na hodnotě 1x a velikost neostrosti je nutno regulovat pouze snímkovou frekvencí.



Obrázek 26: Kalkulačka objektivu

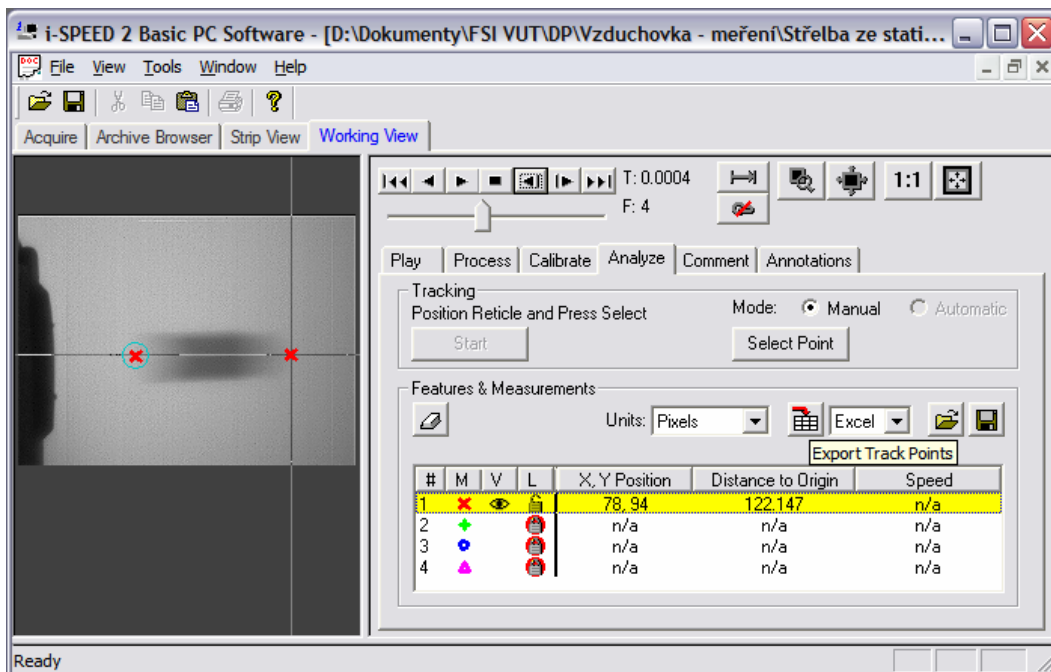
Nejvhodnější nastavení dle programu i-SPEED 2 je rychlost 10 000 snímků za sekundu a Shutter 20x. Hloubka ostrosti při daném nastavení byla asi 3,5 mm a pohybová neostrost byla programem vypočítána na 3,5 pixelů.

Pro ověření správnosti výpočtů programu Lens Calculator byl použit videoklip s rychlostí snímání 10 000 fps a závěrkou nastavenou na hodnotě 1x. Programem bylo zjištěno pohybové rozmazání velké 70 pixelů (10 mm).



Obrázek 27: Výpočet programu pro 10 000 fps a shutter 1x

Pro tento účel byl v programu i-SPEED 2 otevřen příslušný snímek s názvem 8220187.avi a byl zkalibrován s použitím známého průměru střely. Pak byl v analýze označen počátek a konec střely, přičemž bylo nutné co nejlépe zachytit hranici, kde začínalo rozmazání sledovaného objektu.

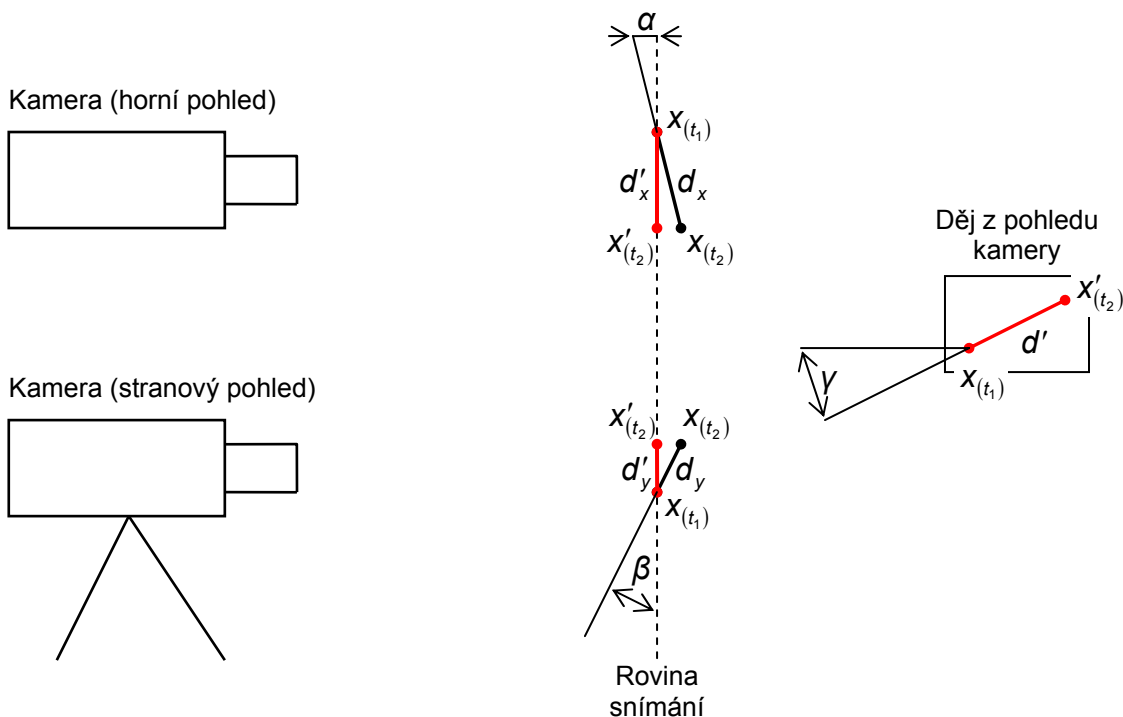


Obrázek 28: Zachycení délky střely včetně rozmazání

Po vygenerování tabulkových dat byla spočítána délka střely včetně rozmazání, která činila 103 pixelů. Přitom reálná délka projektilu je 5 mm. Při kalibraci bylo zjištěno měřítko 6,9339111 pixelů/mm, z čehož lze určit reálnou délku střely v obrazových bodech. Ta činí asi 34,7 pixelů. Po odečtení celkové změřené délky střely v programu i-SPEED 2 a reálné délky, vychází na pohybové rozmazání asi 68,3 pixelů. Po přepočtu na jednotky délky a zaokrouhlení vychází hodnota pohybové neostrosti na 9,9 mm. Tyto hodnoty jsou s výpočtem kalkulačky objektivů velice blízké, proto je přínos programu pro zjištění vhodného nastavení kamerového systému hodnocen kladně.

5 MOŽNOSTI ZPŘESNĚNÍ MĚŘENÍ

Při analýze pohybu vysokorychlostním kamerovým systémem jde, stejně jako u měření součástí, o měření vzdáleností. Zde se však nejedná o dva různé body na jedné součásti, ale o shodný (charakteristický) bod, který se pohybuje. Ačkoliv kamerový systém snímá pohyb prostorový, vyhodnotit s dostatečnou přesností lze pouze pohyb rovinný. Navíc je nutné, aby rovina snímaného pohybu byla co nejvíce rovnoběžná s rovinou obrazového snímače. Pohyb, který není rovnoběžný s rovinou snímače, je v podstatě promítán do této (ohniskové) roviny. Při snímání je tedy nutné co nejpřesnější nastavení kamery kolmo na rovinu snímaného děje. Pokud není tato kolmost dodržena, vzniká chyba měření, která vychází z nepřesného odměření vzdálenosti charakteristického bodu v po sobě následujících snímcích.



$x_{(t_1)}$ – vyhodnocovaný bod v čase t_1

$x_{(t_2)}$ – vyhodnocovaný bod v čase t_2

$x'_{(t_2)}$ – průmět vyhodnocovaného bodu $x_{(t_2)}$ do ohniskové roviny

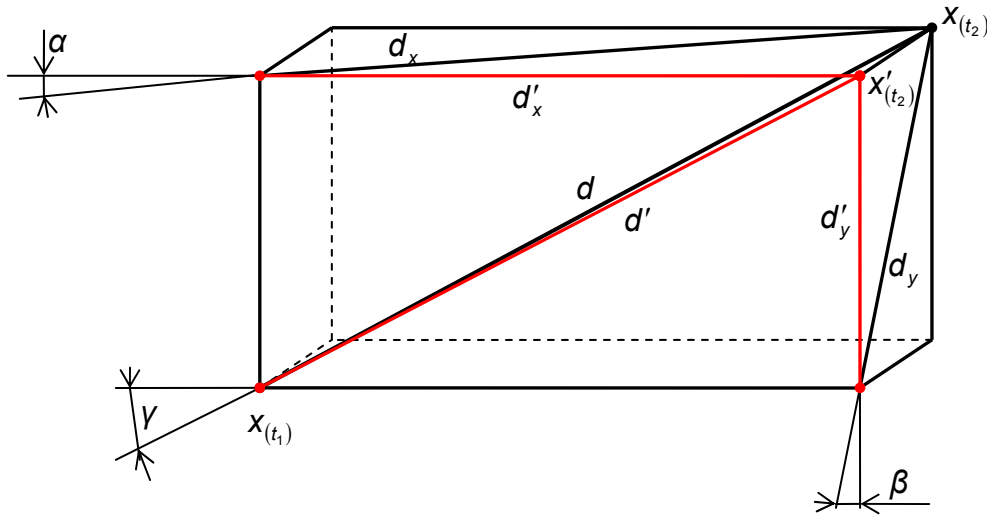
d_x (d_y) – zobrazení vzdáleností mezi body $x_{(t_1)}$ a $x_{(t_2)}$ ve vodorovné (svislé) rovině

d'_x (d'_y) – průmět vzdáleností d_x (d_y) do ohniskové roviny

d' – vzdálenost nasnímaná kamerovým systémem

Skutečnou vzdálenost d lze vyjádřit výpočtem:

$$d = \sqrt{d'^2 + (d'_y \cdot \operatorname{tg} \beta)^2} = \sqrt{d'^2 + (d' \cdot \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta)^2} \quad (4)$$



5.1 Polohovací zařízení

Pro eliminaci chyby měření, která vzniká v důsledku špatného polohování kamery byl v programu SolidWorks předběžně navrhnut polohovací mechanismus. Tento polohovací systém umožňuje pomocí dvou kloubů natáčení v horizontálním a vertikálním směru. Mechanismus dále umožňuje uchycení ultrazvukového detektoru vzdáleností Casio EA-2 (viz obrázek 29). Pomocí tohoto detektoru lze určit natočení odpovídající minimální vzdálenosti od snímané roviny. V této poloze je kamera nastavena kolmo ke snímané scéně.



Obrázek 29: Ultrazvukový detektor Casio EA-2

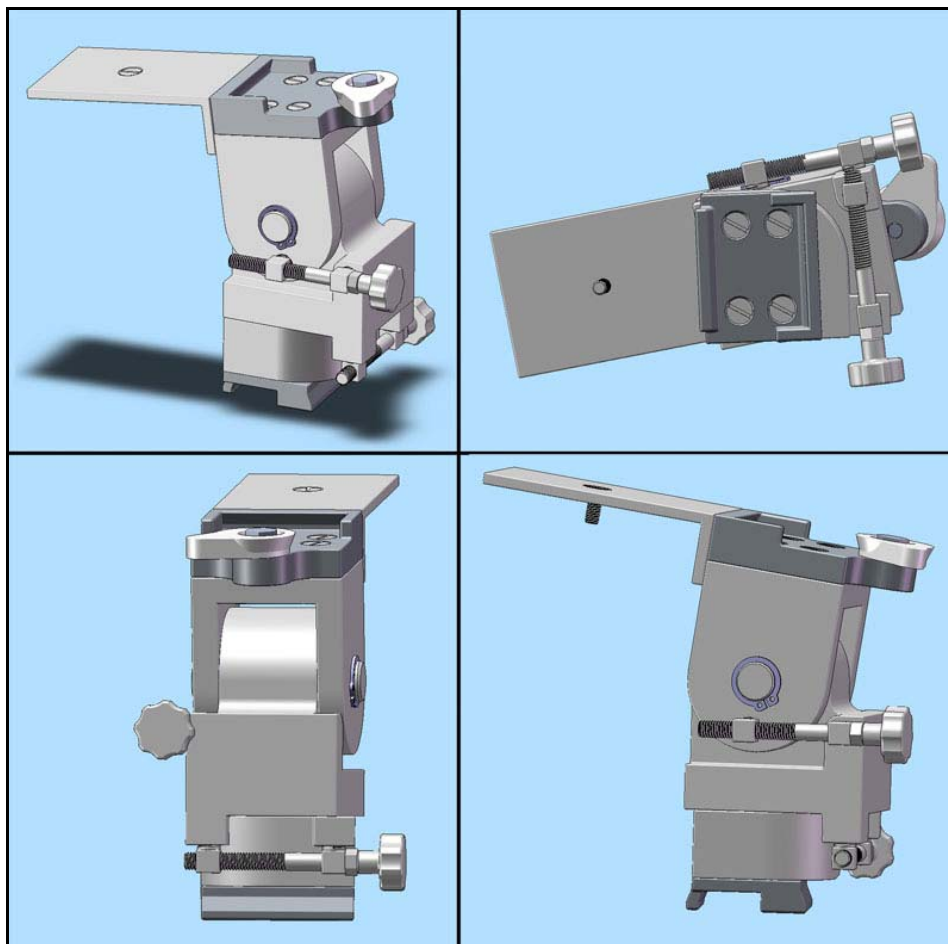
Polohovací zařízení propojené s hrubě narýsovaným kamerovým systémem, ultrazvukovým detektorem vzdálenosti a stativem ilustruje obrázek 30. Náčrt kamerového systému i detektoru vzdáleností respektuje skutečné rozměry.



Obrázek 30: Polohovací zařízení propojené s kamerovým systémem

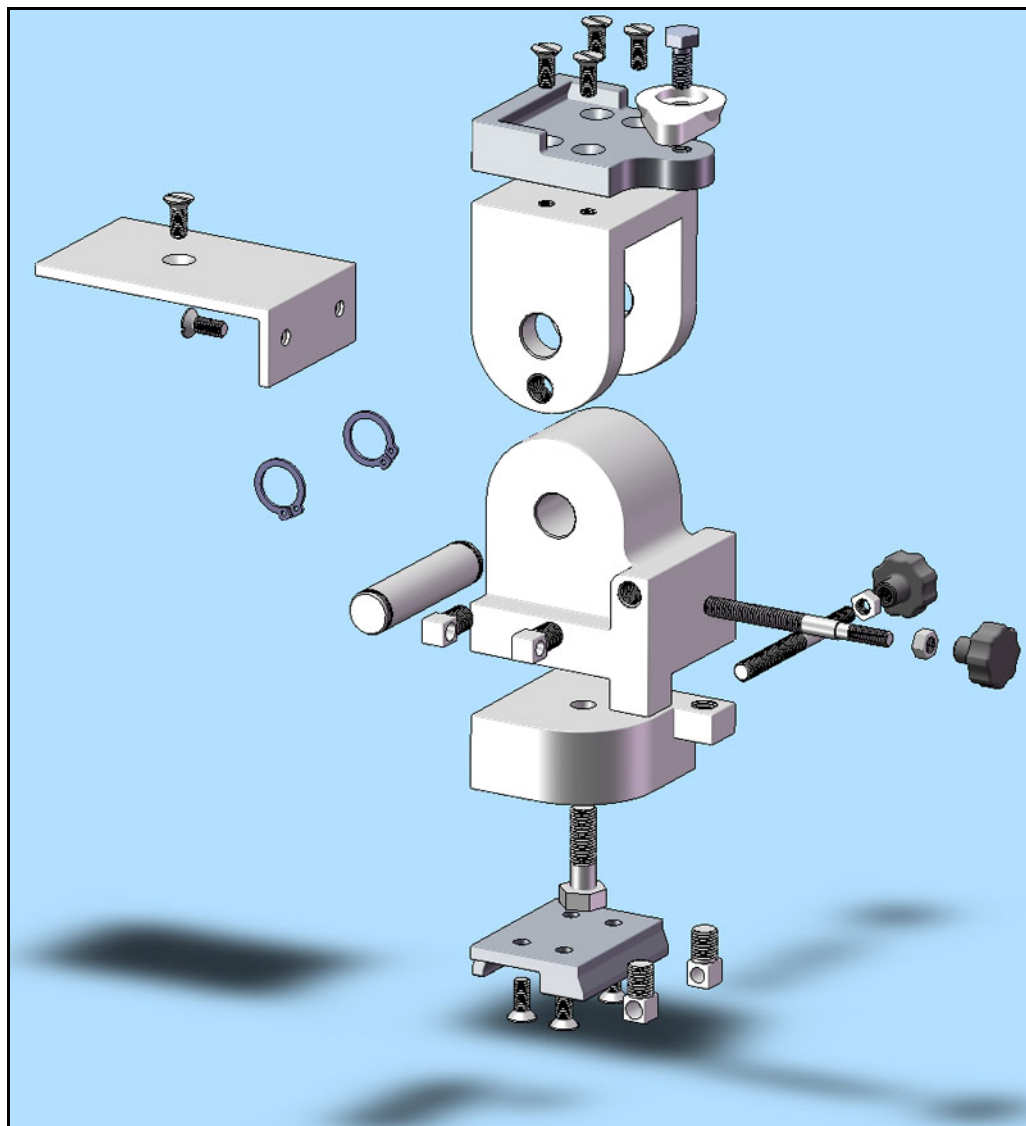
Polohovací systém se skládá ze dvou kloubů. Horní kloub umožňuje naklápění kamery ve vertikální rovině a spodní část připevněná centrálním šroubem umožňuje natáčení v rovině horizontální. Poloha je nastavitelná polohovacími šrouby. Připevnění polohovacího zařízení je realizováno rychloupínacím mechanismem, který je konstruován se stejnými rozměry jako upínací mechanismus stativu. Polohovací zařízení je tedy možné bez problémů vložit mezi stativ a kameru. V přední části polohovadla se nachází úchyt pro ultrazvukový detektor vzdáleností. Ten lze k držáku připevnit pomocí šroubu se standardním stativovým závitem (1/4" Whitworth).

Obrázek 31 zobrazuje detailněji polohovací zařízení z různých úhlů pohledu.



Obrázek 31: Polohovací zařízení

Obrázek 32 zobrazuje polohovací zařízení po rozložení jednotlivých dílů.



Obrázek 32: Pohled rozložení polohovacího zařízení

6 ROZVAHA NEJISTOTY MĚŘENÍ

Definice říká, že nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině.

V případě měření pomocí vysokorychlostního kamerového systému lze nejistotu rozdělit na část vznikající při samotném snímání a část, která vzniká při následné analýze v programu i-SPEED 2.

6.1 Nejistota snímání

Nejistotu typu A (ze snímání) lze určit jako směrodatnou odchylku z několika opakování měření za stejných podmínek a při shodném nastavení kamerového systému. Standardní nejistota typu A se vypočítá podle vzorce 5. Při měření ústové rychlosti by byl zřejmě zjištěn větší rozptyl hodnot v důsledku velkého množství proměnných faktorů, které působí při střelbě ze vzduchové pistole. Tyto faktory zahrnují například nestejnou eliminaci ztráty energie při zpětném rázu, nepřesný průřez střel Diabolo, atd.

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} = u_A \quad (5)$$

Do nejistoty typu B by bylo třeba zařadit především nejistotu vztahující se k nepřesnému nastavení kamerového systému kolmo na rovinu snímaného děje. Nejistota z teplotního rozdílu by zřejmě měla zanedbatelný vliv na celkovou nejistotu, neboť měření není náchylné na změnu teploty a doba snímání je velice krátká.

6.2 Nejistota analýzy

Nejistotu typu A, vznikající při vyhodnocování rychlého děje, lze určit jako směrodatnou odchylku z několika sledovaných bodů na snímaném objektu v několika po sobě následujících snímcích (výpočet dle vzorce 5).

Do nejistoty typu B analýzy spadá nejistota vyplývající z rozlišení nasnímaného děje a nejistota přecházející z nejistoty měření rozměru, který je použit při kalibraci. Za rozlišení by byla dosazena velikost pixelu, což je převrácená hodnota veličiny zjištěné při kalibraci.

Po zjištění všech elementárních nejistot by byla spočítána kombinovaná nejistota (viz vzorec 6) a ta by byla následně rozšířena o koeficient pokrytí $k_u = 2$ (rozšířená nejistota viz vzorec 7).

$$u_C = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + \dots + u_{xn}^2} \quad (6)$$

$$U = k_u \cdot u_C \quad (7)$$

Zjištění nejistoty měření, získaného pomocí vysokorychlostního kamerového systému, je velice složité. Tato problematika zde byla nastíněna pouze v hrubých rysech a její exaktní řešení by vyžadovalo hlubší výzkum a rozsáhlejší měření.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na zkoumání rychlých dějů pomocí vysokorychlostního kamerového systému. V praktické části práce je důkladně popsáno snímání a vyhodnocení rychlého děje, který představuje měření úst'ové rychlosti střely typu Diabolo vystřelené ze vzduchové pistole. Měření úst'ové rychlosti bylo vybráno především s ohledem na proveditelnost a opakovatelnost v laboratorním prostředí. Při dodržení přísných bezpečnostních opatření je měření vhodné jako atraktivní demonstrace do předmětu „optická metrologie“. Vybraný děj je velice extrémní ukázka, která odhaluje kvality vysokorychlostního kamerového systému.

V práci je nastíněno možné řešení zvýšení přesnosti kamerového systému pomocí polohovacího zařízení v součinnosti s detektorem vzdáleností. Předběžný návrh polohovacího zařízení byl vytvořen v programu SolidWorks. V závěru práce je provedena rozvaha nejistoty měření. Součástí diplomové práce je také zpracování výukové prezentace pro studenty předmětu „optická metrologie“.

Dílčí cíl seznámení se s řadou norem ČSN EN 10 30, normou ČSN EN 13 018 a ČSN EN 13 927 vedl k poznání, že v jejich obsahu lze nalézt jen velmi málo informací, které by byly přínosné pro tak specifický úkol jako je měření s využitím vysokorychlostního kamerového systému. Ostatní cíle práce byly zpracovány v potřebném rozsahu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CoJeCo [online]. 1999 , 20.9.2006 [cit. 2008-03-03]. Dostupné na internetu: <http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=4243&s_lang=2&title=aperiodick%FD%20pohyb>.
2. ČSN EN 13018:2002, Nedestruktivní zkoušení - Vizuální kontrola – Všeobecné zásady.
3. ČSN EN 1330-1:2000, Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 1: Všeobecné termíny.
4. ČSN EN 1330-2:2000, Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 2: Společné termíny pro metody nedestruktivního zkoušení.
5. ČSN EN 1330-10:2003, Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 10: Termíny používané při vizuální kontrole.
6. ČSN EN 13927:2003, Nedestruktivní zkoušení - Vizuální kontrola – Zařízení.
7. ČSN ISO 690:1996, Dokumentace. Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura.
8. ČSN ISO 690-2:2000, Informace a dokumentace - Bibliografické citace - Část 2: Elektronické dokumenty nebo jejich části.
9. KNEUBUEHL, Beat P. Balistika : střely, přesnost střelby, účinek . Praha : Naše vojsko, 2004. 235 s. Přeloženo z němčiny . ISBN 80-206-0749-8.
10. KOUTNÝ, František. *Calculus Isaaca Newtona a minimalizace* [online]. 2006 [cit. 2008-03-03]. Dostupné na internetu: <<http://www.zas.cz/download/newton-predn.pdf>>.
11. LEIMVEBER, Jan, ŘASA, Jaroslav, VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. 2. přeprac. vyd. Brno : CENTA, 1998. 911 s. ISBN 80-7183-123-9.
12. LIMPOUCH , Jiří. *Katedra fyzikální elektroniky - ČVUT Praha* [online]. 2000 [cit. 2008-03-03]. Dostupné na internetu: <<http://kfe.fifi.cvut.cz/~limpouch/sigdat/pravdh/node1.htm>>.
13. *Olympus* [online]. 2007 [cit. 2008-03-28]. Dostupné na internetu: <http://www.olympus.cz/industrial/28_734.htm>.
14. Olympus i-SPEED 2, Instructions, High speed video camera system.
15. Olympus i-SPEED 2, User guide, PC Software.
16. PATA, Vladimír. Vysokorychlostní kamerové systémy. 1. vyd. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 93 s. ISBN 80-7204-480-X.

17. PERNIKÁŘ, Jiří, TYKAL, Miroslav. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
18. SVOBODA, Pavel, KOVÁŘÍK, Robert, BRANDEJS, Jan. Základy konstruování. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2001. 186 s. ISBN 80-7204-212-2.
19. VLACHOVÁ, Magda. *Matematicko-fyzikální web* [online]. 2005 [cit. 2008-03-03]. Dostupné na internetu: <<http://mfweb.wz.cz/fyzika/129.htm>>.
20. *Wikipedia* [online]. 2001 , 8. 5. 2007 [cit. 2008-03-03]. Dostupné na internetu: <<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/484114-periodicky-dej>>.

9 KLÍČOVÉ VÝRAZY V ANGLIČTINĚ

Ballistic	Balistika
Calibration	Kalibrace
Circular buffer	Kruhová paměť
Depth of field	Hloubka ostrosti
Direction	Směr
Exposure time	Expoziční čas
Fast process	Rychlé děje
Field angle	Úhel záběru
Focal length	Ohnisková vzdálenost
Frame	Snímek
Frames per second (FPS)	Počet snímků za vteřinu
Initial velocity	Ústřední rychlost
Integration time	Doba integrace
Lens	Objektiv
Lens calculator	Kalkulačka objektivů
Lighting	Osvětlení
Motion blur	Pohybová neostrost
Pixel	Obrazový bod
Playback rate	Rychlost přehrávání
Record time	Délka záznamu
Resolution	Rozlišení
Sensor	Obrazový snímač
Sharpen	Zaostření
Shutter	Závěrka
Shutter time	Čas závěrky
Smooth	Vyhlazení
Speed	Rychlost
Trigger	Spoušť
Unit	Jednotka
Video images	Videosekvence
View finder	Hledáček
Windowing	Výřez
Working view	Pracovní okno

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky

BROC	Burst Record On Command - nahrávání předem nastavené doby na příkaz
CDU	Controller Display Unit - ovladač displeje
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
f	ohnisková vzdálenost
FPN	pevný obrazec rušení
fps	Frames Per Second - snímků za sekundu
MS	Microsoft
pixel	obrazový bod (ze slov Picture Element)
ROC	Record On Command - nahrávání na příkaz
UHP	Ultra High Performance - ultra vysoký výkon

Jednotky

GB	gigabyte
kg	kilogram
m	metr
$m \cdot s^{-1}$	metr za sekundu
mm	milimetr
ms	milisekunda
s	sekunda
W	watt
μs	mikrosekunda

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1: Kompaktní kamera TroubleShooter
- Obrázek 2: Casio Exilim Pro EX-F1
- Obrázek 3: Redlake MotionXtra HG-XR
- Obrázek 4: Vysokorychlostní kamerový systém Olympus i-SPEED 2
- Obrázek 5: Konektorové osazení zadní stěny kamery
- Obrázek 6: 10 000 snímků za sekundu, shutter 1x
- Obrázek 7: 10 000 snímků za sekundu, shutter 2x
- Obrázek 8: 10 000 snímků za sekundu, shutter 20x
- Obrázek 9: Vzduchová pistole Gamo P-800
- Obrázek 10: Uchycení vzduchové pistole
- Obrázek 11: Použitý objektiv
- Obrázek 12: Konfigurace kamerového systému
- Obrázek 13: Světelný zdroj Olympus ILP-1
- Obrázek 14: Rychlé menu
- Obrázek 15: Menu přehrávání
- Obrázek 16: Menu výběru klipu
- Obrázek 17: Strip View
- Obrázek 18: Pracovní okno - přehrávání
- Obrázek 19: Zpracování obrazu
- Obrázek 20: Kalibrace
- Obrázek 21: První bod analýzy
- Obrázek 22: Druhý a třetí bod analýzy
- Obrázek 23: Analýza čtyř charakteristických bodů
- Obrázek 24: Data analýzy
- Obrázek 25: Střely Diabolo zvětšené 30x měřícím mikroskopem PK3
- Obrázek 26: Kalkulačka objektivu
- Obrázek 27: Výpočet programu pro 10 000 fps a shutter 1x
- Obrázek 28: Zachycení délky střely včetně rozmazání
- Obrázek 29: Ultrazvukový detektor Casio EA-2
- Obrázek 30: Polohovací zařízení propojené s kamerovým systémem
- Obrázek 31: Polohovací zařízení
- Obrázek 32: Pohled rozložení polohovacího zařízení

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Ukázka vybraných rychlostí a rozlišení kamery Redlake

Tabulka 2: Jmenovité hodnoty rychlostí a rozlišení

Tabulka 3: Technické údaje měřicího mikroskopu PK3

Tabulka 4: Naměřené hodnoty průměru střely Diabolo

Tabulka 5: Sledovaná data souboru 8220192m.avi

Tabulka 6: Sledovaná data souboru 8220191m.avi

13 SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE

Microsoft® Office Word 2003

Microsoft® Office Excel 2003

Olympus i-SPEED 2 Basic 2.0.1.6

SolidWorks 2007 (SolidWorks Student Edition 2007-2008)

Adobe Photoshop verze: 10.0 (30 denní trial verze)

14 SEZNAM PŘÍLOH

Přílohou diplomové práce je CD s následujícími soubory:

DiplomovaPrace_Kolomaznik.pdf – diplomová práce

XOM_ZkoumaniRychlychDeju.ppt – výuková prezentace do předmětu optická metrologie

Rychle deje – složka s videoklipy pořízenými pro potřeby diplomové práce

Analyzy – složka s daty získanými při analýze