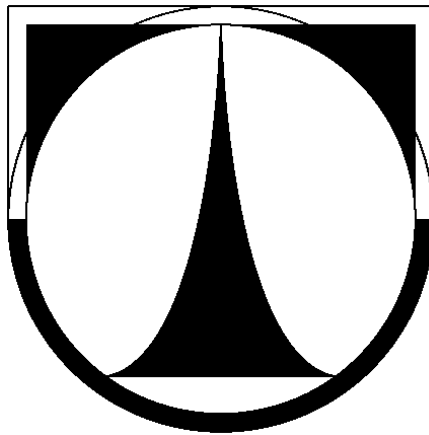


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**DISERTAČNÍ PRÁCE**

Liberec 2017

Ing. David Pavlík

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: P3901 Aplikované vědy v inženýrství

Studijní obor: 3901V055 Aplikované vědy v inženýrství

## **Vývoj metodiky Stereo PIV v komplikovaných experimentálních uspořádáních**

## **Development of Stereo PIV methodology in complicated experimental configurations**

### **DISERTAČNÍ PRÁCE**

Autor: Ing. David Pavlík

Školitel: Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.

Konzultant práce: Ing. Michal Kotek, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé disertační práce (prodej, zapůjčení, apod.).

Jsem si vědom toho, že užit své disertační práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou k vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se školitelem disertační práce a konzultantem.

V Liberci dne 25. 9. 2017

.....  
David Pavlík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto formou bych chtěl poděkovat mému školiteli za vstřícné a vždy ochotné jednání v průběhu mého studia. Dále pak je to osobám, které museli kontrolovat následující text. Z diktátu to byla většinou pořádná bída a i v době automatické kontroly pravopisu, to zřejmě nebyl lehký úkol.

Mé poslední a zajisté to nejdůležitější poděkování směřuji mé rodině. Chtěl bych vyjádřit velký vděk, který jím patří. Bez jejich podpory by nebylo žádné studium možné a to myslím v celém rozsahu počínaje základní školou. **DÍKY!**

## **Anotace**

Experimentální výzkum metodou Stereo PIV dovoluje určit trojrozměrné proudové pole v definované rovině v prostoru, včetně jeho vývoje v čase. Neoddělitelnou součástí měření touto metodou je tzv. kalibrace stereo-snímání. Jedná se o proces, při kterém jsou nalezeny informace o vzájemných vazbách mezi pozorovanou scénou a jednotlivými kamerami. Informace lze definovat na základě několika postupů. Nejvíce využívaným je kalibrace na základě záznamů terčků s definovaným obrazcem, který vyžaduje i řada komerčních měřicích systémů. Při kalibraci je terčik umístěn do zkoumané oblasti a zaznamenán v několika polohách podél osy, která je standardně zvolena kolmo na měřicí rovinu. Komplikace nastávají v případech, kdy není možný pohyb terčiku ve zkoumané oblasti, nebo v situaci, kdy není možné samotné umístění terčiku do oblasti (v tunelu, nádobě, atd.). Problematické je také provedení kalibrace, pokud záznamy terčiku podléhají určité míře optického zkreslení. Disertační práce se zaměřuje na vytvoření metodik, kterými je možné provést měření metodou Stereo PIV ve zmíněných situacích.

**Klíčová slova:** Stereo PIV, trojrozměrná rekonstrukce, rekonstrukce bez terčiku, výrazné optické zkreslení

## Annotation

Experimental research using the Stereo PIV method allows to determine a three-dimensional flow field in a defined plane in the space, including its evolution in time. An inseparable part of this measurement is the so-called stereo view calibration. This is a process in which information about the relationship between the observed scene and used cameras is found. Information can be defined by several approaches. The most used approach is the calibration based on recordings of defined pattern target plate. This approach is also required by a number of commercial measurement systems. During this calibration the target is placed in the investigation area and recorded at several positions along the axis, which is selected perpendicular to the measuring plane. Complications occur when it is not possible to move the target in the investigation area or in a situation where it is not possible to place the target itself in the area (in a closed tunnel, container, etc.). It is also complicated to perform calibration if the records images are subject to significant optical distortion. The dissertation work focuses on the creation of methodologies that can be used in these complicated situations.

**Key words:** Stereo PIV, three-dimensional reconstruction, non-target reconstruction, significant optical distortion

# Obsah

Seznam obrázků a tabulek.....	8
Seznam zkratk a symbolů .....	11
Úvod .....	14
Současný stav metody Stereo PIV .....	15
Zadání disertační práce .....	18
1 Metoda PIV .....	19
1.1 Záznam PIV obrazů .....	20
1.2 Zpracování PIV obrazů .....	21
1.3 Numerické metody zpracování PIV záznamů .....	23
1.3.1 Diskrétní prostorová korelace .....	23
1.3.2 Metoda dvojnásobné Fourierovy transformace a Wienerova– Chinčinoва teorému .....	24
1.3.3 Filtrace dat .....	25
1.4 Omezení a systematické chyby PIV .....	27
1.5 Offset a adaptivní korelace .....	28
1.6 Validace dat .....	30
2 Metoda Stereo PIV .....	31
2.1 Možnosti uspořádání měřícího systému .....	33
2.1.1 Uspořádání s bočním posuvem.....	33
2.1.2 Uspořádání s úhlovým natočením.....	34
2.2 Rekonstrukce trojrozměrné scény.....	37
2.2.1 Rekonstrukce vycházející z geometrie uspořádání .....	37
2.2.2 Rekonstrukce založena na modelu perspektivní kamery .....	40
2.2.3 Rekonstrukce založena na polynomickém modelu .....	46
2.3 Možnosti kalibrace stereo–snímání .....	48
2.4 Omezení a systematické chyby metody Stereo PIV .....	51
2.4.1 Vliv pozorovacích úhlů kamer na chybu měření .....	51
2.4.2 Chyba v identifikaci kalibračního obrazce .....	54
3 Měření metodou Stereo PIV při omezeném přístupu do měř. obl.....	58
3.1 Měření bez možnosti využití kalibračního obrazce .....	58

3.1.1 Analýza problematiky a možné postupy .....	58
3.1.2 Metodika založena na znalosti vnitřních a vnějších parametrů kamer.....	61
3.2 Měření bez možnosti pohybu s kalibračním terčíkem .....	78
3.2.1 Analýza problematiky a možné postupy .....	78
3.2.2 Metodika založena na polynomickém modelu a Willertově metodě.....	79
4 Měření metodou Stereo PIV v přítomnosti výrazného optického zkreslení .....	93
4.1 Analýza problematiky a možné postupy.....	93
4.2 Metodika založena na eliminaci optického zkreslení pomocí polynomického modelu .....	95
5 Souhrn pro výzkum metodou Stereo PIV .....	109
6 Závěr.....	114
Seznam použité literatury.....	117
Publikace spojené s disertační prací.....	121
Příloha A .....	122



## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Záznam PIV obrazů.....	20
Obr. 2: Schéma záznamu PIV obrazu.....	22
Obr. 3: Zpracování PIV záznamu pomocí vzájemné korelace [2].....	24
Obr. 4: Zpracování PIV záznamu pomocí dvojnásobné FT [2].....	24
Obr. 5: Zpracování PIV záznamu pomocí Wienerova-Chinčinova teorému [2].....	25
Obr. 6: Příklad překrytí vyhodnocovaných oblastí ve vertikálním směru [2].....	26
Obr. 7: Technika posunutí druhé vyhodnocované oblasti (offset).....	29
Obr. 8: Princip metody 3D PIV.....	32
Obr. 9: Souřadné systémy.....	32
Obr. 10: Uspořádání s bočním posuvem kamer: vyosení detektorů kamer (nalevo), posuv nahrazen dvojicí zrcadel [4].....	34
Obr. 11: Uspořádání s úhlovým natočením splňující Scheimpflugovu podmínku (vlevo) a vliv perspektivního zkreslení na záznamy kamer [4].....	35
Obr. 12: Uspořádání s úhlovým natočením: varianta snímání laserového řezu z odlišných stran [4].....	36
Obr. 13: Geometrie uspořádání s bočním posuvem [4].....	38
Obr. 14: Geometrie uspořádání s úhlovým natočením [12].....	40
Obr. 15: Zobrazení čtverce a) v euklidovském b) v projektivním prostoru.....	41
Obr. 16: Model perspektivní kamery [17].....	41
Obr. 17: Záznam šachovnicového terčíku.....	44
Obr. 18: Záznam posuvného kalibračního terčíku.....	48
Obr. 19: Posuvný kalibrační terčík.....	49
Obr. 20: Víceúrovňový kalibrační terčík.....	50
Obr. 21: Šachovnicový kalibrační terčík.....	50
Obr. 22: Dvouvrstvý chromatický terčík.....	51
Obr. 23: Vztah mezi relativní chybou složky Z vektoru rychlosti proudění a uspořádáním měřicího systému s bočním posuvem [4].....	53
Obr. 24: Vztah mezi relativní chybou složky Z vektoru rychlosti proudění a uspořádáním měřicího systému s úhlovým natočením [4].....	54
Obr. 25: Chyba zapříčiněná vyosením laserového řezu a kalibračního terčíku [39] ....	56
Obr. 26: Záznam sytících částic osvětlených laserovým řezem.....	59
Obr. 27: Rekonstrukce na základě projekčních matic získaných z korespondencí v obrazech (vlevo) a na základě projekčních matic získaných ze známých umístění bodů ve scéně [33].....	60
Obr. 28: Změna vnějších parametrů kamery v případě rozdílných prostředí měřené oblasti a pracovního prostoru kamer.....	64
Obr. 29: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer.....	66
Obr. 30: Proces verifikace navržené metodiky.....	67
Obr. 31: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data.....	69
Obr. 32: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data.....	69
Obr. 33: Složka Z vektorů rychlosti proudění pro: a) vektorovou mapu získanou navrženou metodikou, b) vektorovou mapu získanou Willertovou metodou.....	70
Obr. 34: Uspořádání měřicího systému.....	72
Obr. 35: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	73

Obr. 36: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	73
Obr. 39: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (klasická metoda s kalibračním terčíkem, DynamicStudio).....	74
Obr. 38: Uspořádání měřicího systému.....	76
Obr. 39: Trojměrná vektorová mapa proudění: pro rychlost otáčení míchadla 300 ot/min (navržená metodika) .....	76
Obr. 40: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: pro rychlost otáčení míchadla 300 ot/min (navržená metodika).....	77
Obr. 41: Identifikace bodů kalibračního obrazce.....	80
Obr. 42: Příklad identifikace bodů v záznamu kalibračního terčíku.....	84
Obr. 43: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě polynomického modelu a Willertovy metody .....	82
Obr. 44: Proces verifikace navržené metodiky .....	85
Obr. 45: Trojměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data.....	86
Obr. 46: Složka Z vektorů rychlosti proudění pro vektorovou mapu získanou navrženou metodikou.....	87
Obr. 47: Trojměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	89
Obr. 48: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	89
Obr. 49: Experimentální uspořádání a základní rozměry nádoby s míchadlem: $H/T=1$ , $D/T=1/3$ , $C/T=1/2$ , $b/T=1/10$ , $1/D=1/4$ .....	91
Obr. 50: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: pro rychlost otáčení míchadla 600 ot/min (navržená metodika).....	92
Obr. 51: Trojměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	92
Obr. 52: Výpočet polynomického modelu v programovém prostředí Dynamic Studio pro tři druhy optického zkreslení: levý sloupec odpovídá zdárnému výpočtu (viz zelená síť, určená vypočteným modelem, kterou jsou body terčíku správně proloženy) a pravý sloupec ukazuje případy, ve kterých již výpočet selhává. ....	94
Obr. 53: Definování společného zorného pole kamer (červený obdélník vymezuje pole v záznamech terčíku, po stranách záznamů je názorně ukázána korelační rovina z příslušného pohledu a vzdálenosti vrcholu od okrajů obrazu) .....	97
Obr. 54: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě polynomického modelu .....	99
Obr. 55: Proces verifikace navržené metodiky .....	100
Obr. 56: Trojměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data.....	102
Obr. 57: Složka Z vektorů rychlosti proudění pro vektorovou mapu získanou navrženou metodikou.....	102
Obr. 58: Trojměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	104
Obr. 59: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika).....	105

*Obr. 60: Ilustrace rozvětvení tvaru T (vlevo) a detail na zkreslení kalibračního terčíku  
přípevněného na speciálním uzávěru..... 106*

*Obr. 61: Uspořádání měřícího systému..... 107*

*Obr. 62: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: pro celkový průtok rozvětvením 5,5  
l/s (navržená metodika)..... 108*

*Obr. 63: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami X, Y)  
a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: pro  
celkový průtok rozvětvením 5,5 l/s (navržená metodika) ..... 108*

## Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Rozměr	Význam
$A$		matice použitá pro singulární rozklad
$A_{ijk}$		koeficienty polynomického obrazového modelu
$a_i$		parametry radiálního zkreslení
$C$		optický střed perspektivní kamery
$d$	$[m]$	délka strany vyhodnocované oblasti
$d_i$	$[m]$	vzdálenost mezi objektovou rovinou a rovinou objektivu
$d_o$	$[m]$	vzdálenost mezi obrazovou rovinou a rovinou objektivu
$d_x, d_y$	$[m]$	rozměry pixelu kamery
$f$	$[m]$	ohnisková vzdálenost perspektivní kamery
$f(k, l)$		funkce světelné intenzity ve vyhodnocované oblasti v $t$
$g(k, l)$		funkce světelné intenzity ve vyhodnocované oblasti $t + \Delta t$
$H$		matice homografie
$I$		jednotková matice velikosti 3 x 3
$K$		kalibrační matice kamery
$M$		zvětšení zobrazovací soustavy
$M_j$		jmenovité zvětšení
$M_1, M_2$		označení zrcadel v uspořádání s bočním posuvem
$O'$		označení středu příslušného souřadného systému
$P$		projekční matice kamery
$P_{ij}$		prvky projekční matice
$p_1, p_2$		parametry tangenciálního zkreslení
$p_x, p_y$	$[px]$	souřadnice principiálního bodu perspektivní kamery
$p_x', p_y'$	$[px]$	obrazová vzdálenost v jednotkách pixelů
$R$		rotační matice kamery o velikosti 3 x 3
$r$	$[px]$	radiální vzdálenost vůči obrazovému centru
$S$	$[m]$	vzdálenost optických středů objektivů kamer
$S_k(\omega)$		koeficient klouzavého průměru pro okolí $\omega$
$t$		translační vektor kamery o velikosti 3 x 1

$t$	[s]	čas
$u, v$		osy obrazového souřadného systému
$\mathbf{v}(v_x, v_y)$	[m/s]	vektor rychlosti částice a jeho složky
$\mathbf{v}_{max}$	[m/s]	maximální měřitelná rychlost metodou PIV
$\mathbf{X}(X, Y, Z)$	[m]	souřadnice bodu v objektovém souřadném systému
$\mathbf{X}_N(X_N, Y_N)$	[m]	souřadnice bodu po zpětné projekci
$\mathbf{x}(x, y, z)$	[m]	souřadnice bodu v obrazové rovině
$Z_{obj}$	[m]	pozice laserového řezu podél osy Z obj. souř. sys.
$Z_{ter}$	[m]	pozice kalibračního terčíku podél osy Z obj. souř. sys.
$\alpha$	[°]	úhel mezi rovinou objektivu a obrazovou rovinou
$\beta$	[°]	natočení objektivu kamery kolem osy X obj. souř. sys.
$\Delta t$	[s]	diference časů nebo časový interval
$\Delta X_T$	[m]	vzdálenost mezi dvěma body kalibračního obrazce (podél osy X obj. souř. sys.
$\Delta X_S$	[px]	vzdálenost sledovaných bodů v narovnaných záznamech
$\Delta Z_S$	[px]	posun sledovaných bodů v narovnaných záznamech terčíku zapříčiněný posunem terčíku do druhé pozice
$\Delta Z_T$	[m]	posun kalibračního obrazce do druhé pozice podél osy Z obj. souř. sys.
$\Delta Z_N$	[m]	posun $\Delta Z_S$ v objektovém souřadném systému
$\Delta x, \Delta y$	[m]	složky průměrného posunutí částic v obrazové rovině
$\delta X, \delta Y$		složky obrazového zkreslení v obrazové rovině
$\delta X_r, \delta Y_r$		složky radiálního zkreslení
$\delta X_t, \delta Y_t$		složky tangenciálního zkreslení
$\varepsilon_u, \varepsilon_v$	[px]	chyba v určení obrazových pozic bodů při navzorkování do pixelové mřížky, ve smyslu osy $u$ a $v$
$\theta$	[°]	úhel mezi objektovou rovinou a rovinou objektivu
$\vartheta_B$	[px]	chyba v určení pozice bodů v záznamech kalibr. terčíku
$\vartheta_v$	[px]	chyba zapříčiněná vyosením kalibračního terčíku vůči laserovému řezu
$\lambda$		akceptanční vektor
$\mu$		koeficient změny měřítka
$\pi$		poměr šířky a výšky pixelu kamery

$\rho^2$		rozptyl náhodné veličiny
$\sigma$		směrodatná odchylka náhodné veličiny
$\sigma_{\Delta Z, X, Y}$	[%]	chyba v příslušné složce vektoru rychlosti
$\phi_{fg}(m, n)$		diskrétní vzájemná korelace
$\phi_{ff}(m, n)$		diskrétní autokorelace

2D, 3D		dvojměrný/é, trojměrný/é
CCD/CMOS		Charge-Coupled Device / Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
FT		Fourierova transformace
FFT		rychlá Fourierova transformace
$FFT^{-1}$		inverzní rychlá Fourierova transformace
LDA		Laser Doppler Anemometry
L2F		Laser Two-focus Anemometry
Mikro PIV		Mikroskopické PIV
PIV		Particle Image Velocimetry
PDA		Phase Doppler Anemometry
SPIV		Stereo / Stereoskopické PIV
SVD		singulární rozklad matic
TUL		Technická Univerzita v Liberci
VS		výkonové spektrum

## **Úvod**

Neoddělitelnou součástí experimentální mechaniky tekutin je souhrnným názvem označovaná: laserová anemometrie. Jedná se o skupinu bezdotykových měřících metod, využívajících laserového světla, a to především pro jeho koherentní vlastnosti a vysokou intenzitu světla soustředěnou do malého bodu nebo tenkého řezu. Do této skupiny patří metody: LDA (Laser Doppler Anemometry), PDA (Phase Doppler Anemometry), L2F (Laser Two-focus Anemometry), PIV (Particle Image Velocimetry) a rozšíření: Stereo PIV, Mikro PIV, Holografické PIV, Time-Resolved PIV, 3D PIV, Tomografické PIV. Metody měří rychlost média pomocí mikroskopických částic v něm rozptýlených, přičemž měření je v celém rozsahu zkoumaných rychlostí lineární. Další podstatnou vlastností je nezávislost výsledků na okolních vlivech, jako teplota, tlak a například vlhkost. Stejně jako tomu je u ostatních měřících metod, tak i tato skupina má své požadavky, kterými jsou transparentnost měřeného média a optický přístup do měřené oblasti. První aplikace laserové anemometrie v mechanice tekutin (konkrétně se jednalo o metodu LDA) je zaznamenána Yehem a Cummisem v roce 1964 [1]. Hlavní rozvoj metod LDA a L2F začal však až po roce 1980, PDA převážně po roce 1990 a metody PIV se více uplatňují až po roce 1995 [2]. Laserová anemometrie se stále rozvíjí a přibývají další metody, jako například Endoskopické PIV, které je popsáno autory Kegalj a Schiffer v roce 2009 [3].

Disertační práce se zaměřuje na metodu Stereo PIV. Za zmínku stojí významné vědecké publikace popisující principy této metody, kterými jsou například [4], [5], nebo [6]. V dostupné, česky psané literatuře, však neexistuje vědecká práce obsahující ucelený soubor teoretických a praktických informací o problematice metody Stereo PIV. Mimo konvenční přístup bylo Stereo PIV v letech 2004 - 2006 rozšířeno o tzv. Multi-Plane SPIV [7], Dual-Plane Stereo PIV [8] a Stereoskopické Mikro-PIV [9].

Stereo PIV vychází ze stejného základního principu jako lidské prostorové vidění [10]. K záznamu jsou použity dvě kamery, kde každá ze svého pozorovacího úhlu zaznamenává odlišné dvojrozměrné obrazy proudového pole osvětleného laserovým řezem. Na základě těchto informací je zrekonstruováno trojrozměrné proudové pole v definované rovině v prostoru, včetně jeho vývoje v čase. Každému měření předchází tzv. kalibrace stereo-snímání. Jedná se o proces, při kterém jsou nalezeny informace o vzájemných vazbách mezi pozorovanou scénou a jednotlivými kamerami. Tyto

informace lze definovat na základě známé geometrie uspořádání, použitím kalibračních terčů, nebo projekčních matic jednotlivých kamer.

## ***Současný stav metody Stereo PIV***

V porovnání s prvním desetiletím 21. století se v dnešní době mnohem více využívá metoda Stereo PIV při experimentálním výzkumu proudění. Stala se uživatelsky dostupnější, a to především kvůli její výpočetní náročnosti, která již není takovou překážkou, jakou byla na začátku svého rozvoje. Existuje totiž několik komerčních produktů obsahujících kompletní měřicí systém Stereo PIV, včetně softwaru, který řídí jednotlivé komponenty systému a následně vyhodnocuje naměřená data. Mezi dodavatele systémů patří například společnosti Dantec Dynamics, LaVision nebo TSI. Tyto měřicí systémy ke kalibraci stereo-snímání využívají terčů s definovaným obrazcem. Obrazec je zaznamenán v několika polohách podél osy, která je standardně zvolena kolmo na měřicí rovinu [11]. Uvedený postup se využívá z důvodu toho, že sytící částice nejsou osvětlené laserovým řezem pouze v jedné rovině, ale v tenkém listě o tloušťce 3-5mm a kalibrace je potřeba provést minimálně v tomto rozmezí. Mezi nejběžnější typ terčů patří tzv. posuvný terč [12]. Jedná se o rovnou destičku s obrazcem tvořeným černými body na bílém pozadí. Body mají definované rozestupy a velikosti. Terč je zaznamenán kamerami ve středu laserového řezu v měřené oblasti a v několika dalších polohách, před a za touto středovou pozicí. Druhým typem je šachovnicový terč, jedná se znovu o rovnou destičku, kde však obrazec není tvořen body, ale čtvercovými políčky o definované velikosti a počtu. Takový terč je zaznamenán ve středu laserového řezu a několika dalších polohách vznikajících natočením terčů podle pravidel daného komerčního softwaru. Další používanou variantou kalibrace je tzv. víceúrovňový terč, u kterého není nutný pohyb uvnitř zkoumané oblasti [12]. Terč je tvořen obrazcem stejným jako u posuvného terčů, avšak body se nenachází pouze v jedné rovině, ale minimálně ve dvou 1-2 mm od sebe vzdálených.

Se současně využívanými komerčními měřicími systémy nelze provést kalibraci, a tím pádem ani samotné měření v případech, kdy není možný pohyb terčů ve zkoumané oblasti (výjimkou je využití víceúrovňového terčů [13]), anebo v situaci, kdy není



možné samotné umístění terčíku do oblasti (v tunelu, nádobě atd.). Mimo dostupných komerčních systémů existují dva postupy použitelné v těchto případech.

Umístění terčíku do zkoumané oblasti není nutné u tzv. Target-Free metodiky [14], kde je však zapotřebí aditivní kamera, která snímá měřící rovinu z kolmého směru. Potřeba další kamery a jejího přesného nastavení vůči rovině může být velkou nevýhodou, a tento přístup se téměř nevyužívá. Druhý postup využívá tzv. Self-Calibration kamer [15]. Postup se využívá především ke korekci nepřesností způsobených vyosením kalibračního terčíku vůči laserovému řezu. Mimo to lze postup použít v případě, kdy není možné umístění kalibračního terčíku do měřené roviny [16]. Tato metodika je však využívána velmi zřídka a chybí její podrobnější verifikace. Princip využití Self-Calibrace je založen na modelu dírkové kamery [17] a záznamu šachovnicového terčíku před nádobou ve stejném uspořádání kamer jako v průběhu měření. Přičemž pokud se jedná o měření uvnitř nádoby s tekutinou rozdílné hustoty oproti pracovnímu prostředí kamer, je při kalibraci terčík vložen do náhradní nádoby se stejnou tekutinou jako ve zkoumané nádobě. Kamery je však nutné precizně posunout tak, aby vzdálenost kamer od vnější hrany předřazené nádoby odpovídala původní vzdálenosti kamer od měřené nádoby. Nevýhodou této metodiky může být manipulace s terčíkem před měřenou nádobou, nebo potřeba nádoby náhradní. Dále může být problematický samotný posun kamer vyžadující přesné určení a nejlépe traverzovací systém.

Kromě kalibrace stereo snímání a problematiky s tím spojené je od začátku rozvoje metody Stereo PIV potřeba vypořádat se v určitých případech se špatným optickým přístupem do měřené oblasti. Přístup může být ovlivněn uspořádáním kamer měřicího systému, nebo optickými vlastnostmi materiálu použité nádoby/tunelu, ve které/kterém je prováděn výzkum proudění. Uspořádání kamer může v situacích, kdy je omezeno jejich umístění, vnášet relativně vysokou chybu do výsledků měření. Optimální úhel mezi osami objektivů je  $90^\circ$ . Při tomto uspořádání kamer je chyba minimální a s rostoucím či snižujícím úhlem se chyba zvětšuje. Tomuto tématu se věnuje například studie [4]. Komplikovanější problém, se kterým se musejí komerční měřicí systémy vypořádat, je však způsobován zmíněnými optickými vlastnostmi materiálu nádoby. Kamery zaznamenávají pohyb mikroskopických částic rozptýlených v médiu uvnitř nádoby a výsledný obraz částic může podléhat kromě perspektivního zkreslení i optickému zkreslení zapříčiněnému právě stěnou nádoby. Je tomu tak například při pozorování částic uvnitř válcového potrubí, nebo skrze rozdělovací částí nádob/tunelů. Optické zkreslení je vždy nutné definovat, pokud jeho parametry již neznáme.

Dostupné měřicí systémy i k tomuto využívají výše zmíněné záznamy kalibračních terčů [11]. Systémy však mají svoje limity a nejsou schopny v některých případech optické zkreslení definovat, následně pak selhává i samotné měření. V laboratoři Mechaniky Tekutin na TUL, kde autor práce působí po dobu doktorského studia je používán měřicí systém od Dantec Dynamics (včetně softwaru DynamicStudio). Přes nespočet pozitivních vlastností tohoto systému je nedostatečně robustní právě v případech, kdy obrazy částic podléhají optickému zkreslení.

## ***Zadání disertační práce***

Na základě rešerše zaměřené na současný stav metody Stereo PIV a dostupného měřicího systému v laboratoři Mechaniky Tekutin TUL pro měření metodou Stereo PIV, bylo zadání disertační práce stanoveno následovně:

- Sestavit soubor teoretických a praktických informací o metodě PIV, Stereo PIV a principech trojrozměrné rekonstrukce scény z dvojrozměrných záznamů. Tyto informace jsou potřebné k analýze možných postupů při měření v komplikovaných experimentálních uspořádáních a k vytvoření metodik vytyčených v dalších bodech.
- Vytvoření metodiky pro měření metodou Stereo PIV (včetně algoritmů) použitelné v experimentálním uspořádání, které nedovoluje umístění kalibračního terčíku do měřené oblasti. Metodika by neměla pro kalibraci kamer vyžadovat náhradní nádobu, posuvný systém pro kamery nebo manipulaci s kalibračním terčíkem před měřenou nádobou.
- Vytvoření metodiky pro měření metodou Stereo PIV (včetně algoritmů) použitelné v experimentálním uspořádání, které nedovoluje pohyb kalibračního terčíku ve měřené oblasti.
- Vytvořit metodiku pro měření metodou Stereo PIV (včetně algoritmů) použitelnou v případech, kdy obrazy částic podléhají optickému zkreslení, se zaměřením na případy s relativně vysokými hodnotami zkreslení, při kterých dostupný komerční měřicí systém selhává.
- Verifikace navržených metodik na uměle vytvořených datech a experimentální ověření výsledků metodik s výsledky dosažených komerčním řešením.

## ***1 Metoda PIV***

Metoda Stereo PIV využívá principů a postupů klasického dvojrozměrného PIV (označovaná také jako konvenční, nebo 2D). Je proto vhodné v první řadě zaměřit se na teoretický popis metody PIV, kterému je věnována tato kapitola. V kapitole 2. budou vysvětleny principy metody Stereo PIV a trojrozměrné rekonstrukce scény z dvojrozměrných záznamů.

Metoda PIV dovoluje experimentálně studovat komplikovaná proudová pole v definované rovině prostoru. To je podstatný rozdíl oproti laserové dopplerovské anemometrii, která měří rychlost proudění pouze v jednom bodě. Metoda PIV je vhodná pro experimentální studium nestacionárních polí.

Princip je založen na zaznamenání posunutí malých částic unášených proudem a na následném vyhodnocení tohoto posunu, kde hledaným parametrem definujícím proudové pole je vektor rychlosti pohybu částic. Částice jsou v určené měřicí rovině osvětleny několika krátkými laserovými pulsy, mezi kterými je přesně definovaný časový interval [2]. Polohy částic (PIV obrazy) jsou zaznamenány na světlocitlivé medium. Nejčastěji je využita CCD/CMOS kamera, a to z důvodu digitalizace obrazu, jehož analýza je mnohdy daleko přesnější v porovnání s fotografickým filmem.

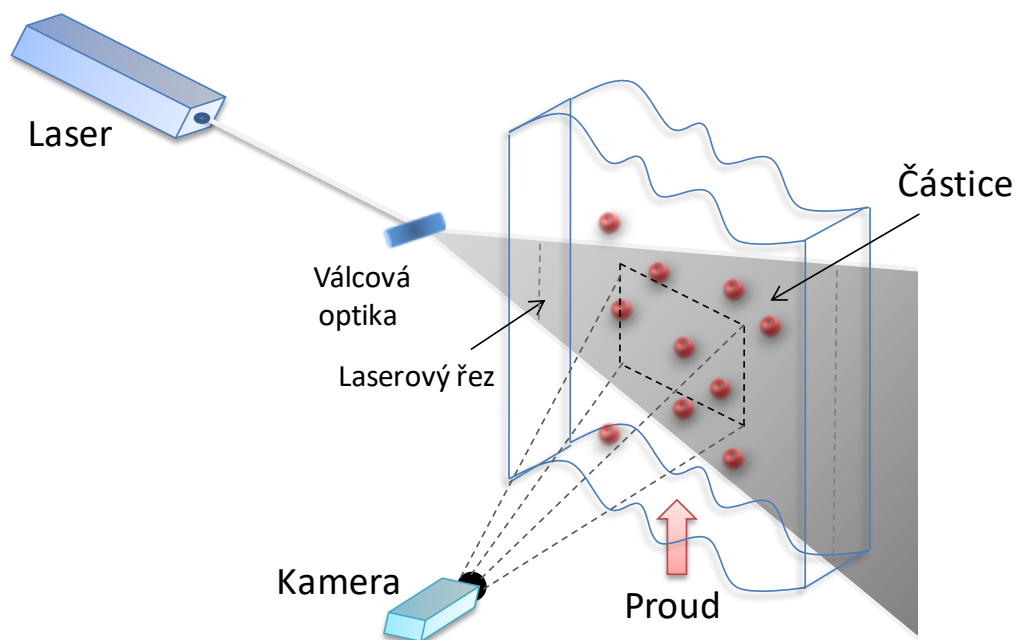
Metoda PIV není základem pouze pro metodu Stereo PIV (kapitola 2), ale také pro Mikro PIV, Holografické PIV, Time-Resolved PIV (kapitola 2.5), 3D PIV a Tomografické PIV. Každý z těchto přístupů je založen na zaznamenání posunutí malých částic jako konvenční PIV, liší se v uspořádání měřicího systému a v přístupu k vyhodnocení získaných dat. Konkrétně metody PIV a Stereo PIV mají shodnou metodiku záznamu PIV obrazů (kapitola 1.1) a jejich zpracování (kapitola 1.2). Stereo PIV dovoluje získat trojrozměrnou informaci o proudovém poli (oproti konvenčnímu PIV), vyhodnocení dat tak obnáší navíc trojrozměrnou rekonstrukci popsanou v kapitole 2.2.

## 1.1 Záznam PIV obrazů

Na obr. 1 je znázorněn záznam PIV obrazu digitální kamerou (CCD/CMOS). Laserový svazek je rozšířen cylindrickou čočkou do tzv. laserového řezu, který definuje osvětlenou měřicí rovinu. Částice unášené proudem v této rovině rozptylují světlo do kamery. Částice nacházející se v objektové rovině kamery (totožná s rovinou určenou laserovým řezem) jsou promítnuty do obrazové roviny objektivu a následně zaznamenány maticovým detektorem. Světlé skvrny na tmavém pozadí odpovídají unášeným částicím.

Jak již bylo uvedeno, částice jsou osvětleny po krátký předem definovaný čas. Používají se pulsní lasery, které osvětlují měřicí rovinu pouze po dostatečně krátký čas a to při velkém světelném výkonu.

Záznam (obraz) polohy částic je pořízen vždy minimálně dvakrát. První záznam odpovídá počáteční poloze částic, druhý jejich koncové poloze. Tyto polohy poté určují vektor posunutí částic v měřicí rovině. Je-li první i druhý záznam polohy částic exponován do jednoho obrazu, jedná se o způsob záznamu pomocí dvojnásobné expozice. Pokud každý záznam polohy částic je exponován do samostatného obrazu, jedná se o jednotlivé expozice [33].



Obr. 1: Záznam PIV obrazů

## 1.2 Zpracování PIV obrazů

Zaznamenaný obraz polohy částic v měřicí rovině je rozdělen na tzv. vyhodnocované (vyšetřované) oblasti, viz obr. 2. Zpracování PIV obrazů poté obnáší stanovení průměrného posunutí částic v každé této vyhodnocované oblasti a určení vektorů rychlostí  $\mathbf{v}(v_x, v_y)$  pro každou vyhodnocovací oblast. Vektor  $\mathbf{v}$  je určen následovně:

$$\Delta x = \frac{1}{M} \Delta X \quad \text{a} \quad \Delta y = \frac{1}{M} \Delta Y, \quad (1)$$

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{a} \quad v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad (2)$$

kde  $\Delta X, \Delta Y$  odpovídá průměrnému posunutí v obrazové rovině za čas  $\Delta t$ ,  $M$  je zvětšení zobrazovací soustavy (obraz / objekt) a  $\Delta x, \Delta y$  je posunutí částic v objektové rovině, tedy skutečné posunutí částic v proudovém poli. Výsledky měření se obvykle prezentují ve formě vektorové mapy (viz např. kapitola 3).

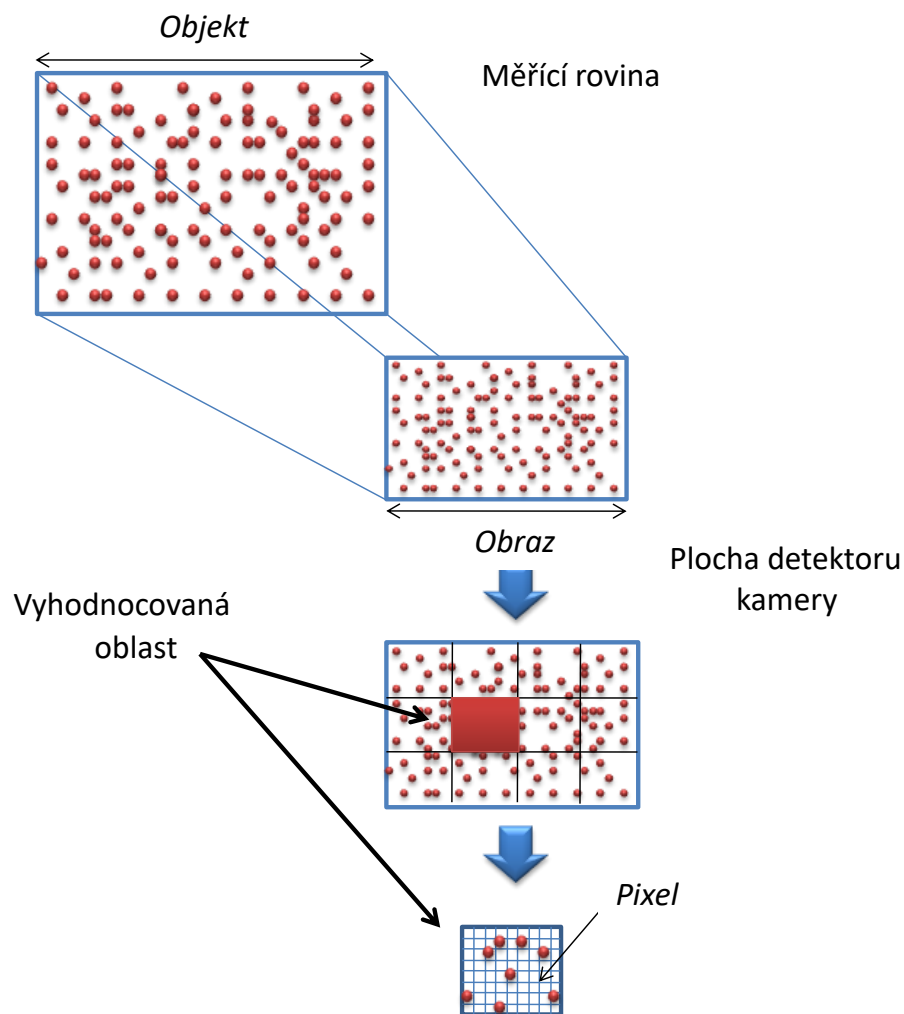
K přiřazení vektoru rychlosti ke každé vyhodnocovací oblasti je nutné, aby se v každé z nich nacházely obrazy částic. Koncentrace částic v měřeném proudu je důležitým faktorem při výběru vhodných vyhodnocovacích algoritmů a ovlivňuje přesnost výsledků měření. V obecném případě je možné rozlišit slabé, střední a silné sycení proudu částicemi.

U slabého sycení je koncentrace proudem unášených částic tak nízká, že v každé vyhodnocované oblasti se s vysokou pravděpodobností vyskytuje maximálně jedna částice ve stejný čas. Vektor rychlosti pro každou vyhodnocovanou oblast je v tomto případě možné určit jednoduchým postupem. Pokud je částice vyobrazena jako bílá skvrna na tmavém podkladu, pak pozice částice v obrazové rovině je definována nejvyšší úrovní jasu (vrcholem). Z posunutí těchto vrcholů a známého zvětšení zobrazovací soustavy je určen vektor rychlosti pro danou vyhodnocovací oblast, viz rovnice (1), (2). Měření při slabém sycení proudu částicemi jsou však v praxi velmi problematická. Není možné jednoznačně zajistit, že v každé vyhodnocované oblasti se v době expozice vyskytuje právě jedna částice. Obecně se v některých vyhodnocovaných oblastech může vyskytovat několik obrazů částic a v některých

žádné. Je proto nutné, pro spojitou rychlostní informaci v celém rozsahu obrazu (vektor rychlosti v každé vyhodnocované oblasti), zajistit silnější sycení částicemi.

To obecně obnáší důmyslnější algoritmy pro zpracování PIV obrazu (viz kapitola 1.3), jelikož například při dvojnásobné expozici se ve vyhodnocovaných oblastech nalézá více obrazů částic, než pouze jeden pár (obraz částice v čase  $t$  a  $t + \Delta t$ ). Je-li naopak sycení velmi silné, přijímací optika není schopna rozlišit jednotlivé částice a záznam obrazů částic je tvořen shluky částic v podobě skvrn.

Nejpoužívanější numerické metody zpracování PIV záznamů jsou uvedeny v následující kapitole.



Obr. 2: Schéma záznamu PIV obrazu

### 1.3 Numerické metody zpracování PIV záznamů

K určení průměrného posunutí v každé vyhodnocované oblasti se využívá korelační analýza. Numerické metody zpracování PIV záznamů jsou zpravidla rozděleny podle toho, jakým způsobem korelační analýzu provedou, a tedy jakým způsobem je vypočteno hledané posunutí. Mezi základní numerické metody patří: diskrétní vzájemná korelace a autokorelace, metoda dvojnásobné Fourierovy transformace, metoda Wienerova-Chinčinoва teorému [2], [33].

#### 1.3.1 Diskrétní prostorová korelace

K určení průměrného posunutí v každé vyhodnocované oblasti je možné použít diskrétní prostorovou korelaci. Vztah pro výpočet vzájemné korelace a autokorelace je definován rovnicí (3) a (4):

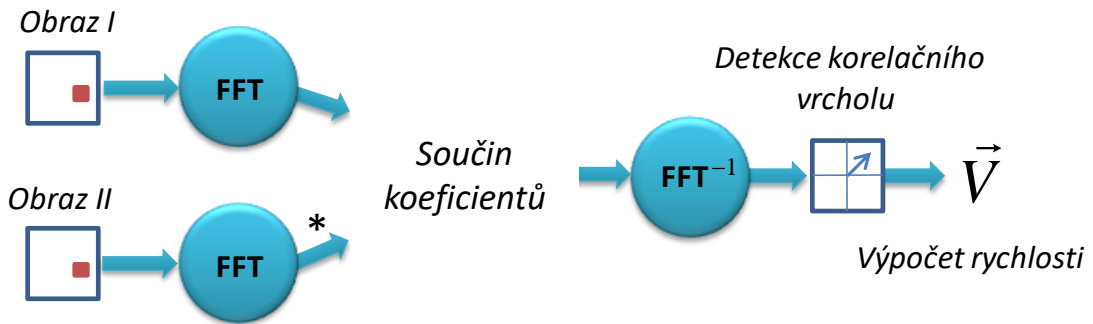
$$\phi_{fg}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k, l) \cdot g(k + m, l + n), \quad (3)$$

$$\phi_{ff}(m, n) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} f(k, l) \cdot f(k + m, l + n), \quad (4)$$

kde funkce  $f(k, l), g(k, l)$  vyjadřují světelnou intenzitu (v hodnotách šedi) ve vyhodnocovaných oblastech. V případě, že je získán záznam obrazů částic dvojnásobnou expozicí, je použita k určení průměrného posunutí částic autokorelace. Pokud je exponován každý PIV záznam do samostatného obrazu (jednotlivá expozice), je vhodné použít vzájemnou korelaci. Typickým výsledkem autokorelace v korelační rovině jsou dva vrcholy symetricky umístěné vůči centrálnímu vrcholu. Vektor průměrné posunutí částic ve vyhodnocované oblasti poté odpovídá spojnici centrálního s jedním z postranních vrcholů. Je tak možné zvolit mezi dvěma vektory posunutí a v důsledku toho autokorelace neposkytuje jednoznačnou informaci o směru posunutí. U vzájemné korelace tento problém nenastává, jelikož se v korelační rovině vyskytuje pouze jeden vrchol. Vektor průměrného posunutí odpovídá spojnici středu korelační roviny se zmíněným vrcholem.

Korelaci je výhodné počítat ve frekvenční oblasti, redukuje se tím její výpočetní náročnost. Korelace je tak vypočtena komplexně sdruženým násobením odpovídajících si páru Fourierových koeficientů. Blokové schéma takto řešené vzájemné korelace je na obr. 3.



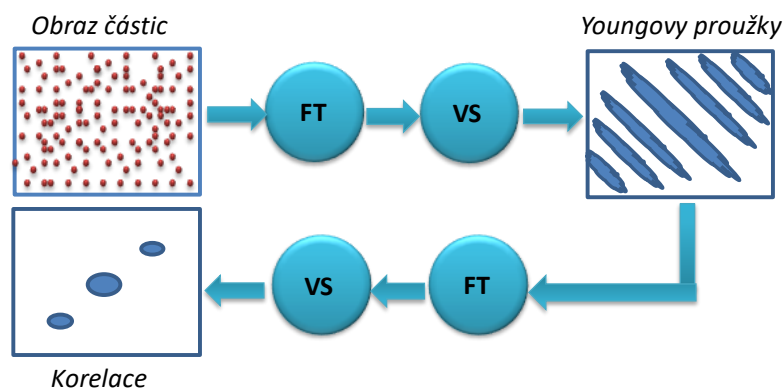


Obr. 3: Zpracování PIV záznamu pomocí vzájemné korelace [2]

### 1.3.2 Metoda dvojnásobné Fourierovy transformace a Wienerova-Chinčínova teorému

#### Metoda dvojnásobné Fourierovy transformace

Tato metoda se používá ke korelační analýze PIV záznamů (vyhodnocovaných oblastí) získaných dvojnásobnou expozicí. Vstupem je záznam obsahující obraz počátečních poloh částic (v čase  $t$ ) a koncových (v čase  $t + \Delta t$ ). Blokové schéma numerické metody je znázorněno na obr. 4. Zkratkou VS je myšleno výkonové spektrum, které je vypočteno jako druhá mocnina absolutní hodnoty komplexní funkce získané Fourierovou transformací. Youngovy proužky tvoří periodickou strukturu a nesou informaci o směru (normála k proužkům) a velikosti (úměrná periodě proužků) průměrného posunutí částic.

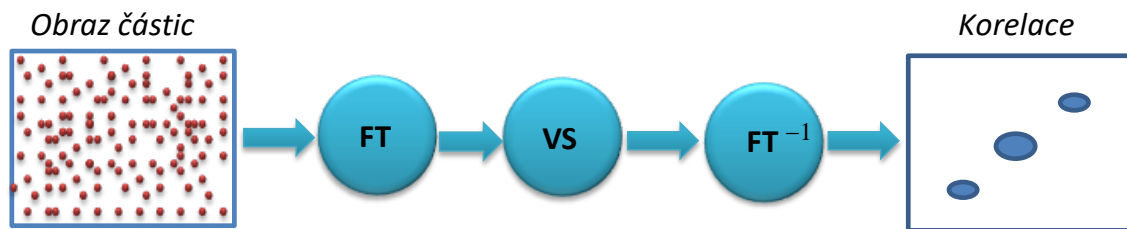


Obr. 4: Zpracování PIV záznamu pomocí dvojnásobné FT [2]

K nalezení periody Youngových proužků je použita FT. Poté vypočtením výkonového spektra je získána prostorová korelační funkce v podobě centrálního a dvou postranních vrcholů. Průměrné posunutí částic v tomto obraze je znovu dáno spojnicí centrálního a jednoho krajního vrcholu prostorové korelační funkce.

### Metoda Wienerova–Chinčinoва teorému

Metoda se využívá pro oba způsoby záznamu PIV, tedy pro záznam (vyhodnocovanou oblast) získaný jednotlivou nebo dvojnásobnou expozicí. Blokové schéma metody je znázorněno na obr. 5. Podobně jako u metody dvojnásobné FT je záznam PIV nejprve převeden do frekvenční oblasti a následně je vypočteno výkonové spektrum. Korelační funkce ve vyhodnocované oblasti je získána zpětnou FT.



Obr. 5: Zpracování PIV záznamu pomocí Wienerova-Chinčinoва teorému [2]

### 1.3.3 Filtrace dat

Numerické metody jsou většinou doplněny hned několika nástroji pro zlepšení jejich výsledků, viz [2] a [33]. Požadavkem je co nejpřesněji určit hledané posunutí částic, tedy vzdálenost vrcholů v korelační rovině. Toho je možné dosáhnout potlačením šumu v korelační rovině a přesnější detekcí vrcholů.

### Okenní funkce

Pro potlačení šumu v korelační rovině se používá před výpočtem FFT tzv. okenní funkce. Představuje vstupní filtr, který působí jako váhová funkce na stupnici hodnot šedi PIV obrazu. Okenní funkce potlačí obrazy částic poblíž okraje vyhodnocované oblasti. Je to z toho důvodu, že metoda FFT předpokládá periodičnost vstupního signálu. To vede k tzv. fantomovým částicím, které poté přispívají ke zvýšení šumu v korelační rovině. Nejpravděpodobněji se tyto fantomové částice vyskytují u okrajů

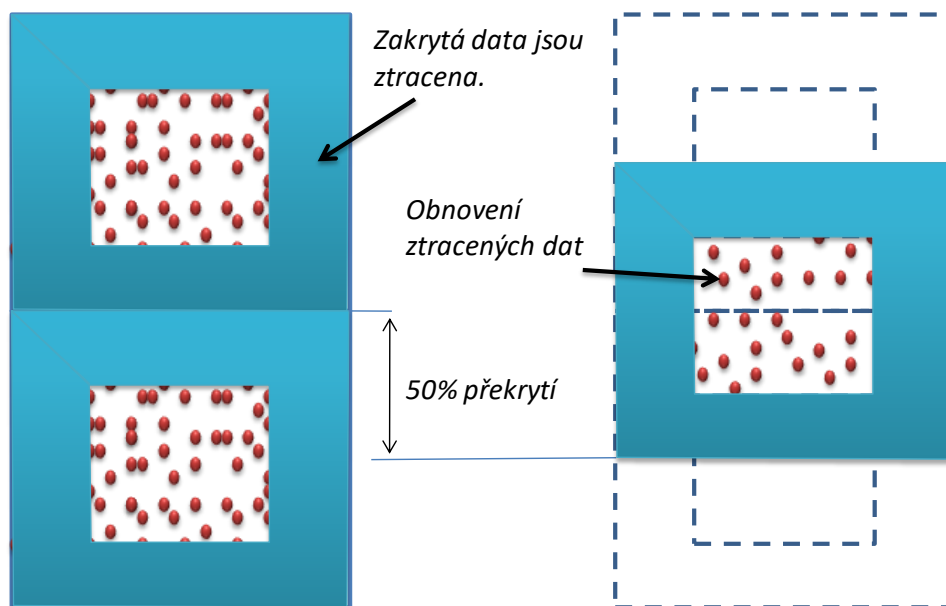
vyhodnocované oblasti. Proto je váhová funkce zvolena například tak, že ve středu vyhodnocované oblasti násobí intenzitu číslem jedna, zatímco intenzity blízko okrajů jsou násobeny nulou. Nejefektivnější okenní funkcí je gaussovské okno [2].

### Filtry ve frekvenční doméně

Dalším zdrojem šumu v korelační rovině mohou být nechtěné světelné odrazy vstupující do objektivu kamery, jako například světlo pozadí a světelná reflexe na optických komponentech. Tento šum je odstraněn filtrací před zpětnou FFT v podobě váhové funkce ve frekvenční doméně. Obecně je váhová funkce navržena jako pásmová propust, která odstraní nízké frekvence a vysokofrekvenční šum.

### Překrývání vyhodnocovaných oblastí

Informace ztracené použitím okenní funkce mohou být získány zpět technikou překrývání vyhodnocovaných oblastí (obr. 6). Překrývání lze aplikovat, jak ve vertikálním směru, tak v horizontálním. Každým překrytím je získána nová vyhodnocovaná oblast, a tedy i další rychlostní vektor. To neznamena zvýšení prostorového rozlišení, ale spíše převzorkování proudového pole.



Obr. 6: Příklad překrytí vyhodnocovaných oblastí ve vertikálním směru [2]

## Subpixelová interpolace

K přesnější detekci korelačního vrcholu se používá subpixelová interpolace. Záznam obrazů částic je zaznamenán maticovým detektorem kamery. Je tak vytvořen souřadnicový systém s rozlišením jednoho pixelu. Nelze tedy přesněji určit parametry jako je výška, šířka, nebo poloha zmíněného vrcholu. K interpolaci vrcholu se používá Gaussova křivka. Průměr obrazů částic by měl být větší než 3 pixely, pokud tomu tak není, je korelační vrchol velmi úzký a interpolace nemusí fungovat v důsledku nedostatečného počtu bodů pro prokládání zmíněnou křivkou. Těchto požadavků lze dosáhnout nepatrným rozostřením kamery, nebo rozšířením korelačního vrcholu zmíněnými filtry ve frekvenční doméně.

### ***1.4 Omezení a systematické chyby PIV***

Metoda PIV sebou nese některá omezení a systematické chyby, které je nutné zvážit při sestavování experimentu [2], [33].

#### Ztracené páry

Tato systematická chyba nastane, když v intervalu mezi prvním a druhým záznamem obraz částice buď vstoupí nebo vystoupí z vyhodnocované oblasti. K dané částici tak při korelaci neexistuje odpovídající protějšek, což má za následek zvýšení korelačního šumu. Čím je pohyb částice rychlejší, tím se pravděpodobnost výskytu takového páru samozřejmě zvyšuje. Chyba lze redukovat změnou velikosti vyhodnocovaných oblastí a také zvýšením hustoty sycení proudu částicemi.

#### Dynamický rozsah

Absolutní dynamický rozsah je definován absolutní hodnotou z rozdílu maximální a minimální měřitelné rychlosti proudění ve vyhodnocované oblasti.

Z teoretického rozboru [6] je doporučeno dodržet maximální posunutí částic během záznamu pod jednu čtvrtinu strany vyhodnocované oblasti. Pro maximální měřitelnou rychlost tedy platí

$$|v_{\max}| = \frac{d}{4M\Delta t}, \quad (5)$$

kde  $\Delta t$  je časový interval mezi první a druhou expozicí a  $d$  je délka strany vyhodnocované oblasti.

Stejně tak minimální měřitelná rychlost je odvislá od minimálního měřitelného posunutí. Velikost posuvu je teoreticky určována efektivním průměrem obrazu částic, který je dán průměrem obrazu částice, difrakcí v optické apertuře a minimálním rozlišením kamery. Ve skutečnosti však závisí také na algoritmu zpracování, zda bude použita vzájemná korelace nebo autokorelace. Autokorelace (viz kapitola 1.3.1) poskytuje dva korelační vrcholy symetricky umístěné vzhledem k centrálnímu vrcholu. Pokud by bylo posunutí částic příliš malé, mohlo by dojít k prolnutí těchto vrcholů. Vhodné posunutí u autokorelace bylo odhadnuto na 2-3 pixely [2]. Při aplikaci vzájemné korelace neexistuje žádný centrální vrchol, lze tedy i při malých posuvech určit polohu vrcholu s velkou přesností. U vzájemné korelace se odhaduje minimální měřitelný posuv menší než jeden pixel.

Dynamický rozsah lze zvýšit použitím offsetu, viz kapitola 1.5.

## Hustota sycení částicemi

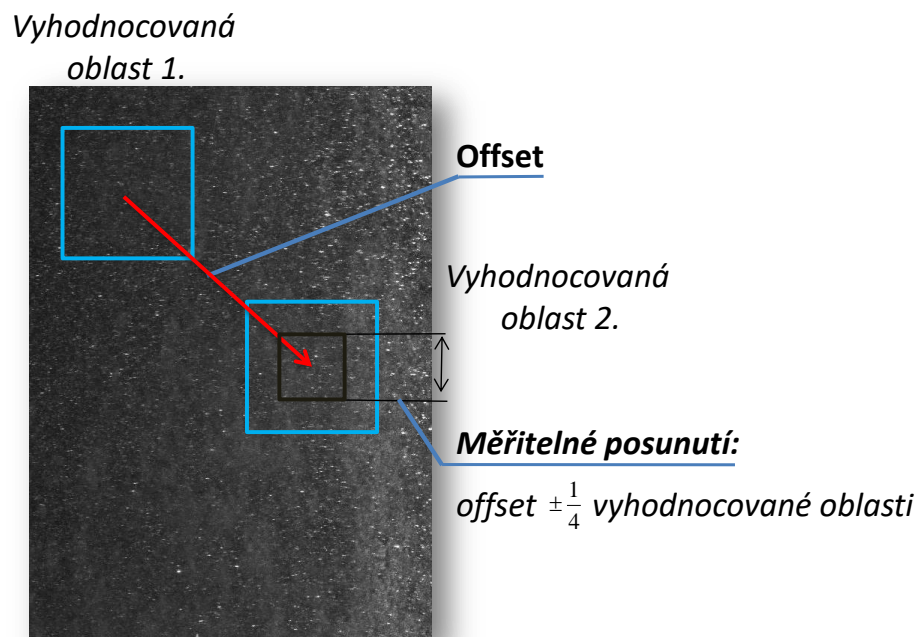
Jak bylo uvedeno, ztracené páry snižují odstup signálu od šumu. Systematickou chybu lze potlačit zvýšením hustoty sycení proudu částicemi. Sycení však nesmí být tak vysoké, aby se vytvářely shluky částic. Doporučený minimální počet částic uvnitř vyhodnocované oblasti, pro maximální průměrné posunutí pod jednu čtvrtinu strany vyhodnocované oblasti, je 5 v případě vzájemné korelace a 10 u autokorelace.

### ***1.5 Offset a adaptivní korelace***

Jak je uvedeno v kapitole 1.2, získané obrazy částic jsou rozděleny na tzv. vyhodnocované oblasti. Předpokladem bylo doposud to, že vyhodnocované oblasti jsou umístěné ve stejné pozici uvnitř prvního i druhého PIV obrazu. Maximální posunutí

částic by v tomto případě nemělo přesáhnout doporučenou hodnotu,  $1/4$  délky strany vyhodnocované oblasti (viz kapitola 1.4). Samozřejmě tento požadavek limituje dynamický rozsah PIV metody. Například při měření relativně velkých rychlostí proudění je třeba zvolit velké vyhodnocované oblasti a není možné detekovat malé vírové struktury. Dynamický rozsah lze zvýšit definováním posunutím (offsetem) druhé vyhodnocované oblasti (oblasti uvnitř druhého PIV obrazu) vůči první, nebo využitím tzv. adaptivní korelace. Ideální offset by měl odpovídat průměrnému posunutí částic v daném proudu, pak všechny částice v první vyhodnocované oblasti korespondují s částicemi ve druhé. Díky tomu je možné zvolit vyhodnocované oblasti dostatečně malé pro detekci malých vírových struktur.

Offset mezi vyhodnocovanými oblastmi při standardním zpracování je konstantní pro celou měřicí rovinu, tedy pro všechny vyhodnocované oblasti. Adaptivní korelace používá tzv. adaptivní offset vypočtený pro každou oblast zvlášť. Jedná se o iterační metodu. V prvním kroku je určeno střední posunutí částic v první vyhodnocované oblasti a tato hodnota je použita jako offset pro druhou oblast. V dalším kroku je první vyhodnocovaná oblast na místě té posunuté z prvního kroku a je rozdělena na čtyři oblasti, ve kterých je určeno střední posunutí částic [33]. Každá hodnota posunutí je použita jako adaptivní offset pro další výpočet korelací, atd.



Obr. 7: Technika posunutí druhé vyhodnocované oblasti (offset)

Vytvořením vektorových map je získána tzv. surová mapa, obsahující také nereálné vektory rychlosti proudění. Takové mapy jsou vždy podrobeny validaci dat.

## 1.6 Validace dat

Hned několik faktorů má vliv na zobrazení hledané korelační funkce. Některé jsou filtrovány ještě před jejím výpočtem (viz kapitola 1.3.2) a některé jsou potlačeny správným přístupem k samotnému měření (kapitola 1.4), a to např. vhodným sycením proudu částicemi a správnou volbou délky vyhodnocované oblasti. I přes tato opatření nemusí být, jak korelační funkce, tak získaná vektorová mapa (surová mapa) rychlosti proudění bezchybná.

### Peak validace

Vypočtená korelační funkce by měla odpovídat jistým kritériím. Podle Peak validace by měl být poměr výšek centrálního a dalšího nejvyššího vrcholu (hlavního) v korelační rovině, v předem určeném rozmezí. Dalším kritériem je poměr výšky hlavního a třetího nejvyššího vrcholu (šumu), [33]. První uvedené kritérium nelze uplatnit při výpočtu korelační funkce pomocí vzájemné korelace. Je to z důvodu absence centrálního vrcholu v korelační rovině.

### Range validace

Tento způsob validace se uplatňuje na vektorové mapy rychlosti proudění. Vyžaduje přibližnou znalost zkoumaného proudu. Je-li znám rozsah, v jakém by se měly vyskytovat rychlosti v této mapě, jsou nevyhovující vektory vyloučeny z dalšího zpracování.

### Validace klouzavým průměrem

Klouzavý průměr se využívá opět při validaci vektorové mapy. Nesoustředí se však na jeden vektor, ale bere v potaz i jeho okolí. Ve vybraném okolí  $\omega$  je vypočtena průměrná velikost rychlostí  $\bar{v}(\omega)$ . Rozdíl jednotlivých rychlostí ( $v$ ) v tomto okolí od průměrné

rychlosti musí být menší než koeficient  $S_k$ , vypočtený pro každou oblast zvlášť následovně

$$S_k(\omega) = \lambda \max |v - \bar{v}(\omega)|, \quad v \in \omega, \quad (6)$$

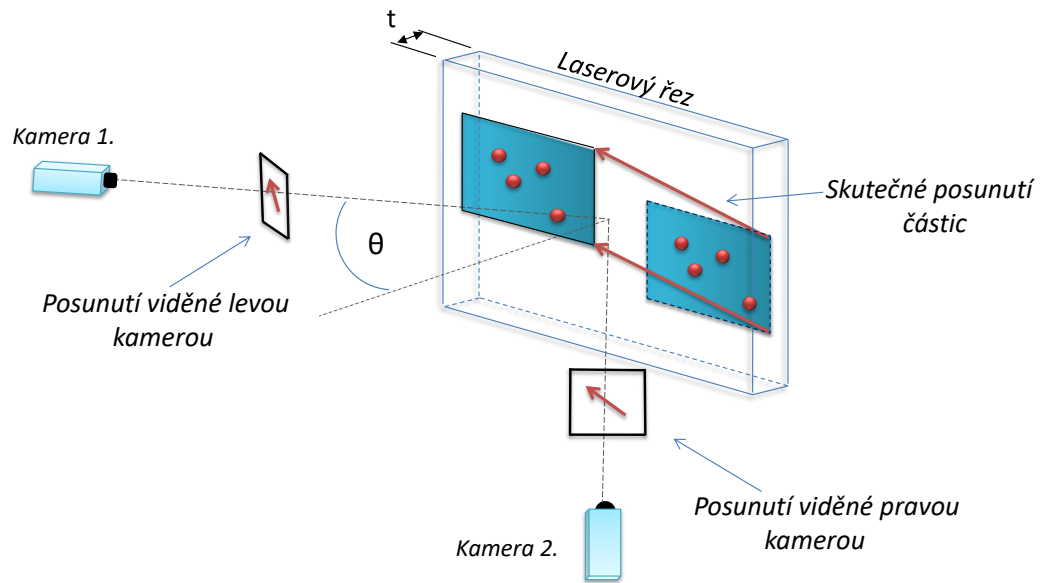
kde  $\lambda$  je tzv. požadovaný akceptační vektor. Nevyhovující vektory se většinou odstraní, zamezí se tak dalšímu rozšiřování chyb měření.

K „vyhlazení“ vektorové mapy a dalšímu potlačení šumu, např. z důvodu zobrazení vířivostí, se po validaci provádí filtrace klouzavým průměrem. Filtrací se ve zvoleném okolí nahradí původní vektory průměrným vektorem tohoto okolí.

## 2 Metoda Stereo PIV

Metoda vychází ze stejného základního principu jako lidské prostorové vidění [10]. K záznamu jsou použity dvě kamery, kde každá z rozdílných úhlů pozoruje proudové pole osvětlené laserovým řezem, viz obr. 8. Kamery tak zaznamenají odlišný dvojrozměrný obraz proudového pole, kde je každý zpracován obdobným postupem jako u metody PIV (kapitola 1.). Na základě těchto informací a tzv. kalibrace stereo-snímání je zrekonstruováno skutečné trojrozměrné posunutí sytících částic, viz kapitola 2.2. Oproti konvenční metodě je tedy možné určit složku posunutí (rychlosti) kolmou na měřicí rovinu definovanou laserovým řezem. Pokud by však řez byl opravdu „pouhou“ rovinou, nebylo by možné zaznamenat zmíněnou složku posunutí. Řez má ve skutečnosti určitou tloušťku  $t$ , která je standardně v rozmezí 3-5 mm (jedná se o viditelné rozmezí). Parametry řezu, stejně tak jeho tloušťka, jsou určeny použitou válcovou optikou a expandéry svazku (optika rozšiřující laserový svazek). Detailnější pohled na vlastnosti a rozměry laserového řezu je popsán v [2].



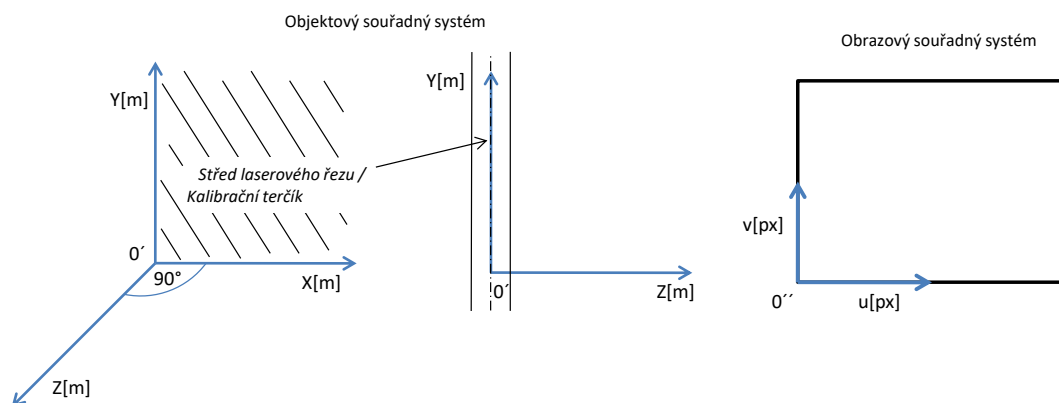


Obr. 8: Princip metody Stereo PIV [33]

### Definování souřadných systémů

Pro následující teoretický výklad je nutné definovat souřadné systémy kamer a pozorované scény. Tzv. objektový souřadný systém (obr. 9) v jehož souřadnicích se udávají pozice objektů snímáné kamerou je zvolen tak, aby počátek systému  $O'$  ležel ve středu laserového řezu a osa  $Z$  byla kolmá na tento řez (měřící rovinu). Pozice počátku v měřící rovině může být dále určena kalibračním terčíkem (viz kapitola 2.3).

Druhý souřadný systém je obrazový. Ten určuje souřadnici daného pixelu v kamerovém záznamu. Osy jsou označovány  $u$ ,  $v$  a počátek je umístěn do levého dolního rohu, viz obr. 9.



Obr. 9: Souřadné systémy

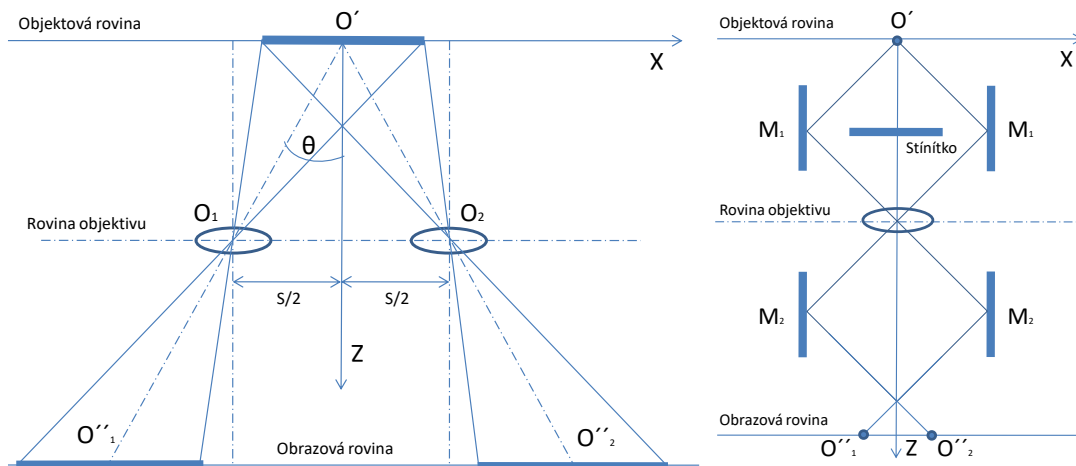
## 2.1 Možnosti uspořádání měřicího systému

Kamery použité při snímání proudového pole mohou být uspořádány, vzhledem k měřené oblasti, dvěma způsoby [4]: uspořádání s bočním posuvem, uspořádání s úhlovým natočením. Existují další uspořádání společně s postupy, vycházející z konvenční metody PIV, díky kterým je možné získat trojrozměrnou informaci o proudovém poli. Tyto postupy však nejde striktně zařadit do metodiky Stereo PIV a jsou popsány v [4].

### 2.1.1 Uspořádání s bočním posuvem

Na obr. 10 je znázorněno uspořádání s bočním posuvem kamer. Osy objektivů a osy těla kamer jsou kolmo na laserový řez, přičemž jsou kamery symetricky posunuty o vzdálenost  $S/2$  od osy  $Z$  objektového souřadného systému. Uspořádání je popsáno v [18], [19] a pro měření využito v experimentálním výzkumu uvedeném v [11]. Hlavní výhodou tohoto uspořádání je jeho jednoduchost. Je to z důvodu toho, že objektová rovina, rovina objektivu a obrazová rovina jsou navzájem rovnoběžné. Zaznamenaný obraz má tedy jednotné zvětšení. Kromě toho je docíleno zaostření kamer v celé obrazové rovině, bez dalšího nastavení, jako tomu je v případě uspořádání s úhlovým natočením. Nevýhodou je prostorové rozlišení metodiky definované společným zorným polem kamer. To je relativně malé oproti dalším způsobům uspořádání. Rozlišení lze zvětšit posunutím maticových senzorů kamer mimo osy objektivů, viz obr. 10, kde vzdálenost mezi středy senzorů je větší, než vzdálenost objektivů. Takové vyosení může být z konstrukčního hlediska velice náročné a používá se zřídka kdy.

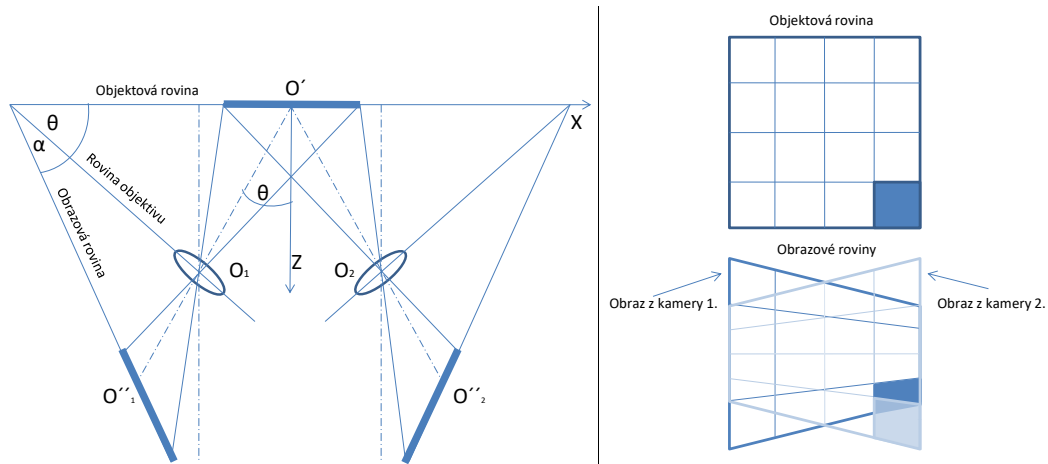
Další konfigurace patřící do této skupiny uspořádání dostala základ v roce 1991 [20] a je znázorněna na obr. 10 v pravé části. V konfiguraci jsou využity dvě dvojice zrcadel. Zrcadla  $M_1$  jsou vložena mezi objektovou rovinu a rovinu objektivu a dvojice zrcadel  $M_2$  mezi rovinu objektivu a obrazovou rovinu. Vhodným umístěním zrcadel je světlo rozptýlené částicemi v měřicí oblasti odraženo na senzor kamery. Zaznamenaný obraz částic je složen ze dvou obrazů, obdobně jako při složení obrazů ze dvou kamer. V tomto uspořádání je využito pouze jedné kamery, avšak pro svoji konstrukční náročnost je málo využívána.



Obr. 10: Uspořádání s bočním posuvem kamer: vyosení detektorů kamer (nalevo), posuv nahrazen dvojicí zrcadel [4]

### 2.1.2 Uspořádání s úhlovým natočením

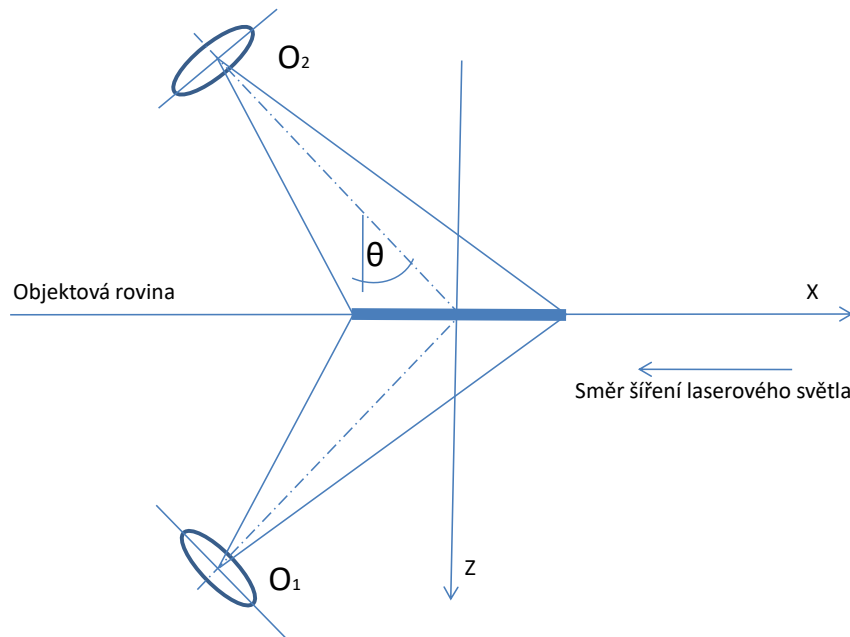
Jak ukazuje obr. 11, roviny objektová, objektivu a obrazová nejsou vzájemně rovnoběžné, ale jsou natočeny o úhly  $\alpha$  a  $\theta$ . Úhel svírající osy objektivů, může být v tomto uspořádání větší, nežli v předchozím případě, což dovoluje přesnější určení složky vektoru rychlosti ve směru osy  $Z$  (viz kapitola 2.4). Nicméně zvětšení kamer není shodné v celém zorném poli vlivem perspektivní projekce a problém nastává při zaostření kamer. Používané kamery poskytují velmi malou hloubku ostrosti, je to z důvodu malých clonových čísel a relativně blízké vzdálenosti objektu před kamerou v průběhu měření. Má-li být měřicí rovina (objektová) v celém zorném poli kamery zaostřena do obrazové roviny, musí být splněna Scheimpflugova podmínka [21]. Podmínka je dodržena pokud obrazová a objektová rovina i rovina objektivu kamery se navzájem protínají ve společné přímce v prostoru, viz obr. 11. Je tedy potřeba, aby bylo možné natáčení objektivu vzhledem k tělu kamery. Toto uspořádání zvyšuje rozdíly ve zvětšení podél výsledného obrazu. Čím blíže se poměr  $\tan\alpha/\tan\theta$  přibližuje 1, tím strmějšího charakteru je zvětšení, viz [4].



Obr. 11: Uspořádání s úhlovým natočením splňující Scheimpflugovu podmínku (vlevo) a vliv perspektivního zkreslení na záznamy kamer [4]

Perspektivní projekce a specifické umístěním kamer má dále za následek efekt znázorněný na obr. 11 v pravé části. Pro názornost je kamerami zaznamenán čtvercový obrazec s pravidelnou mřížkou. Výsledné obrazy již nemají čtvercovou mřížku a jejich překrytí není jednotné. Zřetelně je to viditelné na umístění zvýrazněného čtverce (po záznamu transformovaného na lichoběžník). Perspektivní zkreslení je nutné definovat a s posunem je potřeba počítat při trojrozměrné rekonstrukci (kapitola 2.3).

Druhá varianta pro uspořádání s úhlovým natočením je znázorněna na obr. 12. Kamery snímají měřenou oblast z odlišných stran [22]. Výhodou tohoto uspořádání je umístění obou kamer ve směru, který dovoluje zachytit dopředný rozptyl laserového světla zapříčiněný unášenými částicemi. Účinnost rozptylu světla je výrazně vyšší v přímém směru (na rozdíl od bočního rozptylu) a tedy i odstup signál/šum je vyšší.



Obr. 12: Uspořádání s úhlovým natočením: varianta snímání laserového řezu z odlišných stran [4]

V případě uspořádání, kdy kamery pozorují měřenou oblast s relativně velkým natočením (vzhledem k ose Z) a skrze tekutinu hustší, nežli jejich pracovní prostor, dochází k viditelnému radiálnímu zkreslení obrazů částic. Pro vodu jsou to úhly přibližně  $55^\circ$  a více [23]. Tento nežádoucí efekt lze eliminovat hranolem s tekutinou, který je upevněn mezi měřenou nádobu a kamerami [4]. Úhel stěn hranolu je specificky navržen v závislosti na pozorovacích úhlech kamer a vzdálenosti jednotlivých komponent (kamer, okraje nádoby, hranolu) jsou vzájemně závislé.

Za zmínku dále stojí postup, který je popsán v [24] z roku 1997. Popisuje uspořádání, kde jsou kamery relativně blízko u sebe a jsou natočeny o velice malý úhel. Díky tomu je možné docílit téměř jednotného zvětšení v obrazových rovinách, stejně jako u uspořádání s bočním posuvem, avšak s vyšším prostorovým rozlišením. Návrh ideálního geometrického rozvržení komponent pro takové uspořádání je uveden v [24]. Nevýhodou je relativně vysoká nepřesnost v určení složky vektoru rychlosti, kolmé na měřicí rovinu, viz kapitola 2.4.

## 2.2 Rekonstrukce trojrozměrné scény

Kamery uspořádány dle možností uvedených v předchozí kapitole, zaznamenají obrazy částic (ve stejný časový okamžik), ze kterých je vypočtena vždy dvojice dvojrozměrných vektorových map proudění (viz kapitola 1.3). Jedna odpovídající levé kameře (kamera 1) a druhá odpovídající pravé kameře (kamera 2). Dalším krokem je rekonstrukce trojrozměrné vektorové mapy proudění v měřené oblasti. Podstatou rekonstrukce je získání trojrozměrné informace z dvojice vektorových map a vytvoření trojrozměrné vektorové mapy v objektovém souřadném systému (scény).

Existuje několik přístupů k rekonstrukci. Je možné jí provést s využitím znalosti geometrie uspořádání (především kamer vůči měřené oblasti) [4]. Druhou možností je rekonstrukce na základě modelu perspektivní kamery (nebo také dírkové kamery) [17]. V takovém přístupu je úkolem určit tzv. projekční matice jednotlivých kamer. Matice je možné definovat ze vzájemného vztahu mezi kamerami, který je popsán epipolární geometrií [17], výpočtem matic ze známých umístění bodů ve scéně, nebo z tzv. vnitřních a vnějších parametrů kamer. Třetím způsobem je rekonstrukce na základě polynomického modelu [11], který vychází z modelu dírkové kamery. Uvedený model dokáže popsat nelineární jevy, jako je např. distorze obrazu způsobená pozorováním objektů za válcovým sklem.

### 2.2.1 Rekonstrukce vycházející z geometrie uspořádání

Na obr. 13 je znázorněn záznam posunutí idealizované sytící částice v měřené oblasti. Jedná se o uspořádání s bočním posuvem. Geometrie mezi skutečným posunutím částice  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  a zaznamenaným posunutím jednotlivými kamerami  $(\Delta X_1, \Delta Y_1)$  a  $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$  je vyjádřena rovnicemi:

$$\Delta Z = \frac{-d_0(\Delta X_1 - \Delta X_2)}{M_j S - (\Delta X_1 - \Delta X_2)}, \quad (7)$$

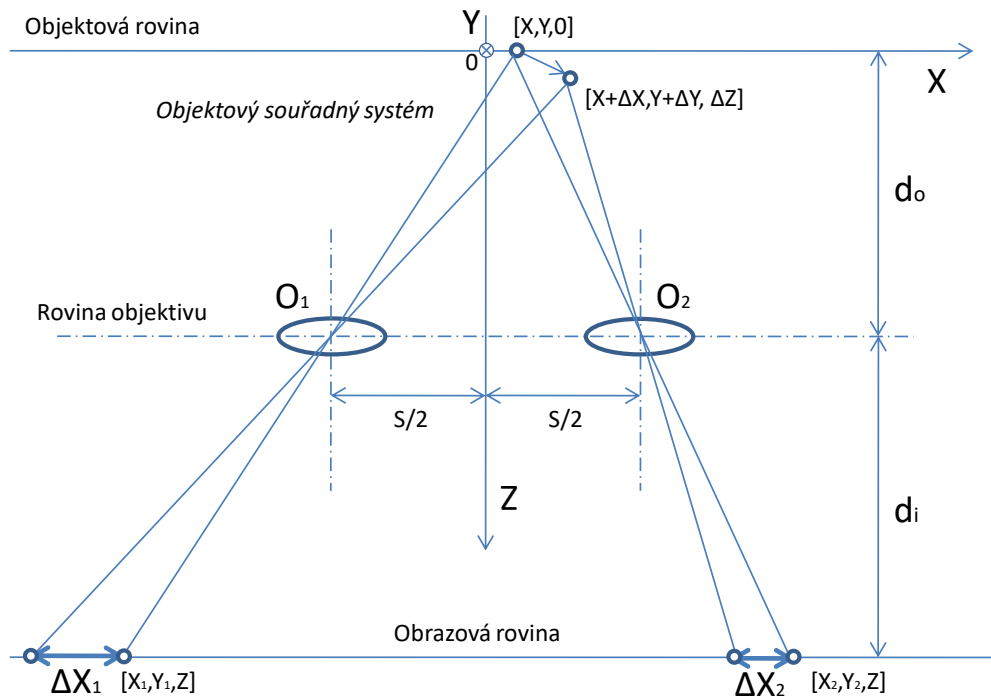
$$\Delta X = \frac{\Delta X_1 \left(X - \frac{S}{2}\right) - \Delta X_2 \left(X + \frac{S}{2}\right)}{M_j S - (\Delta X_1 - \Delta X_2)}, \quad (8)$$

$$\Delta Y = \frac{-Y\Delta Z}{d_o} + \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{2M_j} \left( \frac{\Delta Z}{d_o} - 1 \right), \quad (9)$$

kde  $d_o$  je vzdálenost mezi objektovou rovinou a rovinou objektivu,  $d_i$  vzdálenost mezi obrazovou rovinou a rovinou objektivu,  $M_j$  je jmenovité zvětšení, které je rovno:

$$M_j = X/X_1 = Y/Y_1 = d_i/d_o. \quad (10)$$

Uvedené vztahy jsou použitelné i pro uspořádání s úhlovým natočením v případě, že rovina objektivu a rovina obrazová jsou u jednotlivých kamer rovnoběžné (nesplňující Scheimpflugovu podmínku). Jmenovité zvětšení je však proměnlivé podél obrazových rovin [4].



Obr. 13: Geometrie uspořádání s bočním posuvem [4]

Pro uspořádání splňující Scheimpflugovu podmínku (viz obr. 11) lze použít vztahy pro zpětnou projekci (11), (12), které eliminují perspektivní zkreslení. Někdy je používán termín narovnání obrazu, nebo z angličtiny: dewarping of images [5]. Pro zpětnou projekci bodů z obrazové roviny do objektové roviny platí:

$$X = \frac{f X_1 \sin \alpha}{M_j \sin \theta (X_1 \sin \alpha + f M_j)}, \quad (11)$$

$$Y = \frac{f X_1}{X_1 \sin \alpha + f M_j} \quad (12)$$

, kde  $f$  je ohnisková vzdálenost použitého objektivu kamery. Projekce je názorně vyjádřena pro bod  $(X_1, Y_1)$ , zaznamenaný kamerou 1. Obdobný vztah platí i pro zpětnou projekci druhé kamery. Další způsob pro eliminaci perspektivního zkreslení je uveden v kapitole 2.2.3.

Po narovnání obrazů do objektové roviny získáme nové hodnoty posunutí zaznamenané částice  $(\Delta X_{1N}, \Delta Y_{1N})$ , odpovídající záznamu z kamery 1 a  $(\Delta X_{2N}, \Delta Y_{2N})$  z kamery 2. Skutečné trojrozměrné posunutí je možné získat na základě vztahů (13), (14), (15), které vycházejí z jednoduché geometrie znázorněné na obr. 14.

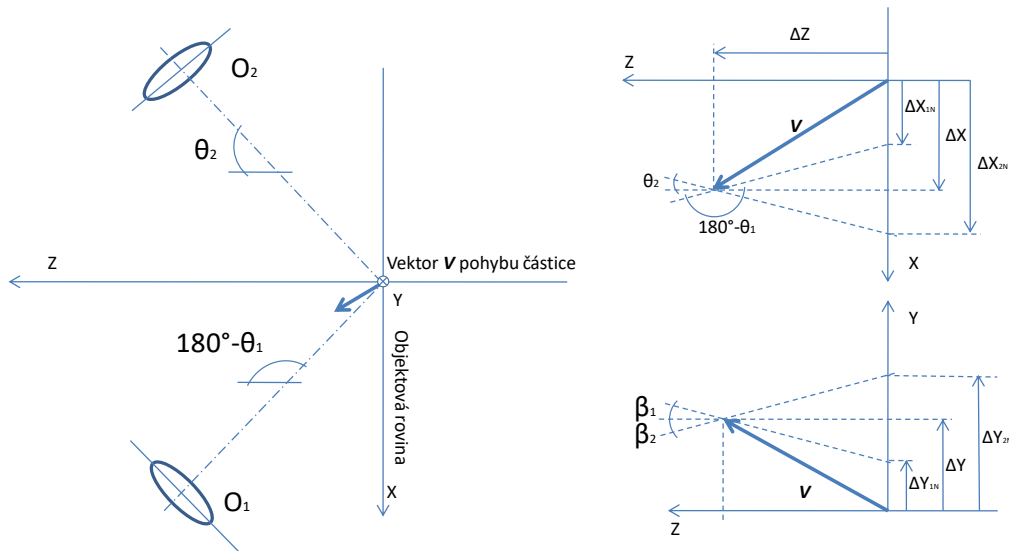
$$\Delta X = \frac{\Delta X_{2N} \tan(\theta_1) - \Delta X_{1N} \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \quad (13)$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta Y_{1N} + \Delta Y_{2N}}{2} + \frac{\Delta X_{2N} - \Delta X_{1N}}{2} \left( \frac{\tan(\beta_1) - \tan(\beta_2)}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \right) \quad (14)$$

$$\Delta Z = \frac{\Delta X_{2N} - \Delta X_{1N}}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \quad (15)$$

Výše uvedené vztahy je možné využít v obecném případě pro uspořádání s úhlovým natočením. Pozorovací úhly kamer  $\theta$  nemusí být shodné a kamery nemusí být ve stejné výšce vůči měřené oblasti. Úhly  $\beta_1, \beta_2$  vyjadřují natočení os objektivů kamer kolem osy  $X$  objektového souřadného systému. Uvedený postup rekonstrukce po narovnání obrazů se někdy také nazývá Willertova metoda [12].





Obr. 14: Geometrie uspořádání s úhlovým natočením [12]

### 2.2.2 Rekonstrukce založena na modelu perspektivní kamery

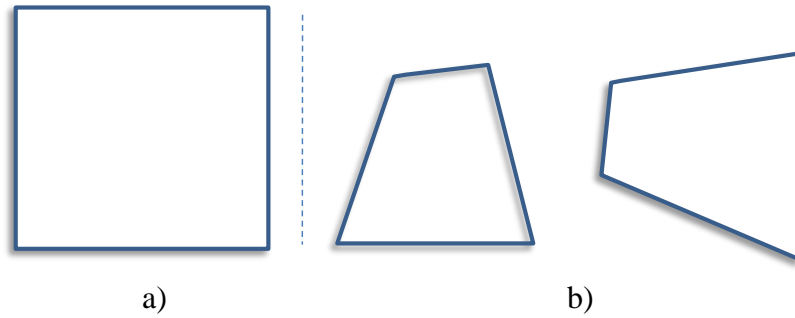
Při tomto přístupu k rekonstrukci jsou vlastnosti jednotlivých kamer, použitých při měření, aproximovány modelem perspektivní kamery.

Perspektivní kamera transformuje body  $X$  z projektivního prostoru objektového souřadného systému, na body  $x$  v projektivním prostoru obrazové roviny a to tak, že platí [17], [25]

$$x = PX, \quad (16)$$

kde  $P$  je projekční matice kamery o rozměrech  $3 \times 4$  a hodnosti 3.

Projektivní prostor je rozšířením euklidovského prostoru o množinu bodů, nazývaných body v nekonečnu. Platí tak, že každé dvě přímky, tedy i navzájem rovnoběžné se protnou v jednom bodě v nekonečnu a že každými dvěma body prochází právě jedna přímka. Při transformaci z euklidovského prostoru do projektivního obecně nezůstane zachován tvar objektu, a to ani v poměru vůči skutečnosti, viz obr. 15. Z geometrických transformací je projektivní ta nejobecnější. Obsahuje největší množství transformací (otočení, posunutí, atd.), ale zároveň mají nejmenší počet invariantů [25]. Mezi projektivní a euklidovskou transformací je dále transformace afinní a metrická.

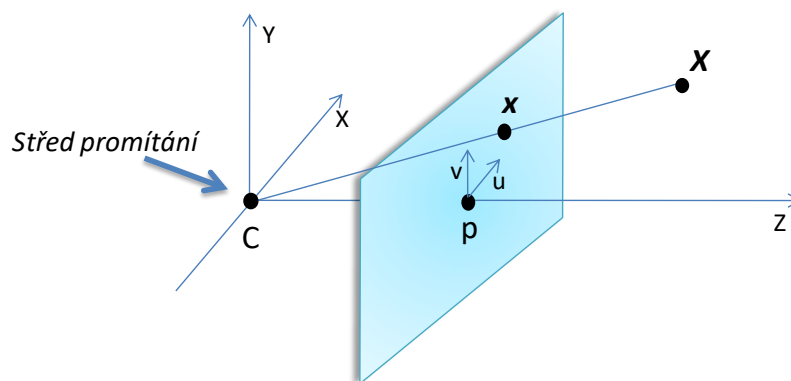


Obr. 15: Zobrazení čtverce a) v euklidovském b) v projektivním prostoru

Na obr. 16 je znázorněn základní model projekce perspektivní kamery. Základem modelu je středové promítání, přičemž optický střed  $C$  je umístěn do počátku objektového souřadného systému. Osa  $Z$  je normálou k obrazové rovině (průmětně), která je vzdálena od optického středu o ohniskovou vzdálenost  $f$ . Kolmice ze středu  $C$  na obrazovou rovinu je nazývána hlavní osou kamery, v tomto případě je totožná s osou  $Z$ . Posledním definovatelným pojmem je průsečík hlavní osy a průmětny nazývaný hlavní bod nebo principiální bod  $p$ .

Projekci bodu  $X = (X, Y, Z)$  odpovídá bod  $x = (fX/Z, fY/Z, f)$ . Pokud je ignorována poslední souřadnice bodu  $x$ , je získána hledaná transformace mezi trojrozměrným a dvojrozměrným prostorem (obrazovou rovinou)

$$(X, Y, Z) \rightarrow \left( \frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z} \right). \quad (17)$$



Obr. 16: Model perspektivní kamery [17]

V případě zápisu pomocí homogenních souřadnic, z důvodu usnadnění výpočtu, je transformace vyjádřena

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Obrazový souřadný systém nemusí mít počátek umístěný v hlavním bodě kamery. Většinou bývá zvykem umístit počátek do levého horního nebo dolního rohu obrazu, jak je znázorněno na obr. 9. Je nutné také zahrnout případ, kdy kamera nemá stejné zvětšení ve směru osy  $u$  a  $v$ , to znamená, že pixely kamery nejsou čtvercové. Projekční matice je doplněna o tzv. intrinsické (vnitřní) parametry kamery, které jsou popsány kalibrační maticí  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f\sigma & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f\tau & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\pi & 0 & p_x \\ 0 & f\tau & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{I}|0] = \mathbf{K}[\mathbf{I}|0], \quad (19)$$

kde  $p_x$  a  $p_y$  jsou souřadnice hlavního bodu v obrazové rovině,  $\pi$  je poměr šířky a výšky pixelu,  $\tau$  je míra zkosení pixelů.

Skutečnost, kdy při promítání není optický střed umístěn v počátku objektového souřadného systému a hlavní osa kamery není shodná s osou  $Z$ , je popsána vnějšími parametry kamery, viz vztah (20). Vnější parametry definují orientaci a polohu soustavy kamery v prostoru. Orientaci reprezentuje rotační matice  $\mathbf{R}$  o velikosti  $3 \times 3$  (rotace kamery kolem všech tří os objektového souřadného systému) a translační vektor  $\mathbf{t}$  určující pozici optického středu kamery. Mimo vnějších parametrů kamery je projekční matice doplněna o  $\mu$ , což je koeficient změny měřítka.

$$\mathbf{P} = \mu \mathbf{K} \mathbf{R} [\mathbf{I} | -\mathbf{t}] \quad (20)$$

## Výpočet projekční matice ze známých umístění bodů ve 3D

Pokud nejsou známy vnitřní a vnější parametry kamery, projekční matici lze získat několika způsoby. Jedním z nich je výpočet projekční matice na základě znalosti pozic

objektů (bodů) v objektovém souřadném systému a pozici jejich projekce v obrazovém souřadném systému. Projekční matici je možné zapsat ve tvaru

$$\begin{bmatrix} ku \\ kv \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Je-li známa pozice minimálně šesti bodů, jsou koeficienty  $P_{11}$  až  $P_{34}$  určeny způsobem uvedeným v [26], [27].

Pro matici  $P$  mj. platí

$$AP = 0, \quad (22)$$

kde  $A$  je

$$A = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & -v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_n X_n & -v_n Y_n & -v_n Z_n & -v_n \end{pmatrix} \quad (23)$$

a  $X_n, Y_n, Z_n$  jsou souřadnice  $n$ -tého bodu v objektovém souřadném systému,  $u_n, v_n$  souřadnice projekce  $n$ -tého bodu v obrazové rovině. Projekční matice je získána řešením této soustavy lineárních rovnic a to například singulárním rozkladem (SVD) matice  $A$  [17].

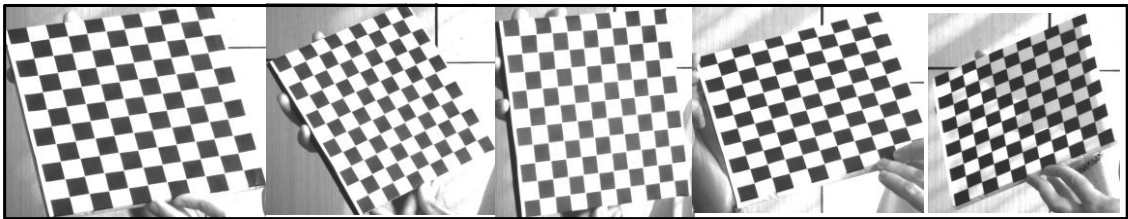
Samozřejmě je výhodou znalost více než šesti bodů, z důvodu lepší aproximace projekční matice a s tím spojené 3D rekonstrukce dané scény, která je pak daleko přesnější. K tomuto je využit tzv. kalibrační terčik, viz kapitola 2.3. Lepších výsledků je také dosaženo normalizací souřadnic [17].

Je třeba dodat, že model perspektivní kamery je vytvořen na základě geometrické optiky, nedokáže popsat nelineární jevy, jako je zkreslení obrazu nedokonalou optikou, lokální deformace obrazu, radiální zkreslení nebo například zkreslením způsobené pozorováním objektů za válcovým sklem (v kapitole 2.2.3 je zmíněn polynomický obrazový model, který je uvažován v případě významných nelinearit při

experimentálních měřeních). Zkreslení obrazu zapříčiněné kamerou je možné eliminovat tzv. autokalibrací (self-calibration) kamery [15].

## Autokalibrace kamery

Díky této metodě kalibrace je možné získat vnitřní a vnější parametry kamery, k tomu však eliminovat zkreslení obrazu zapříčiněné nedokonalou optikou [15]. Parametry není potřeba měřit, ale jsou vypočteny ze série snímků objektu s definovanými rozměry. K autokalibraci se nejčastěji využívá obrazec šachovnice se známými rozměry políček, viz obr. 17, který je nasnímán v několika pozicích.



Obr. 17: Záznam šachovnicového terčíku

Jak již bylo uvedeno vztah (16) mapuje body z objektového souřadného systému do obrazové roviny. Pokud je použit vztah (21) lze body ze scény transformovat přímo do obrazového souřadného systému (tvořenými jednotlivými pixely). Pokud je bráno v potaz zkreslení obrazu kamerou, je transformace bodů z obrazové roviny o souřadnicích  $(X, Y)$  do obrazového souřadného systému  $(u, v)$  vyjádřena následovně:

$$X + \delta X = (u + \varepsilon_u - u_0)dx, \quad (24)$$

$$Y + \delta Y = (v + \varepsilon_v - v_0)dy. \quad (25)$$

Kde  $(\delta X, \delta Y)$  vyjadřuje obrazové zkreslení,  $\varepsilon_u, \varepsilon_v$  jsou chyby v určení obrazových pozic  $(u, v)$  při navzorkování do pixelové mřížky a  $(dx, dy)$  jsou rozměry pixelu. Zkreslení je obvykle rozděleno do dvou částí. Radiální zkreslení  $(\delta X_r, \delta Y_r)$  je vyjádřeno parametry  $a_1, a_2, a_3$ . Tangenciální zkreslení  $(\delta X_t, \delta Y_t)$  je definováno parametry  $p_1, p_2$ :

$$\delta X_r = (u - u_0)(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6)dx, \quad (26)$$

$$\delta Y_r = (v - v_0)(a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6)dy, \quad (27)$$

$$\delta X_t = \left[ p_1 \left( p_x' r^2 + 2 \frac{(u-u_0)^2}{p_x'} \right) + 2p_2(u-u_0) \frac{v-v_0}{p_y'} \right] dx, \quad (28)$$

$$\delta Y_t = \left[ p_2 \left( p_y' r^2 + 2 \frac{(v-v_0)^2}{p_y'} \right) + 2p_1 \frac{u-u_0}{p_x'} (v-v_0) \right] dy. \quad (29)$$

Kde  $p_x' = \frac{p'}{dx}$  a  $p_y' = \frac{p'}{dy}$  reprezentuje obrazovou vzdálenost v jednotkách pixelů a

$r = \sqrt{\frac{(u-u_0)^2}{p_x'^2} + \frac{(v-v_0)^2}{p_y'^2}}$  je radiální vzdálenost vůči obrazovému centru.

Dosažením vztahů (24 - 29) do soustavy rovnic (21) mohou být chyby  $\varepsilon_u, \varepsilon_v$  vyjádřeny (pro  $\mu = 1$ ):

$$\varepsilon_u(\phi) = u_0 + p_x' \frac{R_{11}X + R_{12}Y + R_{13}Z + t_x}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + t_z} + \frac{\delta X_r + \delta X_t}{dx} - u, \quad (30)$$

$$\varepsilon_v(\phi) = v_0 + p_y' \frac{R_{11}X + R_{12}Y + R_{13}Z + t_x}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + t_z} + \frac{\delta Y_r + \delta Y_t}{dy} - v, \quad (31)$$

kde  $\phi$  je vektor neznámých proměnných, vnitřních a vnějších parametrů kamery, včetně parametrů zkreslení. Vektor  $\phi$  je odhadnut minimalizací sumy  $\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{u_i}^2 + \varepsilon_{v_i}^2)$  z  $n$  bodů  $(X_i, Y_i, Z_i)_{i=1, \dots, n}$  na šachovnici a jim odpovídajícím bodům v zaznamenaném obraze  $(u_i, v_i)_{i=1, \dots, n}$ .

V praxi mohou být chyby  $\varepsilon_u, \varepsilon_v$  významným zdrojem nepřesností ve hledaných parametrech. Využívá se proto více záznamů šachovnice pořízených stejnou kamerou. Šachovnice je v průběhu záznamu rotována a posouvána nahodile.

Pokud je kalibrace provedena s kamerou, kde je její objektiv a senzor nastaven dle Scheimpflugovy podmínky, není třeba dalších úprav. Pokud tomu tak není je provedena dodatečná transformace mezi rovinou objektivu a rovinou senzoru, viz [15].

## Triangulace

Poté co jsou určeny projekční matice  $\mathbf{P}$  a  $\mathbf{P}'$  jednotlivých kamer, použitých při snímání proudového pole metodou Stereo PIV, je možné zrekonstruovat trojrozměrnou scénu na základě tzv. triangulace.

Pro bod ve scéně  $X$  a jeho projekce  $\mathbf{x} = (u, v, 1)^T$  a  $\mathbf{x}' = (u', v', 1)^T$  v obrazových rovinách platí [17]

$$\begin{bmatrix} up^{3T} - p^{1T} \\ vp^{3T} - p^{2T} \\ u'p^{3T} - p'^{1T} \\ v'p^{3T} - p'^{1T} \end{bmatrix} \mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{0}, \quad (32)$$

kde  $p^{iT}$  je  $i$ -tý řádek matice  $\mathbf{P}$ . Ze známých korespondencí je možné určit umístění bodu  $X$  v objektovém souřadném systému. Matice  $\mathbf{A}$  je rozložena pomocí SVD tak, že platí  $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T$ , kde hledaný vektor  $\mathbf{X}$  homogenních souřadnic odpovídá nejmenšímu singulárnímu číslu v  $\mathbf{D}$ .

Rekonstrukce pomocí triangulace odpovídá geometrické transformaci z projektivního prostoru do metrického. K úplné rekonstrukci do euklidovského prostoru je potřeba určit koeficient změny měřítka  $\mu$ .

### 2.2.3 Rekonstrukce založena na polynomickém modelu

Jak již bylo zmíněno, model perspektivní kamery nedokáže popsat nelineární jevy, jako je distorze obrazu způsobená pozorováním objektů, například skrze válcové sklo nebo zkreslení obrazu zapříčiněné nedokonalou optikou bez dalších úprav, jakou je autokalibrace. V těchto případech je vhodné použít polynomický obrazový model  $n$ -tého řádu, který byl navržen [11]:

$$F(u, v) = \sum_{i=0, j=0, k=0}^{i=n, j=n, k=n} \mathbf{A}_{i,j,k} X^i Y^j Z^k, \quad (33)$$

kde koeficienty  $\mathbf{A}_{ijk}$  jsou dvojrozměrné vektory. Ve většině případů je dostačující polynomický model třetího řádu pro souřadnice  $X$ ,  $Y$  a druhého řádu pro  $Z$  souřadnici:

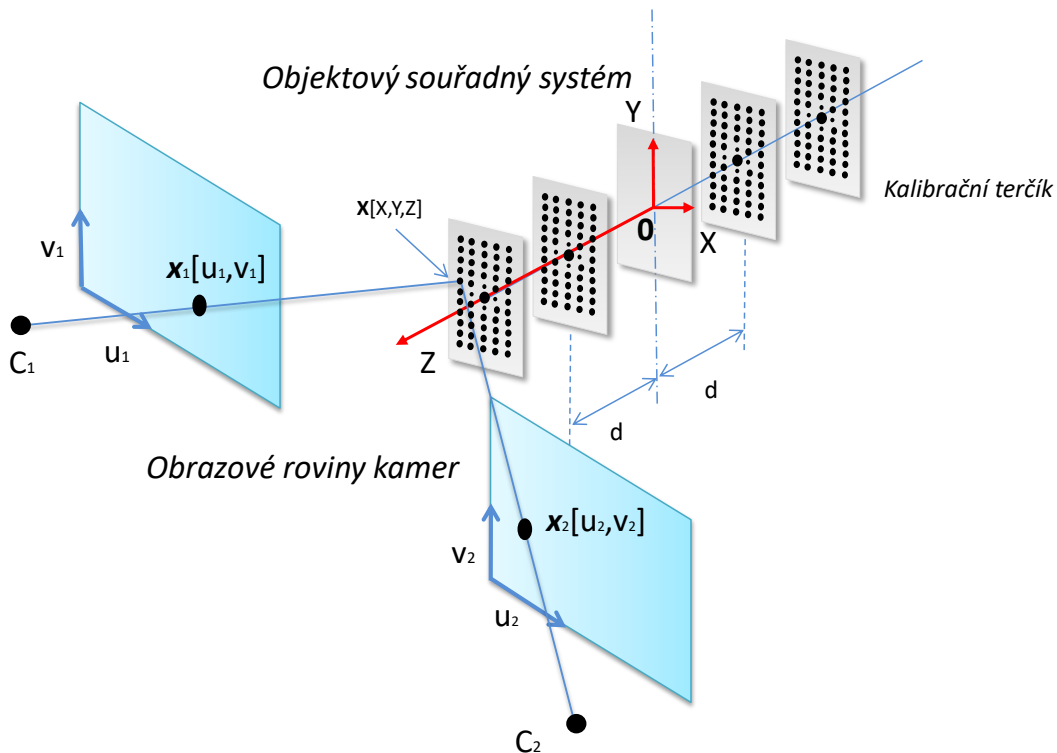
$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} &= \mathbf{A}_{000} + \mathbf{A}_{100}X + \mathbf{A}_{010}Y + \mathbf{A}_{001}Z \\
&+ \mathbf{A}_{110}XY + \mathbf{A}_{101}XZ + \mathbf{A}_{011}YZ \\
&+ \mathbf{A}_{200}X^2 + \mathbf{A}_{020}Y^2 + \mathbf{A}_{002}Z^2 \\
&+ \mathbf{A}_{300}X^3 + \mathbf{A}_{210}X^2Y + \mathbf{A}_{201}X^2Z & (34) \\
&+ \mathbf{A}_{030}Y^3 + \mathbf{A}_{120}XY^2 + \mathbf{A}_{021}Y^2Z \\
&+ \mathbf{A}_{102}XZ^2 + \mathbf{A}_{012}YZ^2 + \mathbf{A}_{111}XYZ.
\end{aligned}$$

Model není určen žádnými fyzikálními jevy, ale je stanoven zcela empiricky. Pro polynomický model (34) je potřeba vypočítat devatenáct neznámých vektorů. Ty jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců ze souboru bodů v objektové rovině (u kterých známe jejich souřadnice) a jejich projekcí v obrazové rovině. K tomu je využít záznam obrazce s definovanými rozměry (podobně jako u autokalibrace) a polohou vůči středu souřadného systému, viz kapitola 2.3. Pokud je záznam proveden současně pro obě kamery, které jsou uspořádány dle možností v kapitole 2.1, jedná se o tzv. kalibraci stereo-snímání. Na obr. 18 je kalibrace znázorněna pro posuvný terčik, který je zaznamenán v pěti polohách vůči středu souřadného systému. U ostatních variant kalibrace stereo-snímání je následující postup pro získání trojrozměrné informace stejný.

Neznámé vektory  $\mathbf{A}_{ijk}$  jsou vypočteny pro každou kameru. Na obr. 18 je znázorněna projekce bodu  $\mathbf{X}$  kalibračního obrazce do jednotlivých obrazových rovin kamer. Trojrozměrnou informaci o pozici tohoto bodu (nebo sytící částice na tomto místě) lze ze známých pozic  $\mathbf{x}_1$  a  $\mathbf{x}_2$  a známých koeficientů  $\mathbf{A}$  určit triangulací. Pro každý bod  $\mathbf{X}$  (v zorném poli obou kamer) lze sestavit soustavu čtyř nelineárních rovnic na základě vztahu (34).

Model se také používá v případě ‚narovnání‘ obrazu, tedy při zpětné projekci bodů z obrazové roviny do objektové.





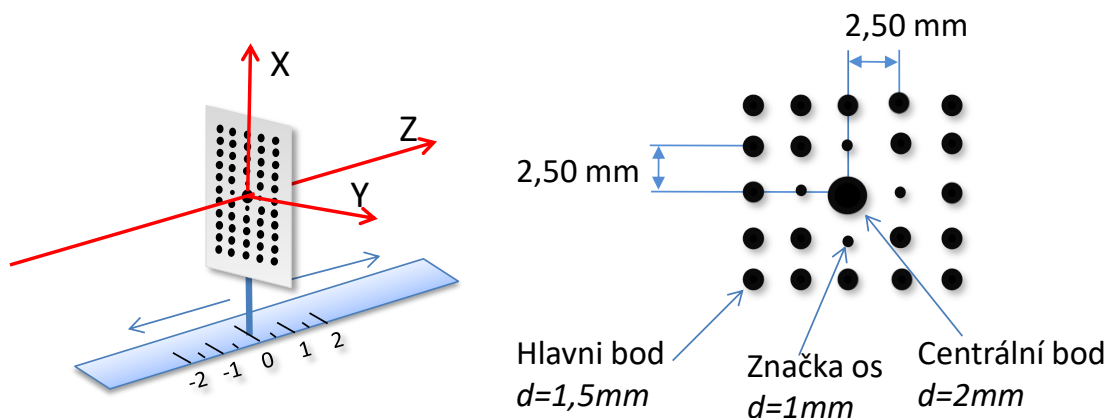
Obr. 18: Záznam posuvného kalibračního terčiku

### 2.3 Možnosti kalibrace stereo-snímání

Každému měření předchází tzv. kalibrace stereo-snímání. Jedná se o proces, při kterém jsou nalezeny informace o vzájemných vazbách mezi pozorovanou scénou a jednotlivými kamerami. Informace lze definovat na základě známé geometrie uspořádání (kapitola 2.2.1), použitím kalibračních terčků (kapitola 2.2.3), nebo projekčních matic získaných bez terčků (kapitola 2.2.2). Druhá varianta je využívána v naprosté většině měření. Základem takové kalibrace je záznam bodů kalibračního terčku v několika rovinách podél osy  $Z$  objektového souřadného systému. Je to z důvodu toho, že ani sytící částice nejsou osvětlené laserovým řezem pouze v jedné rovině, ale v tenkém listě o tloušťce 3-5 mm (jedná se o viditelné rozmezí). Vhodný postup je tedy provést kalibraci přibližně v rozmezí  $\pm 2$  mm kolem středu laserového řezu ( $Z=0$ ). Existuje několik možností kalibračního terčku.

## Posuvný terčik

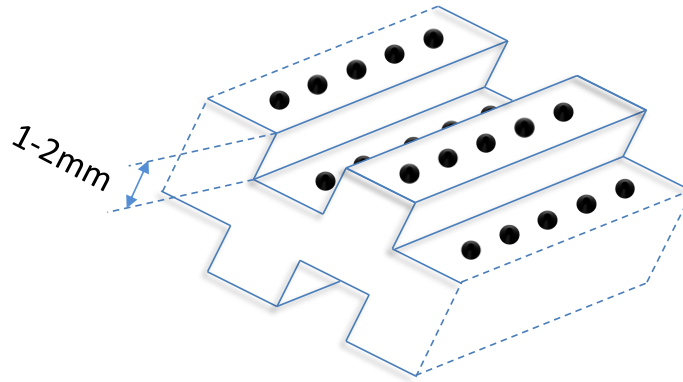
Jedná se o nejčastěji využívaný způsob kalibrace. Terčik je zaznamenán kamerami ve středu laserového řezu v měřené oblasti a v několika dalších polohách (kolmých na osu  $Z$ ), před a za touto středovou pozicí. Běžný postupem je záznam v pěti polohách a to v  $Z = \{-2, -1, 0, 1, 2\}mm$ . Terčik obsahuje tři druhy bodů (viz obr. 19): centrální bod (nazývaný také nulový bod), pro který ve středové pozici platí  $X = 0, Y = 0, Z = 0$ , čtyři značky os určující směr os  $X, Y$  objektového souřadného systému a hlavní body. Na obr. 19 jsou pro názornost uvedeny také rozměry vzoru kalibračního terčíku, které jsou běžně využívány.



Obr. 19: Posuvný kalibrační terčik

## Víceúrovňový terčik

Další možností je kalibrace s využitím víceúrovňového terčíku [13]. Body na terčíku nejsou v jedné rovině a není tedy vyžadován pohyb s terčíkem, jako tomu bylo v předchozím případě. Kalibrační terčik je umístěn do středu laserového řezu. Nejčastěji se využívají dvou až tří úrovňové terčíky, kde jednotlivé úrovně jsou od sebe vzdáleny 1-2 mm. Na obr. 20 je znázorněn dvojúrovňový terčik, který je možné snímat z obou stran. Při tomto postupu je žádoucí, aby úhly kamer  $\beta_1, \beta_2$  byly nejlépe nulové, jinak by mohly být kalibrační body v zákrytu za povrchem terčíku.

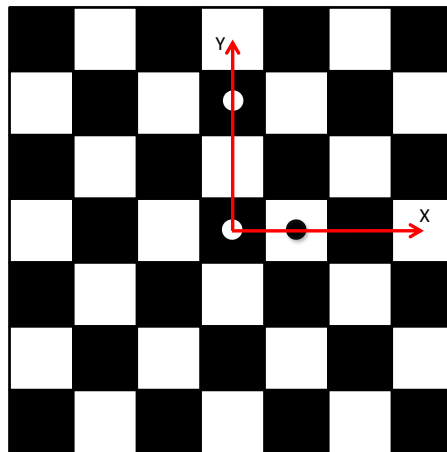


Obr. 20: Víceúrovňový kalibrační terčik

### Šachovnicový terčik

Na obr. 21 je znázorněn šachovnicový terčik. Místo bodů (teček) jsou zde využity, ke kalibraci, rohy jednotlivých políček o známé velikosti (využívá se např. 9x9 políček o velikosti hrany políčka 15 mm). Orientace os  $X$  a  $Y$  je definována způsobem uvedeným na obr. 21. Záznam terčiku může být proveden postupem obdobným jako u posuvného terčiku, nebo následovně (postup DynamicStudia pro model dírkové kamery):

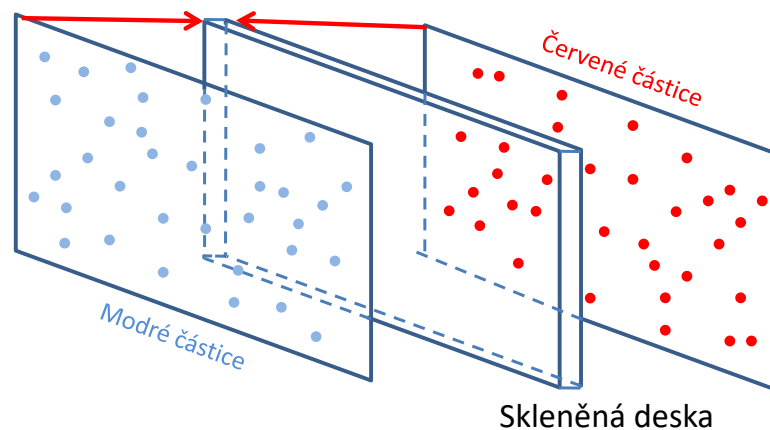
- 1) Je pořízen tzv. referenční záznam v pozici  $Z=0$  a rovině  $XY$
- 2) Čtyři záznamy s natočením terčiku přibližně  $10^\circ - 20^\circ$  kolem os  $X$  a  $Y$  (jeden při natočení terčiku v kladném smyslu kolem osy  $X$  a jeden v záporném, stejně tak kolem osy  $Y$ )
- 3) Záznam natočeného terčiku o  $90^\circ$  kolem osy  $Z$  a poté znovu čtyři záznamy s natočením přibližně  $10^\circ - 20^\circ$  kolem os  $X$  a  $Y$



Obr. 21: Šachovnicový kalibrační terčik

## Dvouvrstvý chromatický terčik

Kalibraci je možné provést pomocí dvouvrstvého chromatického terčíku [12] znázorněného na obr. 22. Dvě průhledné folie s různě barevnými obrazci (například modré a červené, synteticky vytvořené, obrazy částic) jsou nalepeny naproti sobě na skleněnou desku. Kalibrační terčik je zaznamenán oběma kamerami, kdy střed skla je umístěn v  $Z=0$ . Z každého záznamu jsou vytvořeny dva obrazy, jeden pouze s modrými částicemi a druhý s červenými. Vyhodnocení je založeno na vzájemné korelaci těchto záznamů s odpovídajícím synteticky vytvořeným obrazem částic (bez jakéhokoliv zkreslení). Na základě toho je vytvořeno pole hodnot zkreslení. Tento postup vyžaduje jiný, odlišný způsob zpracování, než byl uveden v předcházejících kapitolách.



Obr. 22: Dvouvrstvý chromatický terčik

## 2.4 Omezení a systematické chyby metody Stereo PIV

Stereo PIV vychází z principů konvenční metody PIV. Omezení a systematické chyby PIV, uvedené v kapitole 1.4, spadají tak i pod metodu Stereo PIV. V této kapitole jsou popsány další omezení a chyby, které jsou typické pro Stereo PIV.

### 2.4.1 Vliv pozorovacích úhlů kamer na chybu měření

Mezi systematické chyby metody Stereo PIV patří chyba měření zapříčiněná pozorovacími úhly kamer při snímání měřené oblasti. Chyba lze stanovit na základě tzv. analýzy chyb Stereo PIV, kterou pro uspořádání s bočním posuvem provedl například Lawson [28] a pro uspořádání s úhlovým natočením Prasad [29].

Přesnost určení trojrozměrného posunutí částice v měřené oblasti dle vztahů (7), (8), (9) je ovlivněna nejistotami v jednotlivých geometrických parametrech stereo-snímání. Každou z proměnných, ve výše uvedených vztazích, je možné vyjádřit její směrodatnou odchylkou  $\sigma$  vůči její přesné hodnotě:

$$\left[\frac{\sigma_{\Delta Z}}{\Delta Z}\right]^2 = (\sigma_{\Delta X_1}^2 + \sigma_{\Delta X_2}^2) \left[\frac{d_0}{M_j S \Delta Z}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_S}{S}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{M_j}}{M_j}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{d_0}}{d_0}\right]^2, \quad (35)$$

$$\left[\frac{\sigma_{\Delta X}}{\Delta X}\right]^2 = \left[\frac{\sigma_{\Delta X_1} \left(X - \frac{S}{2}\right)}{M_j S \Delta X}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{\Delta X_2} \left(X - \frac{S}{2}\right)}{M_j S \Delta X}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{M_j}}{M_j}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_S \Delta Z X}{S \Delta X d_0}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_X \Delta Z}{d_0 \Delta X}\right]^2, \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\sigma_{\Delta Y}}{\Delta Y}\right]^2 &= (\sigma_{\Delta X_1}^2 + \sigma_{\Delta X_2}^2) \left[\frac{Y}{M_j S \Delta X}\right]^2 + (\sigma_{\Delta Y_1}^2 + \sigma_{\Delta Y_2}^2) \left[\frac{1}{2 M_j \Delta Y}\right]^2 + \\ &\quad \left[\frac{\sigma_{M_j}}{M_j} \left(1 + \frac{\Delta Z Y}{\Delta Y d_0}\right)\right]^2 + \left[\frac{\sigma_S \Delta Z Y}{S \Delta Y d_0}\right]^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_Y \Delta Z}{d_0 \Delta Y}\right]^2. \end{aligned} \quad (37)$$

Odchylky v hodnotách  $\sigma_{\Delta X_j}$ ,  $\sigma_{\Delta X_j}$  ( $j = 1, 2$ ) vznikají při detekci bodů ve fotografiích. Zahrnují náhodné a systematické chyby popsané v kapitole 2.4.2 a také [30]. Ostatní směrodatné odchylky proměnných  $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_S, \sigma_{M_j}$  a  $\sigma_{d_0}$  jsou zapříčiněny chybným určením příslušných vzdáleností. Zdali platí  $\sigma_{\Delta X_1} = \sigma_{\Delta X_2} = \sigma_{\Delta Y_1} = \sigma_{\Delta Y_2} = \sigma_{\Delta X}$  je možné vyjádřit vliv těchto chyb na výsledné trojrozměrné posunutí následovně:

$$\sigma_{\Delta Z} \approx \sqrt{2} \left[\frac{d_0}{M_j S}\right] \sigma_{\Delta X}, \quad (38)$$

$$\sigma_{\Delta X} \approx \sqrt{2} \left[\frac{1}{M_j}\right] \sigma_{\Delta X} \quad (X = 0), \quad (39)$$

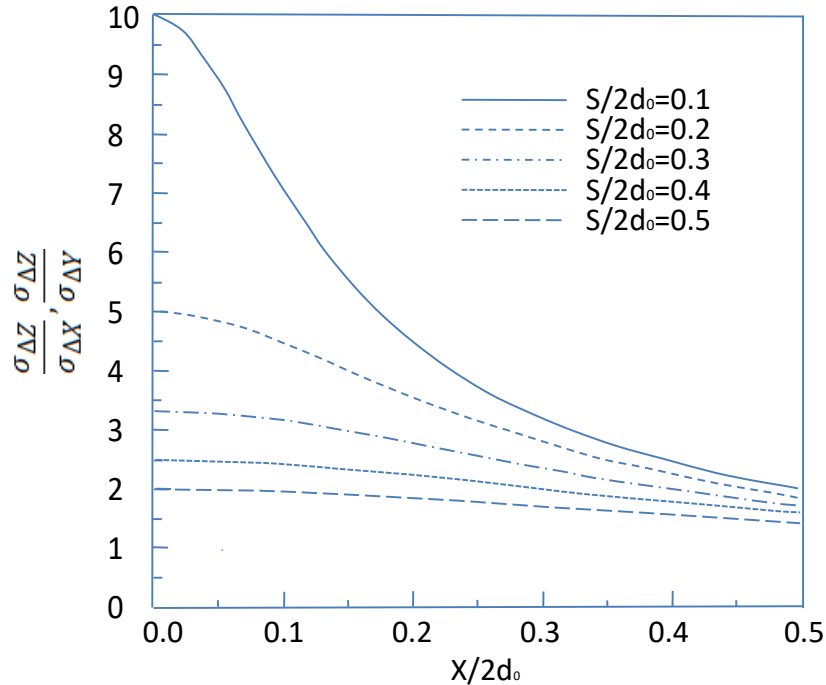
$$\sigma_{\Delta Y} \approx \sqrt{2} \left[\frac{1}{M_j}\right] \sigma_{\Delta X} \quad (Y = 0). \quad (40)$$

Relativní chyba složky vektoru rychlosti  $V$  částice (pro  $X = 0, Y = 0$ ) ve směru osy  $Z$  (anglicky out-of-plane component) lze poté vyjádřit:

$$\frac{\sigma_{\Delta Z}}{\sigma_{\Delta X}} = \frac{\sigma_{\Delta Z}}{\sigma_{\Delta Y}} = 2 \frac{d_0}{S} = \frac{1}{\tan \theta}. \quad (41)$$

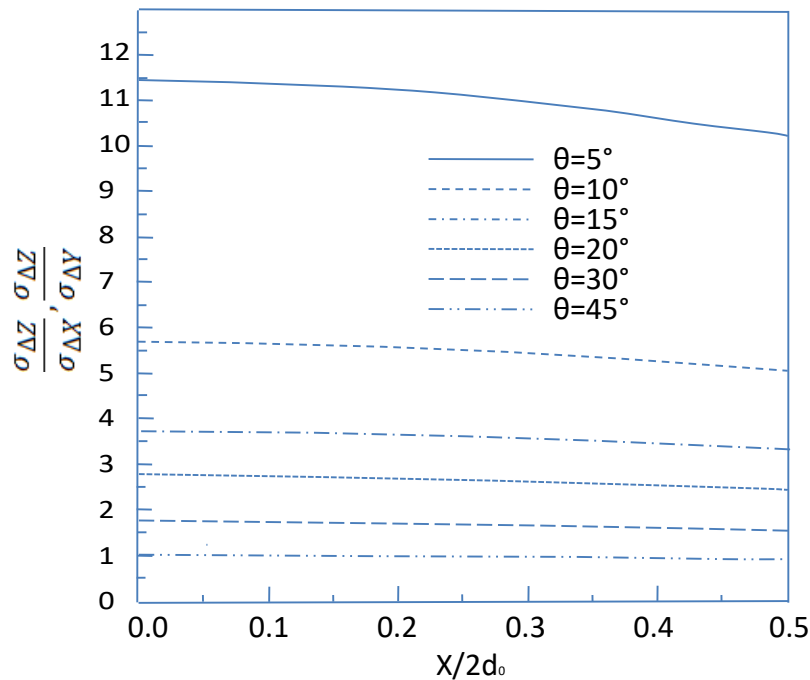
Výše uvedená relativní chyba je shodná, jak pro uspořádání s bočním posunem (pro které byla provedena analýza), ale také pro uspořádání s úhlovým natočením [29].

Autoři Lawson a Wu publikovali [28] závislost relativní chyby na poměru vzdáleností  $X/d_0$ , obr. 23 a obr. 24. Relativní chyba pro uspořádání s bočním posunem rapidně vzroste pro  $S/d_0 = \tan\theta < 0.2$  ( $\theta < 10^\circ$ ).



Obr. 23: Relativní chyba složky Z vektoru rychlosti proudění pro uspořádání měřicího systému s bočním posunem [4]

Na obr. 24 je znázorněna relativní chyba pro uspořádání s úhlovým natočením v rozsahu pozorovacích úhlů kamer  $\theta = 5^\circ - 45^\circ$ ,  $\beta = 0$ . Stejnou velikost chyb  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$ ,  $\sigma_{\Delta Z}$  je možné docílit pro pozorovací úhly kamer  $\theta = 45^\circ$ . Tyto úhly jsou proto optimální pro měření metodou Stereo PIV. Doporučený rozsah pozorovacích úhlů je  $\theta = 30 - 45^\circ$ . Pokud je měřená oblast umístěna ve vodě je optimální úhel  $\theta = 32^\circ$  (rozhraní voda s indexu lomu  $n=1.33$  - stěna nádoby - vzduch).



Obr. 24: Relativní chyba složky Z vektoru rychlosti proudění pro uspořádání měřicího systému s úhlovým natočením [4]

### 2.4.2 Chyba v identifikaci kalibračního obrazce

Pokud je trojrozměrná rekonstrukce provedena s využitím kalibračního obrazce je přesnost výsledku ovlivněna chybou identifikace obrazce v objektovém souřadném systému. Pod identifikací obrazce je myšleno určení pozic jednotlivých bodů (teček, rohů) terčíku a výpočet parametrů transformace bodů z objektového souřadného systému do obrazového. Chyba může být dvojího charakteru. Za prvé je to nepřesnost v určení pozice bodů v záznamu kalibračního obrazce (označme  $\vartheta_B$ ). A za druhé je to chyba zapříčiněná vyosením kalibračního terčíku vůči laserovému řezu ( $\vartheta_V$ ). Terčík by měl být umístěn do středu laserového řezu v měřené oblasti v průběhu kalibrace stereosnímání.

Velikost těchto chyb se liší měření od měření. Může být od desetin po desítky pixelů jak pro  $\vartheta_B$ , tak pro  $\vartheta_V$ . Příčina vzniku chyby  $\vartheta_V$  je zřejmá. Na chybu  $\vartheta_B$  má však vliv několik faktorů, především to jsou:

- Tvar bodu po úpravách obrazu (např. segmentování obrazu), není ideální a střed této plochy nemusí korespondovat se skutečnou pozicí bodu (řádově se jedná o

jednotky pixelu). K tomu přispívají již zmíněné chyby  $\varepsilon_u$  a  $\varepsilon_v$ , které je však možné snížit použitím kamery s vyšším rozlišením.

- Proložení bodů polynomickým modelem není ideální (jednotky až desítky pixelů). Tento případ může nastat u velkého zkreslení obrazu terčíku. Snížení chyby je možné docílit použitím modelu vyššího řádu.

Vliv  $\vartheta_B$  a  $\vartheta_V$  na výsledek rekonstrukce je veliký v závislosti na tom, jakému posunutí (v mm) v objektové rovině tato chyba (v pixelech) odpovídá.

### Kompenzace chyby $\vartheta_B$

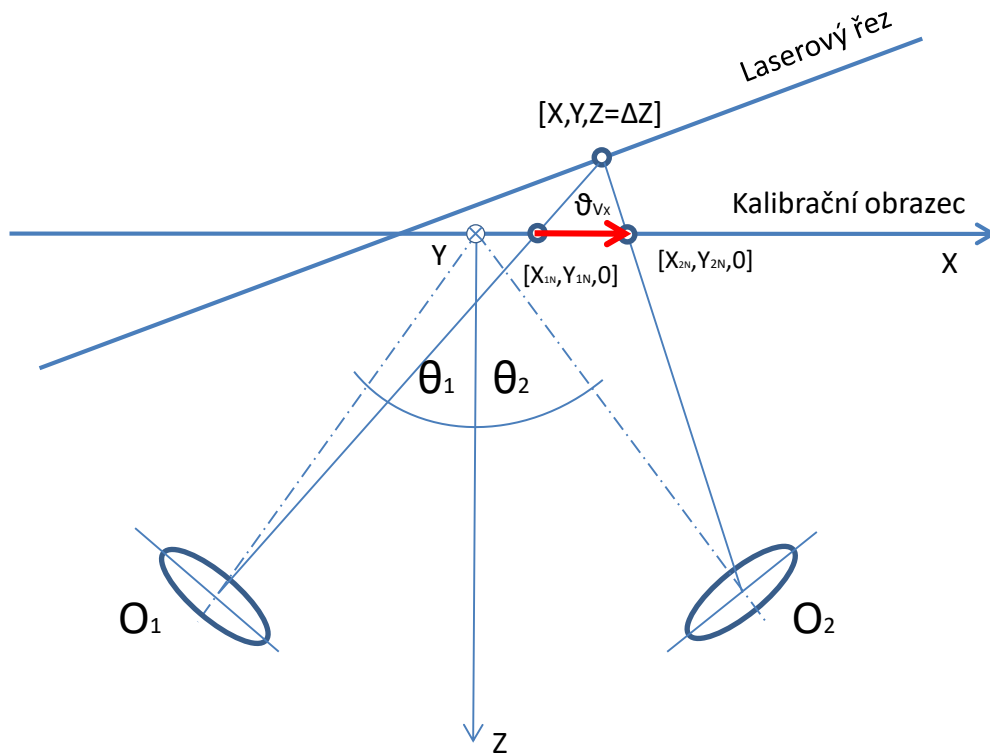
Pro každý bod v obraze terčíku pořízeného jednou z kamer je určena chyba  $\vartheta_B$  ve směru jednotlivých os obrazového systému, tedy  $\vartheta_{Bu}$  a  $\vartheta_{Bv}$ . Je tak definován vektor chyby  $\vartheta_B$  charakterizující nepřesnost v určení pozice každého bodu. Ve většině případů je chyba určena pouze nepřesností v proložení bodů polynomickým modelem. Následně je obraz terčíku narovnan na základě vypočtené transformace. Stejně tak každý vektor chyby. Narovnaný obraz rozdělíme na jednotlivé vyhodnocované oblasti totožné jako při vyhodnocování PIV záznamů. Cílem je určit vektor chyby pro každou oblast. Pokud je ve vyhodnocované oblasti více bodů terčíku, je výsledná chyba pro tuto oblast jednoduchým průměrem nepřesností v určení pozic jednotlivých bodů. Pokud ve vyhodnocované oblasti není naopak žádný bod, je vektor vypočten na základě vektorů ze sousedních oblastí, kde je použita průměrovací konvoluční maska o velikosti minimálně 3x3. Obdobný postup je proveden i pro záznam terčíku z druhé kamery. Výsledkem jsou dvě vektorové mapy, které jsou rekonstruovány na trojrozměrnou vektorovou mapu klasickým způsobem. Korekce je provedena odečtením této vektorové mapy od výsledné trojrozměrné vektorové mapy proudění v dané měřené oblasti.

*V dostupné literatuře není uveden postup pro kompenzaci chyby  $\vartheta_B$ . Chyba je ve většině případů zanedbatelná oproti chybě  $\vartheta_V$  a proto se neuvažuje o její kompenzaci. Nemusí tomu však být pokaždé a je výhodou znát postup pro kompenzaci této chyby. Autor práce navrhl postup, který byl využit na experimentech popsanych v kapitole 3 a 4.*



Kompenzace chyby  $\vartheta_V$ 

Na obr. 25 je zachycena situace, kdy je kalibrační obrazec posunut vůči laserovému řezu. Po kalibraci stereo-snímání je klasicky zaznamenán obraz částic kamerami. Tyto obrazy (body odpovídající částicím) jsou pro kontrolu kalibrace zpětnou projekcí transformovány do objektové roviny. V ideálním případě by se měly pozice jednotlivých částic v obrazech po narovnání překrývat, tedy pro souřadnice každé částice by platilo  $X_{1N} = X_{2N}, Y_{1N} = Y_{2N}, Z_{1N} = Z_{2N}$ . V případě vyosení laserového řezu to však neplatí, viz obr. 25, který se zaměřuje na záznam sytící částice  $[X, Y, Z]$ . Rozdíl v souřadnicích  $X_{1N}, X_{2N}$  a  $Y_{1N}, Y_{2N}$  definuje tzv. vektor difference  $\vartheta_V$ , který je určen pro každou vyhodnocovací oblast v obrazu definovaným společným zorným polem kamer. Rozdíl  $Y_{1N}, Y_{2N}$  je zanedbatelný pro  $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 0$ , a vektor je definován pouze složkou ve směru osy  $X$  ( $\vartheta_{Vx}$ ). Vektory lze určit vzájemnou korelací narovnaných obrazů částic z jednotlivých kamer. Výsledkem je vektorová mapa chyby  $\vartheta_V$ , v anglickém jazyce nazývaná jako Disparity map [6].



Obr. 25: Chyba zapříčiněná vyosením laserového řezu a kalibračního terčíku [39]

Kompenzovat chybu pro každou vyhodnocovací oblast lze na základě vztahu [31]:

$$\Delta Z = Z_{Obj} - Z_{Ter} = \frac{\vartheta_{Bx}}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}, \quad (42)$$

který definuje posun laserového řezu (v pozici  $Z_{Obj}$ ) vůči terčíku (v pozici  $Z_{Ter}$ ), ve smyslu osy  $Z$  pro danou oblast. Ze získaných posunutí je upravena a znovu provedena kalibrace stereo-snímání (posun terčíku o  $\Delta Z$ ), nebo je možné odečíst posunutí od výsledné trojrozměrné mapy proudění. Pokud nejsou známy pozorovací úhly přesně, je možné je zadat pouze přibližně a kompenzaci provést několikrát za sebou až do požadované přesnosti, kterou lze kontrolovat zpětnou projekcí. Další možností je získat pozorovací úhly na základě vztahu [12]:

$$\tan \theta = \frac{\Delta Z_N}{\Delta Z_T} = \frac{\Delta Z_S M_0}{\Delta Z_T} = \frac{\Delta Z_S}{\Delta Z_T} \frac{\Delta X_T}{\Delta X_S}. \quad (43)$$

Rovnice vyjadřuje závislost určitých vzdáleností při záznamu kalibračního obrazce (ve dvou polohách vůči ose  $Z$ ) na pozorovacím úhlu dané kamery. Kde  $\Delta X_T$  je vzdálenost mezi dvěma body kalibračního obrazce (ve smyslu osy  $X$ ),  $\Delta X_S$  je vzdálenost těchto bodů (v px) v narovnaném záznamu obrazce,  $\Delta Z_T$  je velikost posunu kalibračního terčíku v ose  $Z$  do druhé pozice (pro kalibraci s posuvným terčíkem),  $\Delta Z_S$  je posun sledovaných bodů v narovnaném záznamu zapříčiněný posunem terčíku do druhé pozice,  $\Delta Z_N$  je totožný údaj v objektovém souřadném systému (mm).

Druhá možnost kompenzace využívá vnitřních a vnějších parametrů kamer, zjistitelných například pomocí autokalibrace (kompletní postup kompenzace je uveden v [15]). Tato možnost se používá v případech velkého vyosení, kdy nestačí postup výše uvedený. Ze známých vnitřních a vnějších parametrů kamer je vypočtena homografie  $H$  vyjadřující transformaci z obrazového souřadného systému jedné kamer do druhé. V této homografii se vyskytují parametry určující rovnici roviny laserového řezu, díky čemuž je možné upravit objektový souřadný systém, který byl nesprávně určen z vyoseného kalibračního obrazce.

## ***3 Měření metodou Stereo PIV při omezeném přístupu do měřicí oblasti***

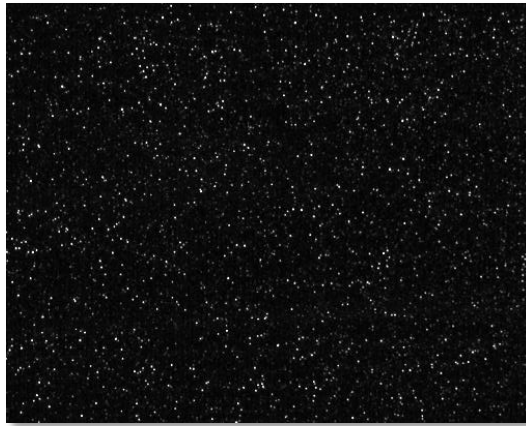
Výzkumu proudění metodou Stereo PIV předchází vždy tzv. kalibrace stereo-snímání (viz kapitola 2.3). V naprosté většině experimentálních měření je ke kalibraci využito terčík s definovaným obrazcem. Body terčíku jsou poté zaznamenány v několika polohách podél osy  $Z$  objektového souřadného systému [11]. Varianty terčíků jsou popsány v kapitole 2.3. Pro takový postup je tedy zásadní přístup do zkoumané oblasti. V komplikovaných experimentálních úlohách může dojít k situacím, kdy není možný pohyb posuvného terčíku nebo rotace šachovnicového terčíku v oblasti, nebo dokonce není možné využít kalibrační terčík, protože ho nelze umístit do zkoumané oblasti. K tomu dochází většinou v uzavřených prostorech nádob či tunelů. Autor práce se v této kapitole věnuje uvedeným komplikovaným situacím.

### ***3.1 Měření bez možnosti využití kalibračního obrazce***

#### ***3.1.1 Analýza problematiky a možné postupy***

Z teorie uvedené v kapitole 2.2 je již známo, že body kalibračního terčíku jsou využity k definování transformace mezi objektovým souřadným systémem a obrazovými souřadnými systémy kamer, viz například výpočet polynomiálního modelu. Jak postupovat pokud kalibrační terčík nelze použít?

Nabízí se myšlenka využít obrazy sytících částic místo terčíku. Na obr. 26 je znázorněn typický záznam částic osvětlených laserovým světlem. K tomu, aby bylo možné záznam použít, je potřeba znát pozici několika částic v objektovém souřadném systému (minimální počet podle druhu transformace). To je však vzhledem k náhodnému rozložení částic nemožné.



Obr. 26: Záznam sytících částic osvětlených laserovým řezem

Je nutné provést kalibraci stereo-snímání a následnou trojrozměrnou rekonstrukci jiným způsobem, než při použití terčů. Existují dvě možnosti.

- Rekonstrukce založena na známé geometrii uspořádání (kapitola 2.2.1)
- Rekonstrukce založena na projekčních maticích jednotlivých kamer (2.2.2)

První možnosti se již věnovalo několik vědeckých prací, jako například [4], [5], [6]. Rekonstrukce vyžaduje určení několika parametrů, přičemž je výrazně citlivá na jejich nepřesné určení. Problematické je například určení vzdálenosti mezi rovinou objektivu a rovinou snímáče kamery.

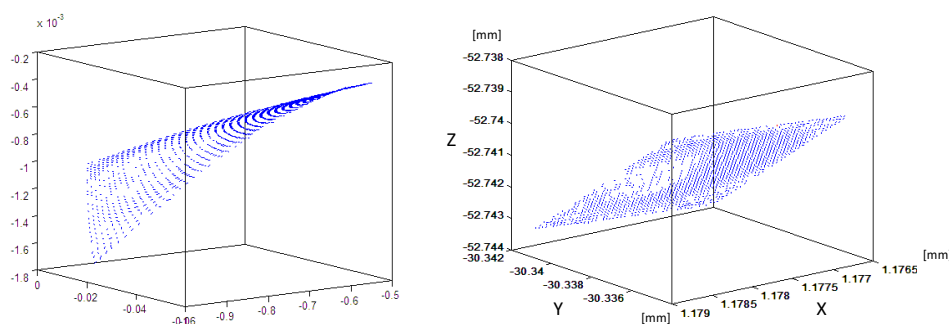
Rekonstrukce druhou zmíněnou možností se zaměřuje na nalezení projekčních matic kamer. Toho lze dosáhnout několika přístupy. Mimo projekčních matic vypočtených ze známých umístění bodů ve scéně (s využitím terčů, viz kapitola 2.2.2) to jsou:

- Výpočet ze známých korespondencí mezi obrazy
- Výpočet z vnitřních a vnějších parametrů kamer

Obecně velmi využívanou metodou trojrozměrné rekonstrukce objektů z dvojrozměrných fotografií je právě rekonstrukce využívající korespondence mezi fotografiemi. Určitému místu ve scéně, které je vyfoceno dvěma fotoaparáty, odpovídá určitý bod ve fotografii pořízené kamerou 1 a určitý bod ve fotografii pořízené kamerou

2. Korespondence je tvořena souřadnicemi těchto dvou bodů v obrazovém souřadném systému kamer. Výpočet vychází z epipolární geometrie [17], která definuje vztah mezi body ve scéně a jejich korespondencemi v obrazech. Zásadním krokem rekonstrukce je najít korespondence v obrazech. Autor disertační práce se uvedenou problematikou zabýval v diplomové práci [33], kde použil kalibrační terčík a jeho záznamy. Nalezení korespondencí bylo v tomto případě jednoduché. Zde však není možné použít kalibrační obrazec a korespondence je nutné hledat jedinečně v obrazech sytících částic. Ke hledání korespondencí v obrazech se využívá několik způsobů, viz [25]. Hlavní princip je založen na porovnávání blízkého okolí bodů/elementů v obrazech, nebo na hledání geometrického vztahu v obrazech. Záznam částic na obr. 26 postrádá jakékoliv geometrické tvary nebo specifickou vlastnost v blízkém okolí částic, díky čemuž by šlo odlišit jednu částici od druhé. Ruční identifikace korespondencí není také vhodná. Většinou není možné identifikovat dostatečné množství korespondencí, k tomu nalezené body jsou relativně velice blízko sebe podél jedné roviny ve scéně, což není vhodné pro výpočet projekčních matic na základě epipolární geometrie.

*Autor práce provedl rekonstrukci na základě ruční identifikace korespondencí v záznamech částic. Jednalo se přibližně o 50 bodů, výsledek je znázorněn na obr. 27. Dochází zde ke značným nepřesnostem, počáteční body vektorů mají ležet v jedné rovině. Rovina je však viditelně deformována.*



*Obr. 27: Rekonstrukce na základě projekčních matic získaných z korespondencí v obrazech (vlevo) a na základě projekčních matic získaných ze známých umístění bodů ve scéně [33]*

Poslední možností je tedy získání projekčních matic na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer, které se autor věnuje v rámci navržené metodiky popsané v následující kapitole.

### ***3.1.2 Metodika založena na znalosti vnitřních a vnějších parametrů kamer***

Proces vývoje metodiky lze rozdělit do následujících kroků:

- definování dané problematiky, analýza možných postupů a vytyčení vhodného postupu
- popis navržené metodiky obsahující teoretickou část, postup při sestavování experimentu a popis algoritmů
- verifikace metodiky na uměle vytvořených datech simulujících experiment se známým teoretickým výsledkem
- ověření na praktických experimentálních úlohách a porovnání s výsledky s dostupným komerčním řešením

Na základě definování problematiky omezeného přístupu do měřené oblasti, analýzy možných postupů uvedených v předcházející kapitole a teoretických informací z kapitol 1 a 2 autor navrhl metodiku pro měření bez použití kalibračního terčíku. V této kapitole bude metodika popsána dle výše uvedené posloupnosti kroků.

#### **Popis navržené metodiky**

Metodika je založena na modelu perspektivní kamery popsaného v kapitole 2.2.2. Vztah (20) definuje projekční matici kamery jejími vnitřními a vnějšími parametry. Hlavním krokem na začátku měření je nalézt tyto parametry.

## Určení vnitřních parametrů kamer

Vnitřní parametry kamery  $f$ ,  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $\tau$  a  $\pi$  společně s radiálním a tangenciálním zkreslením objektivu lze určit autokalibrací (kapitola 2.2.2). Vytisknutý šachovnicový vzor, přilepený např. na pevnou desku, je zaznamenán v několika polohách a to nejlépe tak, aby šachovnice zabírala co největší část zorného pole kamery, viz obr. 17. Stejný postup je opakován pro druhou kameru. Autokalibrace kamer lze provádět nezávisle na uspořádání kamer při experimentu. Ze záznamů šachovnic dle vztahů uvedených v kapitole 2.2.2 jsou vypočteny hledané parametry. K výpočtu lze použít také algoritmy [34] vytvořené pro programové prostředí Matlab (Camera Calibration Toolbox). Kalibrace je provedena jen jednou pro daný typ kamery a objektivu a není ji potřeba provádět na začátku každého měření.

## Sestavení měřicího systému a vnější parametry kamer

Po autokalibraci kamer je potřeba sestavit měřicí systém, dle možností uvedených v kapitole 2.1. Pokud se jedná o uspořádání s úhlovým natočením, kamery je potřeba zaostřit v souladu s Scheimpflugovou podmínkou. Zorná pole kamer by se měla nejlépe překrývat, jak je znázorněno na obr. 11. Vnější parametry každé kamery jsou určeny vzdáleností  $t$  ohniska objektivu od středu objektového souřadného systému a natočením objektivu  $R$  v objektovém souřadném systému.

K určení natočení kamery je vhodné vytvořit měřicí systém se stupnicí na nepohyblivé základně držáku kamery a ukazateli umístěném na druhé otočné části, kde je upevněn objektiv kamery. Většina komerčních firem, které se zabývají měřicí technikou pro metodu Stereo PIV, prodává společně s kamerami speciální držák, který dovoluje natáčení kamer a jejich objektivů vůči tělu kamery (viz Scheimpflugova podmínka). Součástí držáku je většinou i stupnice ukazující úhly  $\alpha$  a  $\theta$ . Pokud je úhel  $\beta$  nulový, je natočení kamery v objektovém souřadném systému určeno úhlem  $\theta$ , tedy natočením objektivu. Úhel  $\alpha$  má vliv pouze na jmenovité zvětšení  $M_j$  a s tím spojené perspektivní zkreslení. Informace o proudění se tímto úhlem nemění.

Zbývajícím hledaným parametrem je vzdálenost ohniska kamery od objektové roviny. To může být v praxi problematické, jelikož nemusí být určeno výrobcem, k jakému bodu soustavy čoček objektivu je udávána ohnisková vzdálenost vztažena. Autor práce provedl experiment, ze kterého bylo možné zjistit pozici ohniska vůči tělu objektivu.

Kolimovaný laserový svazek byl, skrz daný objektiv zaostřený na nekonečno, zobrazován na stínítku. Posunem stínítka byla zjištěna pozice ohniska.

*Pokud není známa relativní pozice ohniska objektivu vůči jeho tělu, je možné určit ji experimentálně.*

## Projekční matice kamer a trojrozměrná rekonstrukce

Ze získaných vnitřních a vnějších parametrů je sestavena projekční matice příslušné kamery. Stejně tak je určena projekční matice druhé z kamer měřicího systému. Následně je možné provést samotné měření. Vyhodnocení záznamů sytících částic v měřené oblasti je provedeno klasickým způsobem pro 2D PIV, uvedeným v kapitole 1.3. Výsledkem jsou dvě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění: první odpovídající záznamům z kamery 1 a druhá záznamům z kamery 2. Mapy definují charakter proudění v časovém intervalu mezi pulsy laseru v čase  $t$  a  $t + \Delta t$ . Sjednocení vektorových map by se mělo, co do jeho tvaru, přibližovat obrazci znázorněného na obr. 11. Tak je možné dosáhnout největšího prostorového rozlišení, jelikož k trojrozměrné rekonstrukci je využita oblast odpovídající průniku vektorových map (společnému zornému poli kamer). Každý vektor v této oblasti je přiřazen k takovému vektoru druhé vektorové mapy, který je přibližně ve stejné pozici v měřené oblasti. Vektory jsou definovány počátečním bodem (střed vyhodnocované oblasti) a koncovým bodem v obrazové rovině. Triangulací (kapitola 2.2.2) odpovídajících bodů je vypočten trojrozměrný vektor rychlosti proudění v dané vyhodnocované oblasti. Stejný postup je proveden pro každou dvojici vektorů z průniku dvojrozměrných vektorových map.

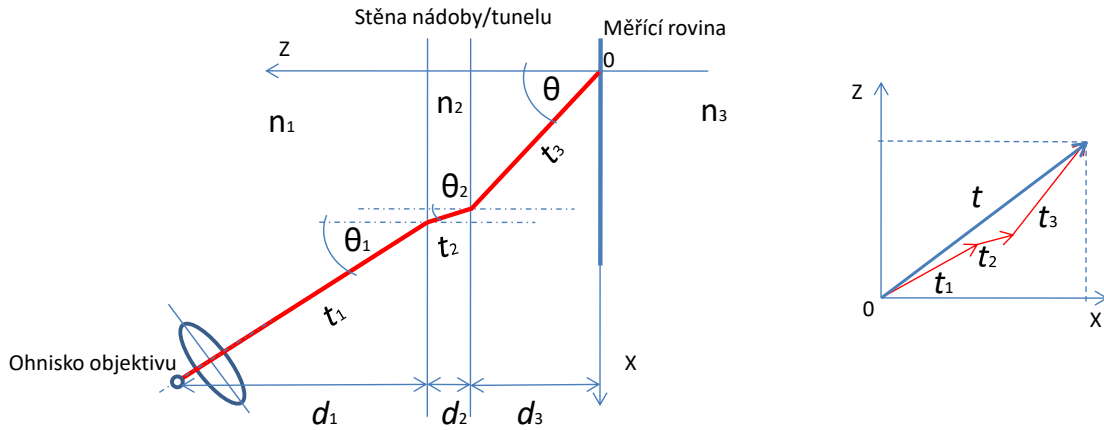
Je třeba připomenout, že rekonstrukce na základě perspektivní kamery je rekonstrukce z projektivního prostoru do euklidovského. Taková rekonstrukce se liší od metrické koeficientem změny měřítka  $\mu$ .

## Úprava vnějších parametrů kamer pro přechod mezi odlišnými rozhraními

Pokud se jedná o experiment, kdy měřená oblast je umístěná v tekutině jiné, než je tekutina, ve které jsou umístěny kamery, je vhodné upravit vnější parametry na základě



Snellových zákonů. Obecný případ je znázorněn na obr. 28, a to v rovině XZ objektového souřadného systému. Měřená oblast je tvořena a obklopena tekutinou o indexu lomu  $n_3$ , která je v nádobě z materiálu o indexu lomu  $n_2$ . Kamery jsou v prostředí o indexu lomu  $n_1$  (na obr.  $n_1 < n_3 < n_2$  vzduch-sklo-voda).



Obr. 28: Změna vnějších parametrů kamery v případě rozdílných prostředí měřené oblasti a pracovního prostoru kamer

Vyjádřením jednotlivých úhlů dle Snellova zákona a jednoduchými úpravami lze vyjádřit pozorovací úhel  $\theta$  kamery:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\sin \theta_1 \frac{n_1}{n_3}\right). \quad (44)$$

Vektor  $t$  udávající polohu ohniska kamery v objektovém souřadném systému lze získat ze vztahu:

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} d_3 \tan \theta + d_2 \tan \theta_2 + d_1 \tan \theta_1 \\ 0 \\ d_1 + d_2 + d_3 \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Vzdálenost  $d_3$  mezi vnitřní stranou stěny nádoby a měřící rovinou lze kromě ručního měření získat následujícím postupem. Kameru umístíme na traverzér dovolující pohyb podél osy Z objektového souřadného systému. Nastavíme nejlépe co nejmenší hloubku ostrosti kamery a zaostříme ji na osvětlenou měřící rovinu. Poté posunem kamery

zaostříme na stěnu nádoby (nebo přiložený papír či destičku). Z uražené vzdálenosti kamery na traverzěru lze určit  $d_3$ .

## Popis vytvořených algoritmů

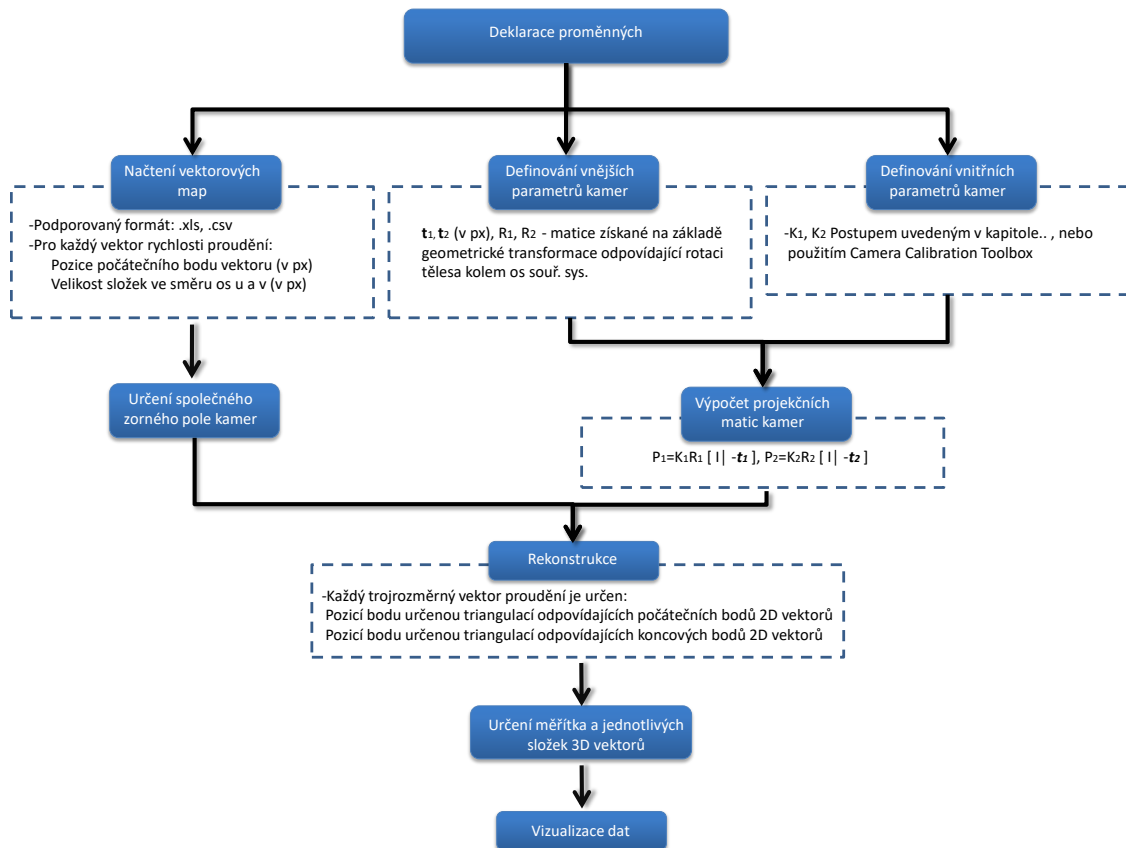
Autor disertační práce, vytvořil algoritmy pro trojrozměrnou rekonstrukci na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer v programovém prostředí Matlab R2014. V této kapitole jsou popsány hlavní body algoritmů vývojovým diagramem znázorněným na obr. 29. Výpočet dvojrozměrných vektorových map ze záznamů sytících částic není součástí algoritmů. Veškeré algoritmy jsou umístěny do Přílohy A.

Hlavním algoritmem rekonstrukce, propojujícím ostatní algoritmy, je soubor s názvem: *RekonstrukceBezKalibrObrazce.m*. Vstupními daty algoritmu je dvojrozměrná vektorová mapa odpovídající záznamům sytících částic z kamery 1. a vektorová mapa odpovídající záznamům z kamery 2. Pokud uživatel chce provést rekonstrukci z více vektorových map (vektorovou statistiku) je možné využít modifikaci hlavního algoritmu k tomu určenou (složka *RekonstrukceZViceVM*). Vektorové mapy musí být umístěné do stejné složky s algoritmem. Podporovanými formáty vektorových map jsou: .xls, .csv. Podrobné informace o formátu těchto vektorových map jsou uvedeny v záhlaví daného algoritmu.

Vstupními parametry hlavního algoritmu je dále délka měřené oblasti a vnitřní a vnější parametry kamer: velikost pixelu, vzdálenost ohniska kamery od středu objektového souřadného systému, ohniskové vzdálenosti, pozorovací úhly, principiální body kamer a koeficient změny měřítka.

Výsledek rekonstrukce je vždy možné validovat a vizualizovat v několika podobách. Následně exportovat ve formě grafů nebo tabulkových souborů (.xls, .csv). Algoritmus obsahuje možnost exportovat výsledky ve formátu podporovaným softwarem Tecplot 360.

Výpočetní čas rekonstrukce pro jeden pár vektorových map: cca 12 s (testováno na PC: Intel Core i5 6200U, 8 GB RAM).



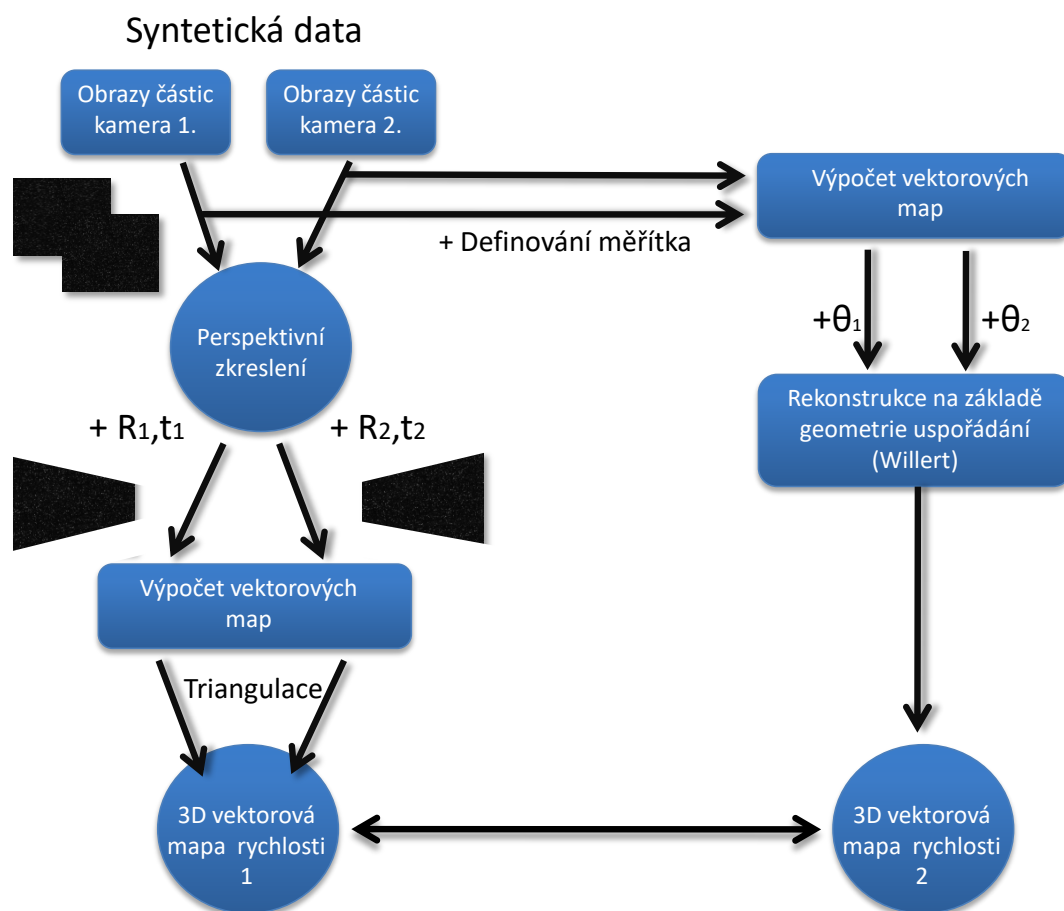
Obr. 29: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer

### Verifikace metodiky (syntetická data)

Navrženou metodiku bylo nutné ověřit na uměle vytvořeném experimentu, u kterého bylo známo, jakých výsledků by měl dosáhnout na základě teorie uvedené v kapitole 2.2.1. Proces verifikace je znázorněn na obr. 30.

Prvním krokem bylo vygenerovat záznamy obrazů sytících částic (dále jen obrazy částic) v pomyslné měřené oblasti. Obrazy byly vygenerovány v aplikaci PIVlab 1.41 spustitelné v programovém prostředí Matlab. Aplikace dovoluje nastavit parametry: velikost obrazu, průměr částic (v px), počet částic na vyhodnocovanou oblast, posunutí částic mezi obrazy, aditivní šum nebo například tloušťku laserového řezu. Průměrné posunutí částic bylo zvoleno stejné pro obrazy odpovídající kameře 1 a 2, avšak s opačným směrem. Na vygenerované obrazy částic bylo aplikováno perspektivní zkreslení k simulaci záznamu částic kamerami v uspořádání s úhlovým natočením, pod pozorovacími úhly (zvoleno  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ) a pro pozice

kamer symetrické k pomyslné měřené oblasti, tedy  $t_1 = -t_2$ . Zkreslení bylo určeno pro tyto vnější parametry kamer na základě experimentů (s využitím posuvného kalibračního terčíku zaznamenaného v pěti polohách a polynomického modelu třetího řádu pro kalibraci, chyba  $\vartheta_B < 0.1 px$ ). Ze zkreslených obrazů částic byla vypočtena dvojice vektorových map (odpovídající kameře 1 a 2). K výpočtu vektorových map existuje několik komerčních i volně přístupných softwarů (PIVlab). Vektorové mapy použité pro tuto verifikaci byly vypočteny v DynamicStuidu. Z vektorových map byla postupem uvedeným v předcházející kapitole rekonstruována trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění.



Obr. 30: Proces verifikace navržené metodiky

Výsledná mapa (obr. 31) byla porovnána s trojrozměrnou vektorovou mapou získanou výpočtem na základě geometrie uspořádání (obr. 32), vztahy (13), (14), (15), kde bylo potřeba dosadit pozorovací úhly kamer a definovat měřítko v obrazech (náhodně zvoleno a pro oba obrazy shodné). Výpočet byl proveden v programovém prostředí Matlab.

Je nutné při porovnání výsledků brát v potaz fakt, že rekonstrukce na základě perspektivní kamery je rekonstrukce z projektivního prostoru do euklidovského. Taková rekonstrukce se liší od metrické (v tomto případě od rekonstrukce na základě geometrie kamer), jak již bylo uvedeno koeficientem změny měřítka  $\mu$ . Trojrozměrné vektorové mapy se poté od sebe lišily uvedeným koeficientem a hledanou chybou v rekonstrukci. Změnu měřítka  $\mu$  bylo možné stanovit jako podíl průměrné hodnoty složky vektoru rychlosti proudění podél osy  $Z$ , získané rekonstrukcí na základě geometrie a průměrné hodnoty složky vektoru rychlosti proudění podél osy  $Z$ , získané rekonstrukcí navrženou.

*Parametry syntetických obrazů částic:*

Průměrné posunutí částic – v obrazech pro kameru 1: 10 px podél osy  $u$ , pro kamera 2:

-10 px podél osy  $u$

Průměrný počet částic na VO (32x32px) – 10

Průměr částic - 2.5 px

Tloušťka laserového řezu – 1 mm

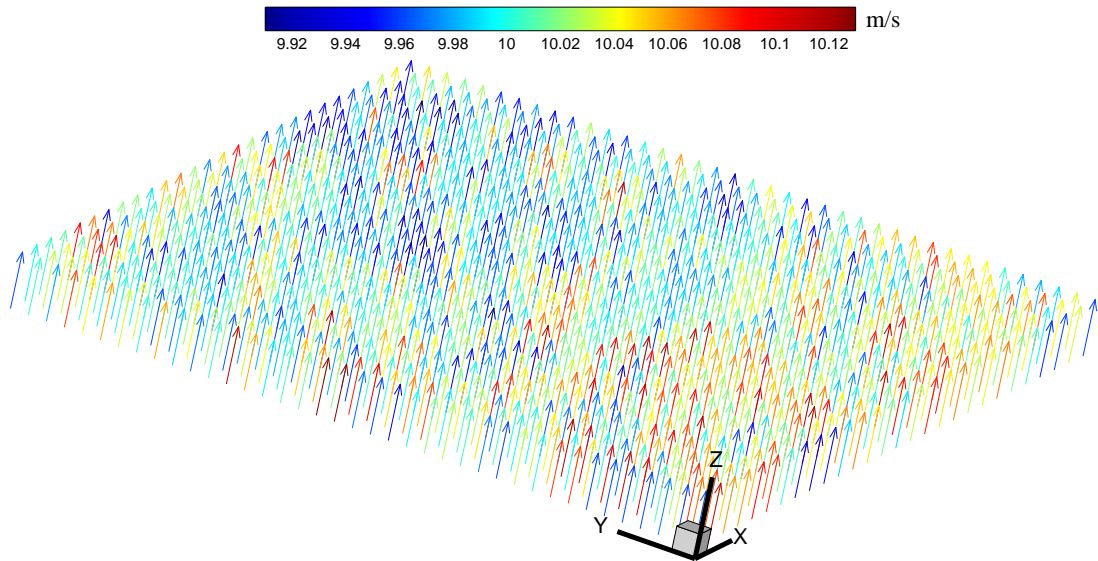
Aditivní šum – 0%

*Simulace perspektivního zkreslení pro uspořádání kamer –*

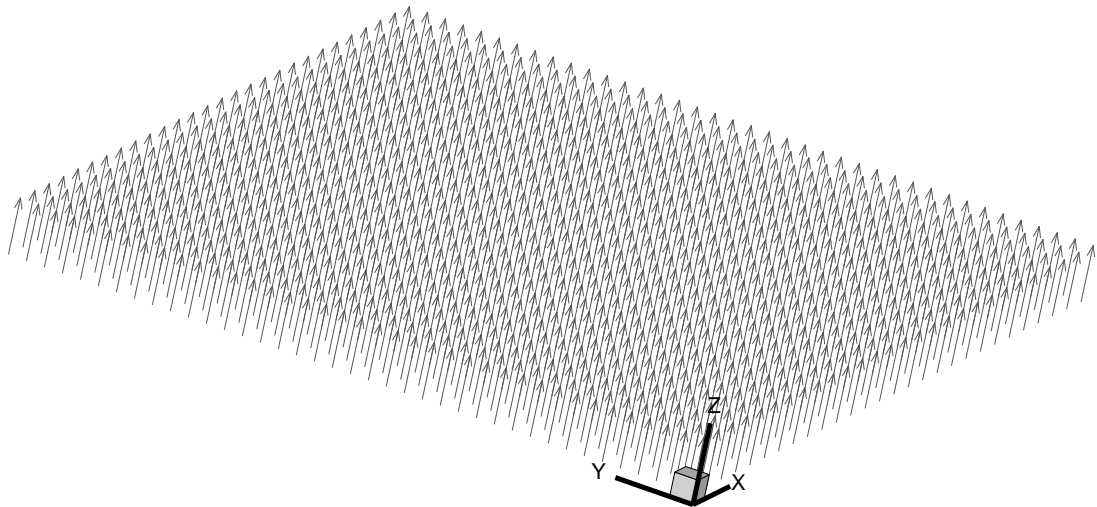
$$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ, \alpha_1 = \alpha_2, \mathbf{t}_1 = -\mathbf{t}_2$$

*Parametry pro výpočet vektorových map (DynamicStudio) –*

Adaptivní korelace, bez okenních funkcí a překrývání. Chyba v určení posunutí částic pomocí adaptivní korelace a zvolených parametrů obrazů částic: +/-0.05 px (viz [35]). Tato chyba je pro obě rekonstrukce shodná a jejich vliv na verifikaci metodiky se vyruší.



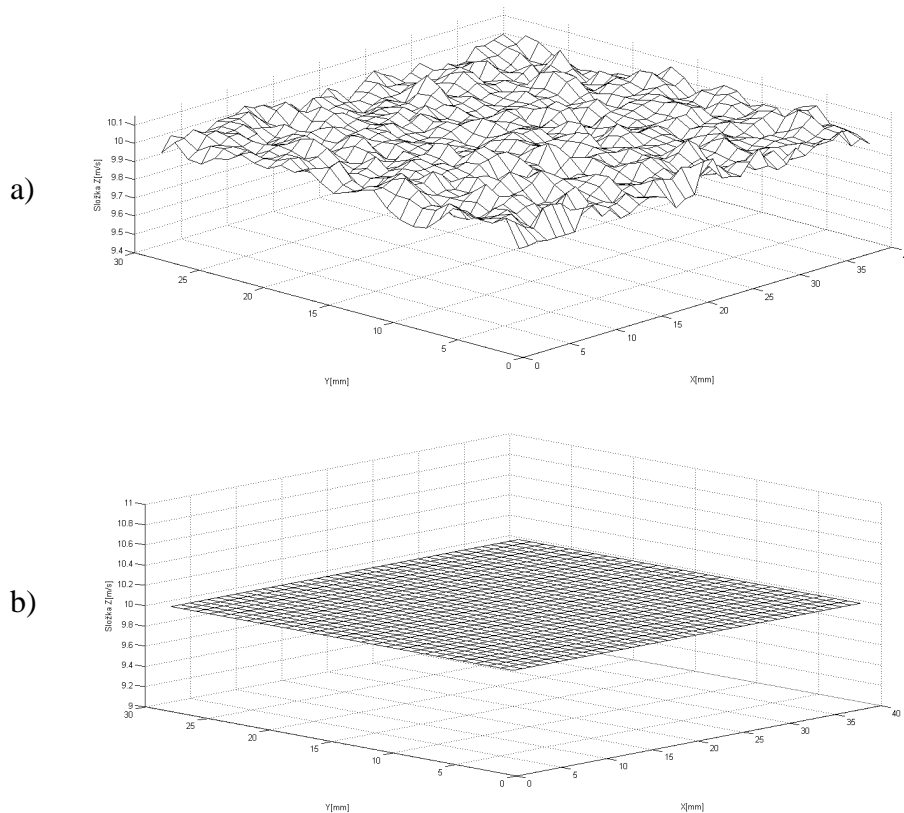
Obr. 31: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data zrekonstruovaná navrženou metodikou



Obr. 32: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data získaná Willertovou metodou

Na obr. 31 je znázorněna trojrozměrná mapa rekonstruovaná navrženou metodikou (pro úhly  $\theta_1, \theta_2 = 45^\circ$ ). Vektory jsou téměř kolmé na pomyslnou měřicí rovinu (složky vektoru rychlosti ve smyslu osy  $X$  a  $Y$  objektového souřadného systému jsou téměř

nulové). Dle rekonstrukce na základě geometrie uspořádání by mělo pro všechny vektory vektorové mapy platit: složka  $Z = 10\text{m/s}$ , složka  $Y = 0$ , složka  $X = 0$  (obr. 32). Na obr. 33 je detailněji možné rozlišit rozdíl mezi výsledky navržené rekonstrukce a předpokládanými hodnotami. Porovnáním rekonstrukcí je vyjádřena chyba  $\sigma_{\Delta Z}$  v určení složky vektoru rychlosti ve směru osy  $Z$  a na základě vztahu (41) jsou odvozeny chyby  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  v určení ostatních složek.



Obr. 33: Složka  $Z$  vektorů rychlosti proudění pro: a) vektorovou mapu získanou navrženou metodikou, b) vektorovou mapu získanou Willertovou metodou

Tabulka 1: Chyba v trojrozměrné rekonstrukci navržené metodiky

Pozorovací úhel kamer $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ [°]	Chyba ve složce vektoru rychlosti ve směru osy $Z$	Chyba ve složce vektoru rychlosti ve směru osy $X, Y$
	$\sigma_{\Delta Z}$ [%]	$\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}$ [%]
45	1,365	1,365
40	2,125	1,783
35	2,936	2,056
30	3,764	2,173
25	4,535	2,115

Chyba v trojrozměrné rekonstrukci odpovídá určení pozorovacích úhlů a pozice kamer se standardní přesností měřidla 0,5 dílku, tedy  $0,5^\circ$  pro úhel a 0,5 mm [36].

Tabulka 1. platí i pro případ, kdy měřená oblast je umístěná v tekutině jiné, než je pracovní prostor kamer. Je však potřeba upravit pozorovací úhly kamer dle vztahu (44).

*Verifikace navržené metodiky byla provedena pro pozorovací úhly kamer  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ . Výsledky rekonstrukce provedené navrženou metodikou byly porovnány s výsledky rekonstrukce na základě geometrie uspořádání. Pro daný rozsah pozorovacích úhlů byla nepřesnost navržené metodiky do 5 %, ve všech složkách vektorů rychlosti proudění. Takový výsledek se dá považovat za velmi dobrý z pohledu experimentální praxe. Pro pozorovací úhly  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  je chyba v rekonstrukci nejmenší. Se zmenšujícími se pozorovacími úhly se chyba zvětšuje přibližně s lineárním charakterem pro složku vektoru rychlosti kolmou na měřící rovinu a přibližně s logaritmickým charakterem pro složky  $X$  a  $Y$ .*

## Experimentální ověření

Navržená metodika byla ověřena také experimentálně. Ověřením je myšlena použitelnost navržené metodiky v praxi a porovnání výsledků s komerčním softwarem. V následující kapitole jsou popsány jednotlivé experimenty, včetně uspořádání měřicího systému a vybraných výsledků experimentu. Fotografie a veškeré výsledky experimentů jsou vloženy do Přílohy A.

## Experimentální výzkum proudění za Glauert–Goldschmied profilem

Výzkum probíhal v průběhu autorovy stáže v Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR. Glauert-Goldschmied profil (obr. 34) je využíván pro testování řízení aktivního toku (Active Flow Control), jak experimentálně, tak numerickou simulací. Cílem byl výzkum mezní vrstvy kolem profilu, především tzv. bodu oddělení a sjednocení (separation point, re-attachement point). Dochází-li k separaci proudění za profilem, vytváří se prostor (separation bubble, separation zone) pro zpětné proudění, který zvyšuje tlakový odpor. Z tohoto důvodu je žádoucí redukovat taková místa pomocí



aktivních metod (synthetic jet, plasma actuator). Autor disertační práce na tomto měření mohl ověřit svoji navrženou metodiku.

#### *Použité komponenty a uspořádání měřicího systému*

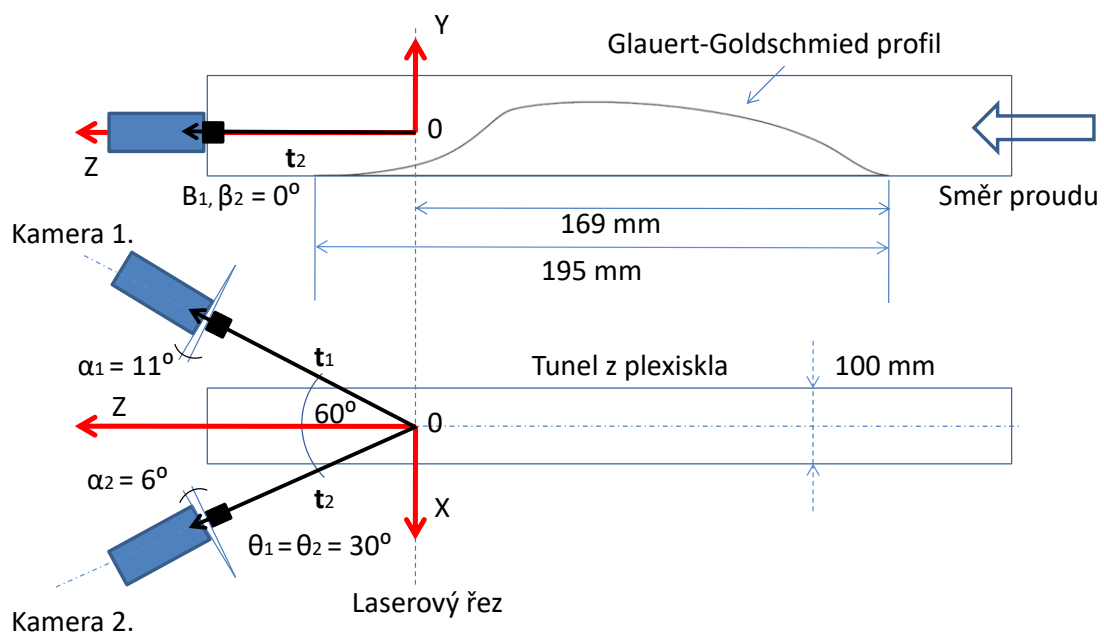
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Wave Pegasus Nd: YLF, 527 nm. Maximální frekvence 10 kHz. Energie jednoho pulsu 10 mJ, pro frekvenci 1kHz (tedy 10W na jednu dutinu laseru).

Snímací technika: CMOS kamery NanoSense MKIII, maximální snímkovací frekvence 512 Hz (pro jednotlivou expozici) pro rozlišení kamery 1280 x 1024 px. Objektivy kamer Nikkor 60 mm.

Sytící částice: olejové částice o průměru 1 $\mu$ m z generátoru mlhy značky Safex.

Velikost společného zorného pole kamer (měřená oblast): 7 x 4,5 cm.

Rychlost proudění vzduchu (měřeno za vstupem do tunelu): 5 m/s.

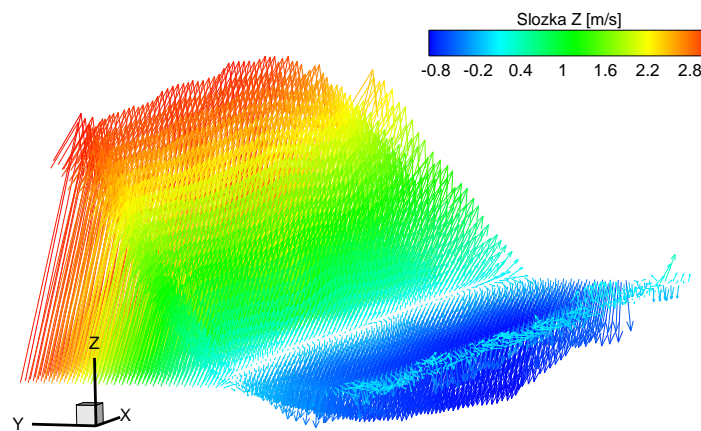


*Obr. 34: Uspořádání měřicího systému*

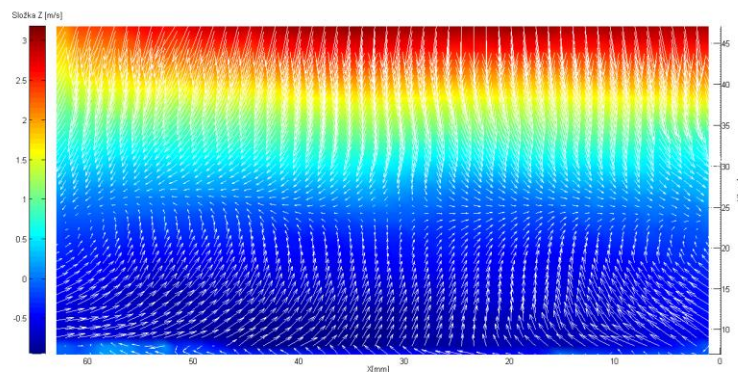
#### *Výsledky experimentu*

Na obr. 36 je znázorněn jeden z výsledků experimentu navrženou metodikou ve formě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění (definovanou složkami X, Y), včetně

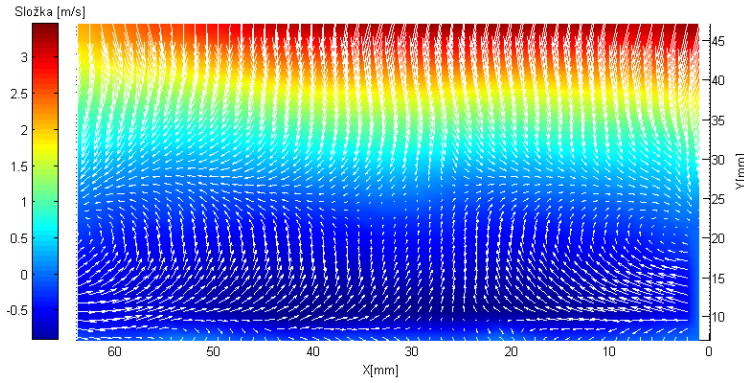
skalární mapy na pozadí, odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění. Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění je vyobrazena na obr. 35. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 300 vektorových map. Změna měřítka  $\mu$  byla zjištěna měřením metodou 2D PIV, které předcházelo popsanému experimentu. K ověření metodiky bylo provedeno měření klasickým způsobem s využitím posuvného kalibračního terčíku a rekonstrukcí provedenou dostupným komerčním softwarem DynamicStudio (obr. 37).



Obr. 35: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)



Obr. 36: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)



Obr. 37: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (klasická metoda s kalibračním terčíkem, DynamicStudio)

Výsledky experimentu provedeného navrženou metodikou se liší od klasického postupu s využitím kalibračního terčíku a komerčního softwaru (DynamicStudia) následovně:

Rozptyl [36] jednotlivých složek vektorů rychlosti proudění:

$$\rho_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } X_{DS_{i,j}} - \text{Složka } X_{NM_{i,j}})^2 = 0,005 \text{ ms}^{-1}, \quad (46)$$

$$\rho_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } Y_{DS_{i,j}} - \text{Složka } Y_{NM_{i,j}})^2 = 0,015 \text{ ms}^{-1}, \quad (47)$$

$$\rho_Z^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } Z_{DS_{i,j}} - \text{Složka } Z_{NM_{i,j}})^2 = 0,115 \text{ ms}^{-1}, \quad (48)$$

kde  $n$  je počet vektorů vektorové mapy, složka vektoru rychlosti s indexem DS je získána DynamicStudiem, složka vektoru rychlosti s indexem NM odpovídá výpočtu navrženou metodikou. Jednotlivé složky nabývaly hodnot v porovnání s komerčním softwarem:

$$\text{Složka } X_{NM} = \text{Složka } X_{DS} \pm 0,005 \text{ ms}^{-1}, \quad (49)$$

$$\text{Složka } Y_{NM} = \text{Složka } Y_{DS} \pm 0,015 \text{ ms}^{-1}, \quad (50)$$

$$\text{Složka } Z_{NM} = \text{Složka } Z_{DS} \pm 0,115 \text{ ms}^{-1}. \quad (51)$$

Procentuálně byla průměrná odchylka pro složku Z rovna 6,326 %, pro složku X rovna 4,002 % a pro složku Y rovna 4,010 %.

*Výsledky navržené metodiky se liší od výsledků dostupného komerčního softwaru průměrně kolem 5 %. Podle verifikace navržené metodiky by měla být chyba pro tyto pozorovací úhly přibližně poloviční. Komerční systém je ale také zatížen nejistotou měření. Odchylka oproti verifikaci je dále ovlivněna přesností v určení vnějších parametrů kamer. Rekonstrukce je velice citlivá na nepřesnosti v těchto parametrech. Možnost rekonstrukce navrženou metodikou je však stále oproti 5 % odchylce značným přínosem, jelikož bez této metodiky by nebylo možné vůbec provést měření s naprostou většinou dostupných postupů.*

## Experimentální výzkum proudění uvnitř nádoby s magnetickým míchadlem

Experiment byl vytvořen záměrně pro ověření použitelnosti a správnosti navržené metodiky. Výzkum probíhal uvnitř skleněné nádoby s destilovanou vodou a magnetickým míchadlem rotujícím definovanými otáčkami. Vnější parametry kamer byly upraveny na základě vztahů (44) a (45). Pozice ohniska objektivů kamer byla určena experimentálně. Uspořádání měřicího systému je znázorněno na obr. 38.

### *Použité komponenty a uspořádání měřicího systému*

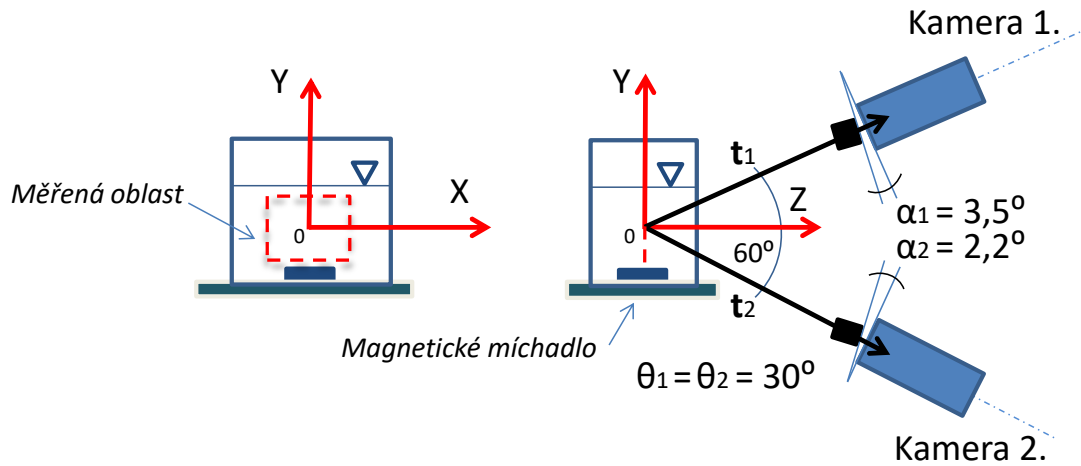
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Wave Gemini Nd: YAG, 532 nm. Použitá frekvence pulsů 1 kHz.

Snímací technika: Dantec HiSense, 12 bitový jasový rozsah, rozlišení kamery 1280 x 1024 px. Objektivy kamer Nikkor 60 mm.

Sytící částice: fluorescentní částice o průměru 20 $\mu$ m pokryté Rhodaminem B. Při osvětlení částic použitým laserem emitují záření oranžové barvy (570 nm).

Velikost společného zorného pole kamer (měřená oblast): 6,5 x 8,0 cm.

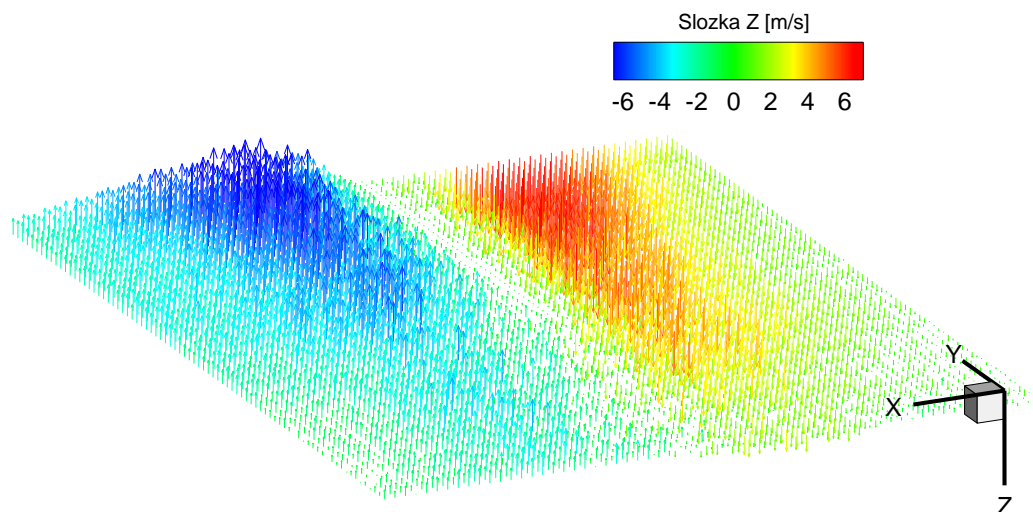
Rychlost otáčení míchadla: 300 ot/min.



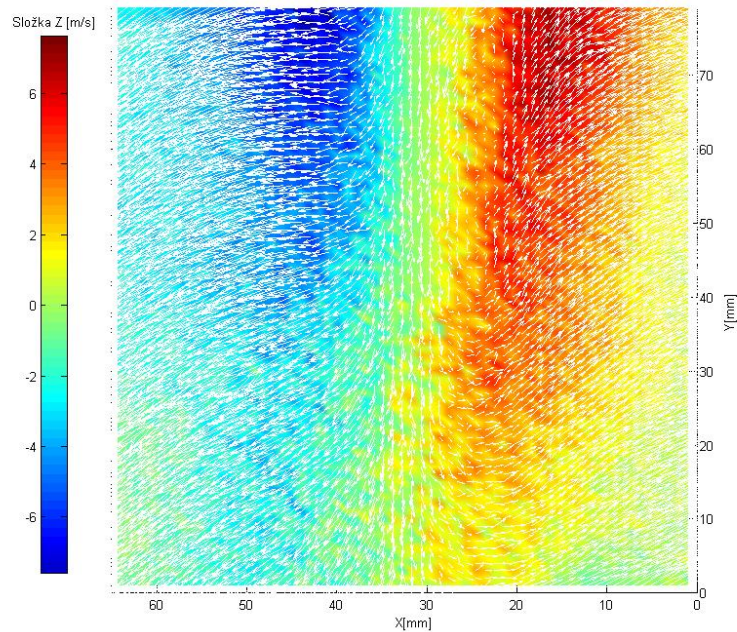
Obr. 38: Uspořádání měřicího systému

### Výsledky experimentu

Na obr. 39 je znázorněn jeden z výsledků experimentu navrženou metodikou ve formě trojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění. Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definována složkami  $X$ ,  $Y$ ), včetně skalární mapy na pozadí, odpovídající složce  $Z$  vektorů rychlosti proudění, je pak vyobrazena na obr. 40. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 200 vektorových map. Změna měřítka  $\mu$  byla zjištěna měřením metodou 2D PIV, které předcházelo experimentu.



Obr. 39: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: pro rychlost otáčení míchadla 300 ot/min (navržená metodika)



Obr. 40: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami  $X$ ,  $Y$ ) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce  $Z$  vektorů rychlosti proudění: pro rychlost otáčení míchadla 300 ot/min (navržená metodika)

Experiment zkoumající proudění uvnitř nádoby s magnetickým míchadlem byl vytvořen záměrně pro ověření použitelnosti a správnosti navržené metodiky. Vybrané výsledky měření metodikou jsou znázorněny na obr. 39 a 40. Výsledky byly porovnány s měřením konvenčním 2D PIV, které probíhalo v rovině určené osami  $X$ ,  $Y$  ve stejné měřené oblasti (vyhodnocení naměřených dat v *DynamicStuidu*). Bylo tedy možné porovnat složky  $X$  a  $Y$  trojrozměrné vektorové mapy s tímto měřením. Složky se v průměru lišily přibližně o 5%, což se v rámci experimentální praxe dá považovat za dobrý výsledek. Mimo uvedené experimentů byla metodika použita pro experimentální výzkum proudění za nakloněnou deskou [45]. Navrženou metodiku lze považovat za ověřenou experimentálním měřením.

## 3.2 Měření bez možnosti pohybu s kalibračním terčíkem

### 3.2.1 Analýza problematiky a možné postupy

V současné době je standardní postup kalibrace stereo-snímání založen na záznamu kalibračních terčků v několika polohách podél osy  $Z$  objektového souřadného systému. Tento postup je také vyžadován dostupnými komerčními měřicími systémy pro měření metodou Stereo PIV, jako například od společností Dantec Dynamics, LaVision nebo TSI. Jak však postupovat v případě, kdy není možné pohybovat s kalibračním terčíkem uvnitř zkoumané oblasti?

Ke komplikacím dochází většinou v uzavřených prostorech nádob či tunelů, kde je mnohdy velice náročné zařídit precizní posun terčiku (v jednotkách milimetrů). Možnosti jsou následující:

- Použití víceúrovňového nebo dvouvrstvého chromatického terčiku (kapitola 2.3).
- Použití posuvného kalibračního terčiku, kde pohyb terčiku ve zkoumané oblasti je nahrazen pohybem kamer.
- Záznam posuvného kalibračního terčiku pouze v poloze  $Z = 0$ .
- Bez využití kalibračního obrazce: rekonstrukce na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer (kapitola 3.1.2) nebo geometrie uspořádání (kapitola 2.2.1)

Pokud není k dispozici víceúrovňový či dvouvrstvý chromatický terčík, nebo k tomu potřebná softwarová vyhodnocovací část, je možné nahradit pohyb posuvného terčiku pohybem kamer o stejný krok podél osy  $Z$  objektového souřadného systému. Pomyslný posun terčiku v kladném směru osy  $Z$  je nahrazen posunem kamer v záporném smyslu osy  $Z$  a opačně. Tento postup je možné použít v případě, kdy je optická dráha (ovlivněna například indexem lomu prostředí i materiálu nádoby, lokální křivostí povrchu nebo tloušťkou stěny), mezi kamerou a terčíkem, ekvivalentní optické dráze při klasickém postupu kalibrace posunem terčiku.

Mimo rekonstrukce na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer, nebo geometrie uspořádání je poslední možností zaznamenat posuvný terčík pouze v jedné poloze ( $Z = 0$ ). Nevýhodou je, že kalibrace stereo-snímání není provedena v celém rozsahu

definovaného tloušťkou laserového řezu a to může ovlivnit především výsledky ve složce vektoru rychlosti kolmé na řez. Postupy pro rekonstrukci trojrozměrné vektorové mapy ve zkoumané oblasti použitelné v takovém případě jsou dva. Rekonstrukce založená na projekčních maticích získaných ze známých umístění bodů v objektovém souřadném systému (kapitola 2.2.2) nebo rekonstrukce na základě polynomického modelu (kapitola 2.2.3). Hlavní předností polynomického modelu je to, že dokáže popsat nelineární jevy, jako je distorze obrazu způsobená pozorováním objektů, například skrze válcové sklo nebo zkreslení obrazu zapříčiněné nedokonalou optikou. Z tohoto důvodu je výhodnější použít polynomický model k rekonstrukci. Pokud je rekonstrukce provedena, jak s využitím polynomického modelu, tak geometrie uspořádání (konkrétně Willertovou metodou), je do jisté míry možné kompenzovat chybu zapříčiněnou kalibrací stereo-snímání pouze v jedné rovině v měřené oblasti.

### ***3.2.2 Metodika založená na polynomickém modelu a Willertově metodě***

Autor vytvořil metodiku pro měření bez nutnosti pohybu s posuvným terčíkem na základě rozboru z předcházející kapitoly. Proces vývoje metodiky je popsán v kapitole 3.1.2.

#### **Sestavení měřicího systému a umístění kalibračního terčíku**

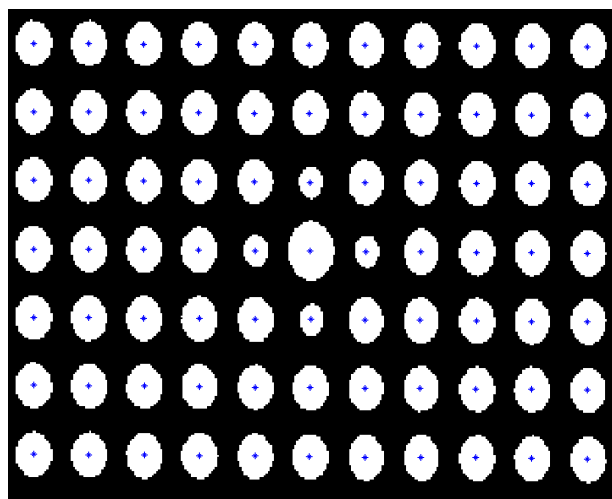
Prvním krokem po sestavení měřicího systému, dle možností uvedených v kapitole 2.1, je umístění posuvného kalibračního terčíku do měřicí roviny (do středu laserového řezu). Centrální bod a značky os terčíku definují objektový souřadný systém. Terčík je zaznamenán kamerami v této pozici a na základě polynomického modelu je provedena kalibrace stereo-snímání.

#### **Určení polynomických modelů kamer**

Polynomický model mapující body z objektového do obrazového souřadného systému kamery je popsán, včetně jeho výpočtu, v kapitole 2.2.3. K určení koeficientů modelu



(ve většině případů je postačující model třetího řádu) pro obě kamery použité při uspořádání je potřeba identifikovat pozice bodů terčíku (přesněji jejich středů) v pořízených záznamech. Příklad identifikace je znázorněn na obr. 41. Hledání bodů terčíku je založené na základních operacích počítačového zpracování obrazu. Segmentací prahováním obrazu a následným vytvořením negativního obrazu jsou získány jednotlivé body kalibračního terčíku. Střed každého bodu je pak definován jeho těžištěm (algoritmus identifikace bodů je vložen do přílohy A). Velký důraz je proto kladen na rovnoměrné nasvícení kalibračního terčíku při záznamu. Pokud tomu tak není, je nutné použít metod adaptivního prahování.



Obr. 41: Identifikace bodů kalibračního obrazce

Po kalibraci je terčík vyjmut z měřicí roviny a je možné provést měření. Záznamy sytících částic jsou následně „narovnány“ na základě získaných polynomických modelů a vyhodnoceny klasickým způsobem pro 2D PIV uvedeném v první kapitole. Výsledkem jsou dvě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění: první odpovídající záznamům z kamery 1 a druhá záznamům z kamery 2. Mapy definují charakter proudění v časovém intervalu mezi pulsy laseru v čase  $t$  a  $t + \Delta t$ .

### Společné zorné pole kamer a trojrozměrná rekonstrukce

Před samotnou trojrozměrnou rekonstrukcí je nutné určení společného zorného pole kamer. K tomu je možné využít „narovnané“ obrazy kalibračního terčíku zaznamenané

kamerou 1, 2 a jejich vzájemné porovnání. Určení zorného pole kamer je podrobněji vysvětleno v kapitole 4.2.

Posledním krokem navržené metodiky je získat trojrozměrnou informaci o proudění z dvojrozměrných vektorových map. Každý vektor ve společném zorném poli kamer z první vektorové mapy je přiřazen k takovému vektoru druhé mapy, který je ve stejné pozici v měřené oblasti (je tedy určeno  $\Delta X_{1N}, \Delta X_{2N}, \Delta Y_{1N}, \Delta Y_{2N}$  pro každou dvojici vektorů, viz kapitola 2.2.1). Složky odpovídajícího trojrozměrného vektoru rychlosti proudění jsou poté získány ze vztahů (13), (14), (15). Pozice počátečního bodu trojrozměrného vektoru v objektovém souřadném systému je definována pozicí počátečních bodů narovnaných 2D vektorů. K výpočtu je kromě posunutí potřeba znát pozorovací úhly kamer  $\theta_1, \theta_2$  a  $\beta_1, \beta_2$ . Pokud se jedná o experiment, kdy měřená oblast je umístěná v tekutině jiné, než je tekutina, ve které jsou umístěny kamery, je vhodné upravit pozorovací úhly postupem uvedeným v kapitole 3.1.2.

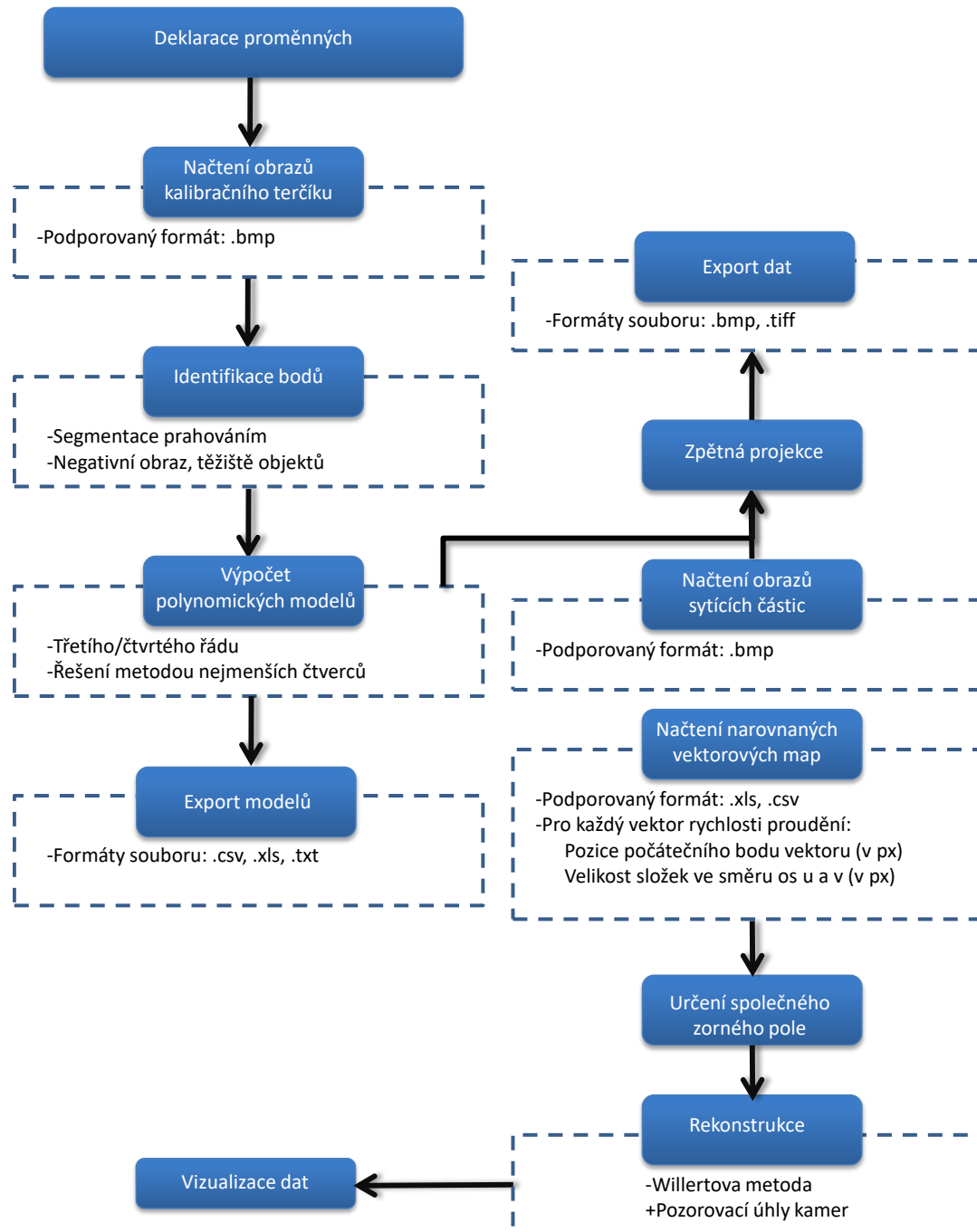
## Popis vytvořených algoritmů

Autor disertační práce, vytvořil algoritmy pro trojrozměrnou rekonstrukci na základě polynomickeho modelu a Willertovy metody v programovém prostředí Matlab R2014. V této kapitole jsou popsány hlavní body algoritmů vývojovým diagramem znázorněným na obr. 42. Veškeré algoritmy jsou umístěny do Přílohy A.

Hlavním algoritmem rekonstrukce, propojujícím ostatní algoritmy, je soubor s názvem: *RekonstrukcePolynomWillert.m*. Vstupními daty algoritmu jsou: pozorovací úhly kamer, „narovnaná“ dvojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění odpovídající záznamům sytících částic z kamery 1. a „narovnaná“ vektorová mapa odpovídající záznamům z kamery 2. Pokud uživatel chce provést rekonstrukci z více vektorových map (vektorovou statistiku) je možné využít modifikaci hlavního algoritmu k tomu určenou (složka *RekonstrukceZViceVM*). Vektorové mapy musí být umístěné do stejné složky s algoritmem. Podporovanými formáty vektorových map jsou: .xls, .csv. Podrobné informace o formátu těchto vektorových map jsou uvedeny v záhlaví daného algoritmu.

Výsledek rekonstrukce je vždy možné validovat a vizualizovat v několika podobách. Následně exportovat ve formě grafů nebo tabulkových souborů (.xls, .csv). Algoritmus obsahuje možnost exportovat výsledky ve formátu podporovaným softwarem Tecplot 360.

Výpočetní čas rekonstrukce pro jeden pár vektorových map: cca 10 s (testováno na PC: Intel Core i5 - 6200, 8 GB RAM).



Obr. 42: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě polynomičeského modelu a Willertovy metody

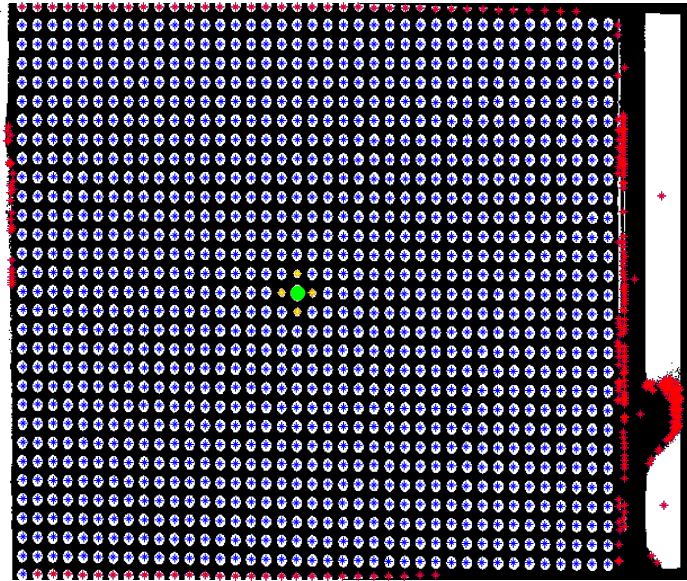
### *Možnost zpětné projekce zaznamenaných obrazů částic*

Pro případ, kdy nejsou k dispozici „narovnané“ vektorové mapy a nejsou známy parametry stereo-snímání, je možné využít algoritmus: *NarovnaniObrazuCastic.m*. Algoritmus provede zpětnou projekci obrazů částic zaznamenaných jednotlivými kamerami a následně exportuje „narovnané obrazy“, ze kterých lze vypočítat „narovnané“ vektorové mapy (výpočet vektorových map není součástí algoritmu). Zpětná projekce je provedena na základě polynomického modelu. Uživatel může zvolit třetí nebo čtvrtý řád polynomu. Ke kontrole výpočtu modelu je vyčíslena chyba v proložení bodů terčíku vypočteným modelem s možností zpětné projekce záznamů terčíku v pozici  $Z=0$ . Polynomické modely lze také exportovat a provést „narovnání“ v jiném softwaru (např. DynamicStudios). Vstupními daty algoritmu jsou:  $N \times$  záznam sytících částic odpovídajících kameře 1.,  $N \times$  záznam sytících částic odpovídajících kameře 2. (podporovaný formát záznamů je .bmp, v hodnotách šedi), souřadnice bodů kalibračního terčíku v jeho záznamech (v obrazovém souřadném systému) a souřadnice jejich korespondencí v objektovém souřadném systému. Záznamy částic musí být umístěny do stejné složky s algoritmem.

### *Identifikace bodů terčíku*

Souřadnice bodů lze zadat ručně, nebo využít algoritmus pro identifikaci bodů terčíku (*IdentifikaceBoduKalibracnihoObrazce.m*), který nalezne tyto souřadnice a uloží do souboru. Vstupními daty algoritmu identifikace jsou: záznam terčíku v pozici  $Z=0$  odpovídající kameře 1. a kameře 2., velikosti bodů terčíku a jejich vzdálenost od sebe. Podporovaný formát záznamu je .bmp, v hodnotách šedi. Záznamy je nutné umístit do stejné složky s algoritmem.

Na obr. 43 je znázorněn vzorový příklad identifikace bodů v záznamu terčíku. Algoritmus nalezne všechny objekty/body v obraze. Modře zbarvené křížky označují středy hlavních bodů, žluté označují středy značek os a zelenou barvou je označen nulový bod. Ostatní objekty nevyhovující nastaveným kritériím jsou označeny červeně.

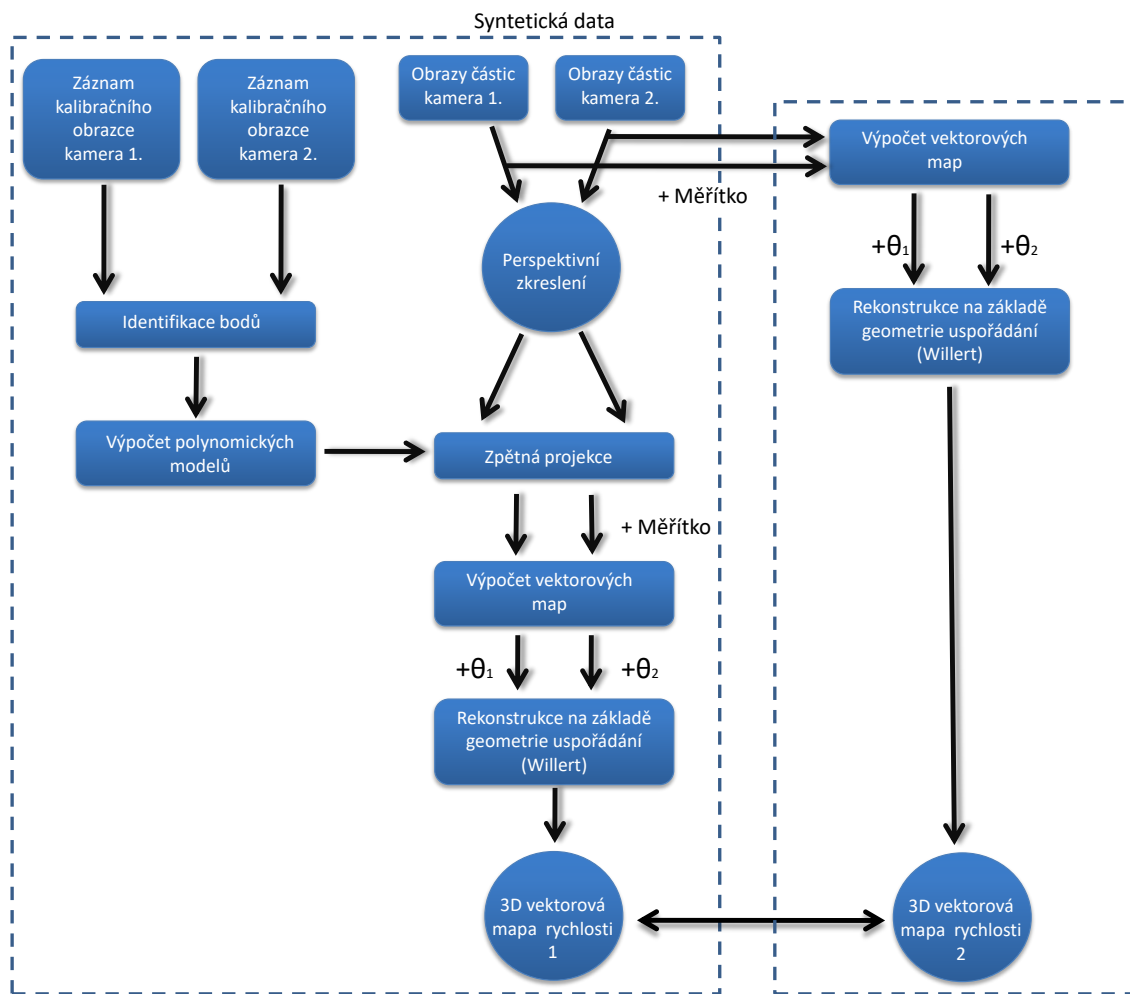


Obr. 43: Příklad identifikace bodů v záznamu kalibračního terčíku

Mezi nastavitelné parametry algoritmu identifikace patří: hodnota prahu pro segmentaci obrazu, orientace os  $X$  a  $Y$  objektového souřadného systému v záznamech kamer, koeficienty velikosti bodů terčíku v záznamech.

### Verifikace metodiky

Navrženou metodiku bylo, stejně jako v předcházejícím případě, nutné ověřit na uměle vytvořených vstupních datech experimentu. Proces verifikace je znázorněn na obr. 44. Obrazy částic byly vygenerovány v aplikaci PIVlab 1.41. Průměrné posunutí částic bylo zvoleno stejné pro obrazy odpovídající kameře 1 (levá) a 2, avšak s opačným směrem. Na vygenerované obrazy částic bylo aplikováno perspektivní zkreslení k simulaci záznamu částic kamerami pod určitým pozorovacím úhlem (zvoleno  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ) a pro pozice kamer symetrické k pomyslné měřené oblasti, tedy  $\mathbf{t}_1 = -\mathbf{t}_2$ . Obdobně jako u předchozí verifikace bylo zkreslení určeno pro tyto vnější parametry kamer na základě experimentů (s využitím posuvného kalibračního terčíku zaznamenaného v pěti polohách a polynomického modelu třetího řádu pro kalibraci, chyba  $\vartheta_B < 0.1 \text{ px}$ ). Následně byla syntetická data zpracována navrženou metodikou od kalibrace stereo-snímání po výslednou rekonstrukci dat následujícím postupem.



Obr. 44: Proces verifikace navržené metodiky

Kalibrační terčík byl zaznamenán kamerami ve zvoleném objektivém souřadném systému. Centrální bod terčíku určoval počátek objektivého souřadného systému (0,0,0) a značky os jednotlivé osy systému. Kamery byly umístěny do pozic určených vnějšími parametry, které odpovídaly aplikovanému perspektivnímu zkrslení na vygenerované obrazy částic. Následně byl proveden záznam kalibračního terčíku. V záznamech byly identifikovány body a poté vypočteny polynomické modely třetího řádu (algoritmy identifikace a výpočtu modelů jsou umístěny do přílohy A). Zkrslené obrazy částic byly po výpočtech „narovnaný“ na základě těchto modelů. Zpětná projekce společně s výpočtem vektorových map byla provedena v DynamicStudios, do kterého je možné exportovat polynomické modely. Výsledná trojrozměrná rekonstrukce proudění byla provedena na základě Willertovy metody. Hodnoty pozorovacích úhlů kamer, dosažené do vztahů, se shodovaly s úhly pro aplikované perspektivní zkrslení.

Výsledná mapa (obr. 45) byla porovnána s trojrozměrnou vektorovou mapou získanou výpočtem pouze na základě Willertovy metody (obr. 32), kde bylo potřeba dosadit pozorovací úhly kamer a definovat měřítko v obrazech sytících částic (měřítko a úhly byly shodné pro oba postupy rekonstrukce). Výpočet byl proveden v programovém prostředí Matlab.

*Parametry syntetických obrazů částic:*

Průměrné posunutí částic – v obrazech pro kameru 1: 10 px podél osy  $u$ , pro kamera 2: -10 px podél osy  $u$

Průměrný počet částic na VO (32x32px) – 10

Průměr částic - 2.5 px

Tloušťka laserového řezu – 1 mm

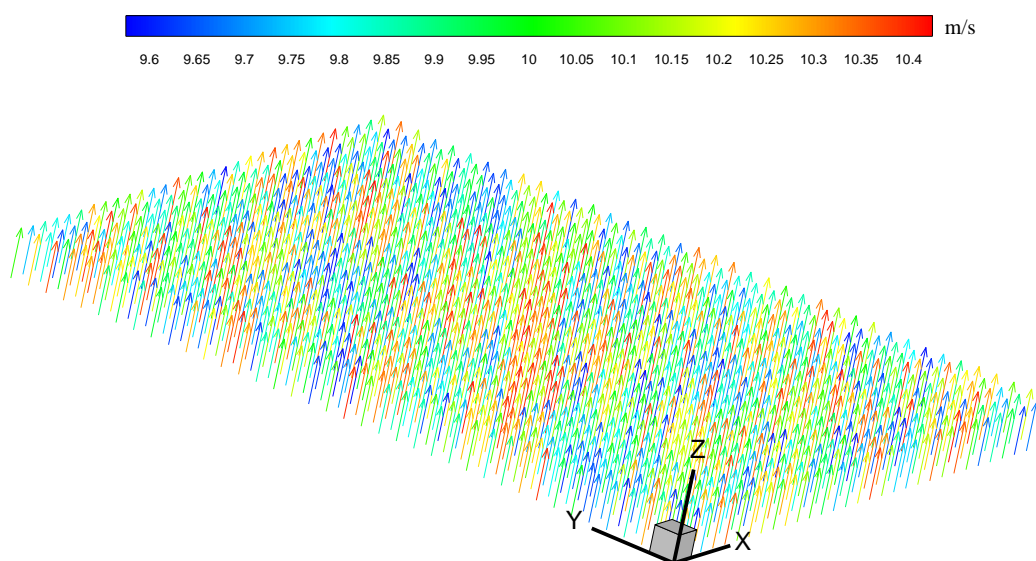
Aditivní šum – 0%

*Simulace perspektivního zkreslení pro uspořádání kamer –*

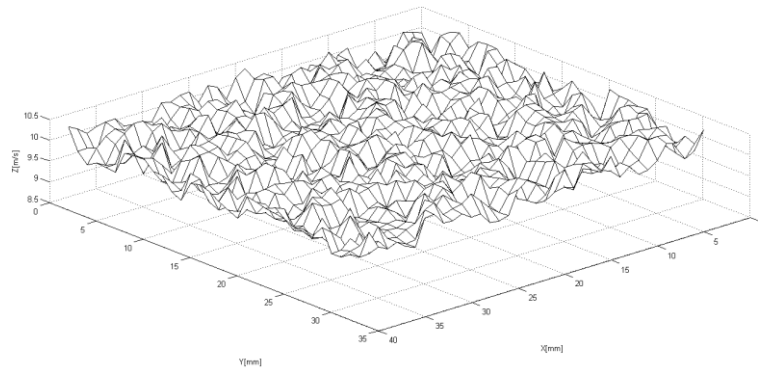
$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ, \alpha_1 = \alpha_2, \mathbf{t}_1 = -\mathbf{t}_2$

*Parametry pro výpočet vektorových map (DynamicStudio) –*

Adaptivní korelace, bez okenních funkcí a překrývání. Chyba v určení posunutí částic pomocí adaptivní korelace a zvolených parametrů obrazů částic: +/-0.05 px (viz [35]). Tato chyba je pro obě rekonstrukce shodná a jejich vliv na verifikaci metodiky se vyruší.



Obr. 45: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data zrekonstruovaná navrženou metodikou



Obr. 46: Složka Z vektorů rychlosti proudění pro vektorovou mapu získanou navrženou metodikou

Trojrozměrná vektorová mapa rekonstruovaná navrženou metodikou (pro pozorovací úhly  $\theta_1, \theta_2 = 45^\circ$ ) je znázorněna na obr. 45. Dle rekonstrukce na základě Willertovy metody by mělo pro všechny vektory vektorové mapy platit: složka  $Z = 10\text{m/s}$ , složka  $Y = 0$ , složka  $X = 0$  (obr. 32). Na obr. 46 je detailněji možné rozlišit rozdíl mezi výsledky navržené rekonstrukce a předpokládanými hodnotami. Porovnáním rekonstrukcí je vyjádřena chyba  $\sigma_{\Delta Z}$  v určení složky vektoru rychlosti ve směru osy  $Z$  a na základě vztahu (41) jsou odvozeny chyby  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  v určení ostatních složek.

Tabulka 2: Chyba v trojrozměrné rekonstrukci navržené metodiky

Pozorovací úhel kamer $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ [°]	Chyba ve složce vektoru rychlosti ve směru osy $Z$	Chyba ve složce vektoru rychlosti ve směru osy $X, Y$
	$\sigma_{\Delta Z}$ [%]	$\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}$ [%]
45	4,122	4,122
40	4,726	3,966
35	5,399	3,780
30	5,932	3,425
25	6,657	3,104

Uvedené chyby v trojrozměrné rekonstrukci odpovídají: určení pozorovacích úhlů kamer s přesností  $0,5^\circ$ , určení pozic kamer s přesností  $0,5\text{ mm}$  [36] a průměrné chybě v identifikaci bodů terčiku  $\vartheta_B < 1\text{px}$ . Tabulka 2. platí i pro případ, kdy měřená oblast



je umístěná v tekutině jiné, než je pracovní prostor kamer. Je však potřeba upravit pozorovací úhly kamer dle vztahu (44).

*Chyby  $\sigma_{\Delta Z}$ ,  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  jsou v celém zkoumaném rozsahu pozorovacích úhlů vyšší v porovnání s rekonstrukcí na základě vnitřních a vnějších parametrů. To je zapříčiněno způsobem kalibrace stereo-snímání. Kalibrace je provedena pouze v jedné rovině v objektovém souřadném systému. I tak jsou chyby v rozmezí 3-6 % a takový výsledek se dá považovat za velmi dobrý z pohledu experimentální praxe. Chyba  $\sigma_{\Delta Z}$  je pro pozorovací úhel  $\theta_1, \theta_2 = 45^\circ$  nejmenší a roste se zmenšujícím se pozorovacím úhlem přibližně lineárně. Naopak chyby  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  v tomto případě klesají, a to také přibližně lineárně.*

## Experimentální ověření

### Experimentální výzkum proudění za Glauert–Goldschmied profilem

Ověření metodiky bylo provedeno na již zmíněném experimentálním výzkumu proudění za Glauert-Goldschmied profilem (kapitola 3.1.2). Kalibrace stereo-snímání byla provedena posuvným kalibračním terčíkem, o rozměrech 7 x 6 cm, zaznamenaným ve středu laserového řezu.

#### *Použité komponenty a uspořádání měřicího systému*

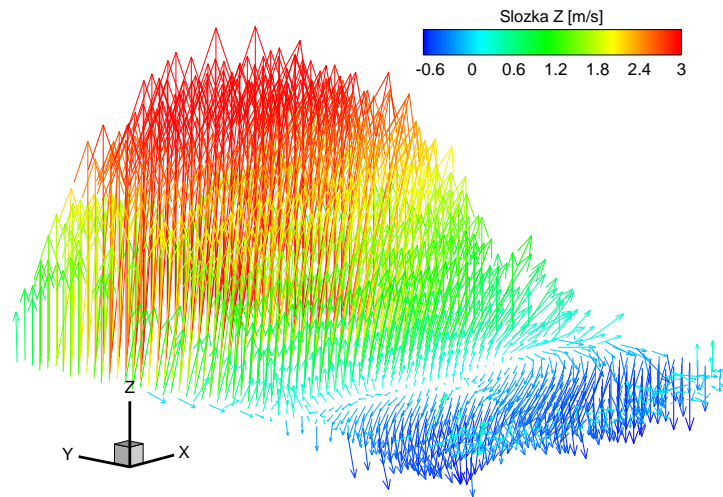
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Wave Pegasus Nd: YLF, 527 nm. Maximální frekvence 10 kHz. Energie jednoho pulsu 10 mJ pro frekvenci 1kHz (tedy 10W na jednu dutinu laseru).

Snímací technika: CMOS kamery NanoSense MKIII, maximální snímkovací frekvence 512 Hz (pro jednotlivou expozici) pro rozlišení kamery 1280 x 1024 px. Objektivy kamer Nikkor 60 mm.

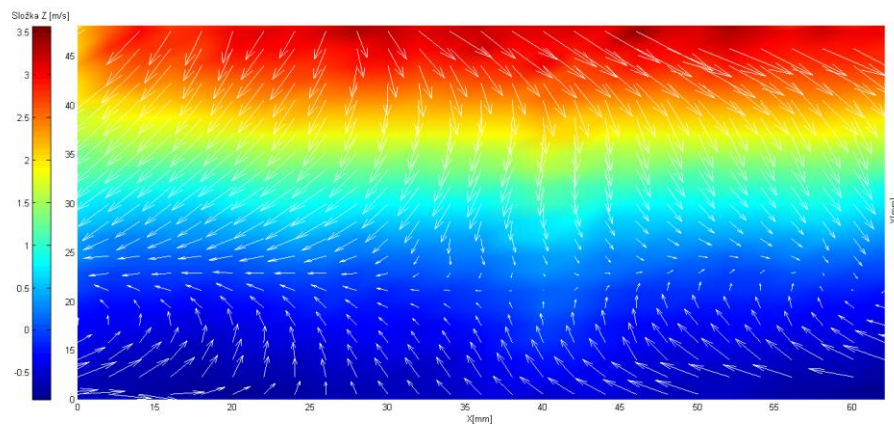
Sytící částice: olejové částice o průměru 1 $\mu$ m z generátoru mlhy značky Safex.

Velikost společného zorného pole kamer (měřená oblast): 7 x 4,5 cm.

Rychlost proudění vzduchu (měřeno za vstupem do tunelu): 5 m/s.



Obr. 47: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s  
(navržená metodika)



Obr. 48: Dvojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami X, Y)  
a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní  
rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)

Vektorové mapy vypočtené z narovnaných obrazů částic mají menší rozlišení (celkový počet vektorů) než v případě výpočtu bez zpětné projekce (v DynamicStudios). Výsledná mapa byla stejně jako v kapitole 3.1.2 porovnána s výsledky rekonstrukce provedené klasickým způsobem v DynamicStudios s použitím posuvného terčíku zaznamenaného v pěti polohách vůči ose Z.

Rozptyl [36] jednotlivých složek vektorů rychlosti proudění:

$$\rho_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } X_{DS_{i,j}} - \text{Složka } X_{NM_{i,j}})^2 = 0,013 \text{ ms}^{-1}, \quad (52)$$

$$\rho_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } Y_{DS_{i,j}} - \text{Složka } Y_{NM_{i,j}})^2 = 0,040 \text{ ms}^{-1}, \quad (53)$$

$$\rho_Z^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } Z_{DS_{i,j}} - \text{Složka } Z_{NM_{i,j}})^2 = 0,338 \text{ ms}^{-1}. \quad (54)$$

Jednotlivé složky nabývaly hodnot, v porovnání s komerčním softwarem:

$$\text{Složka } X_{NM} = \text{Složka } X_{DS} \pm 0,013 \text{ ms}^{-1}, \quad (55)$$

$$\text{Složka } Y_{NM} = \text{Složka } Y_{DS} \pm 0,040 \text{ ms}^{-1}, \quad (56)$$

$$\text{Složka } Z_{NM} = \text{Složka } Z_{DS} \pm 0,338 \text{ ms}^{-1}. \quad (57)$$

Procentuálně byla průměrná odchylka pro složku Z rovna 9,572 %, 1,078 % pro složku X a 9,677% pro složku Y.

*Výsledky navržené metodiky se liší od výsledků uvedeného komerčního softwaru pro složky Z a Y vektorů rychlosti přibližně o 9 % a o 1 % pro složku X. Rozdíl těchto odchylek a předpokládaných chyb založených na verifikaci je několik procent. To lze přisuzovat především tomu, že kalibrace byla provedena pouze v jedné rovině v objektovém souřadném systému a chybě samotného komerčního softwaru, který je samozřejmě také zatížen nejistotou měření. Odchylku v rozmezí do 9 % je stále možné považovat za dobrý výsledek. Bez použití navržené metodiky by totiž nebylo možné v této situaci provést samotné měření. Komerční měřicí systémy nedovolují provést měření bez možnosti posunu kalibračního terčiku v měřené oblasti s výjimkou postupů uvedených na začátku této kapitoly.*

## Experimentální výzkum proudění uvnitř míchací nádoby

Proces míchání je podstatnou součástí v několika odvětvích, jako tomu je například v chemickém průmyslu. Pro lepší porozumění tohoto procesu a popis proudění uvnitř

míchací nádoby (obr. 49), byl vytyčen experimentální výzkum ve spolupráci s Institutem hydrodynamiky Akademie věd ČR [38]. Výzkum byl proveden konvenčním přístupem měření metodou PIV, ale také metodou Stereo PIV, kde bylo možné ověřit navrženou metodiku. Experimentální uspořádání je znázorněno na obr. 49, včetně základních rozměrů nádoby. Další informace o výzkumu jsou uvedeny v [38].

#### *Použité komponenty a uspořádání měřicího systému*

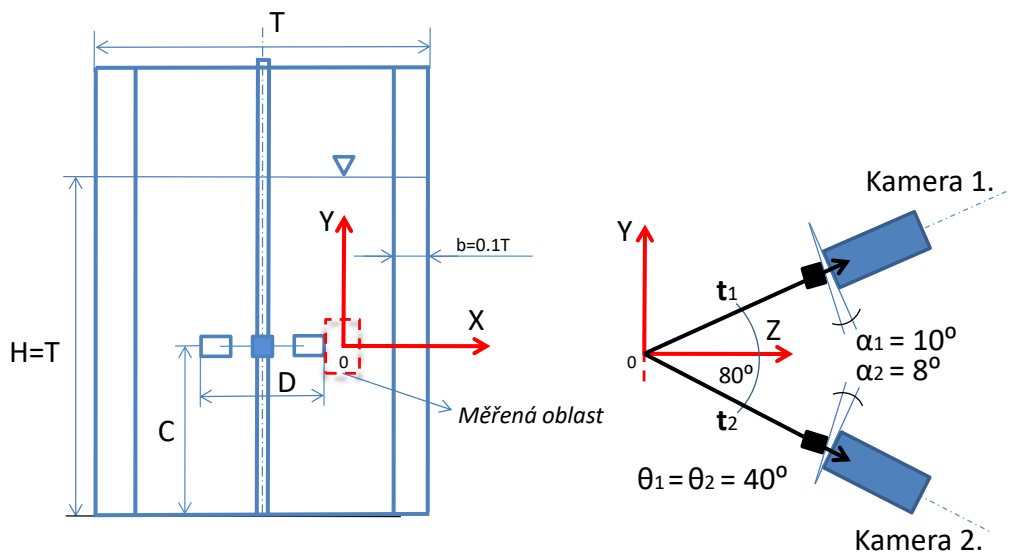
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Litron: Y300. Energie jednoho pulsu 15 mJ pro frekvenci pulsů 1kHz. Vlnová délka laseru 527 nm.

Snímací technika: SpeedSense kamery, snímkovací frekvence 1kHz (pro jednotlivou expozici), rozlišení kamery 1280 x 800 px. Objektivy kamer Nikkor 60 mm.

Sytící částice: fluorescentní částice o průměru  $20\mu\text{m}$  pokryté Rhodaminem B. Při osvětlení částic použitým laserem emitují záření oranžové barvy (570 nm).

Velikost společného zorného pole kamer (měřená oblast):  $8 \times 4,5 \text{ cm}$ .

Rychlost otáček míchadla: 600 ot/min.

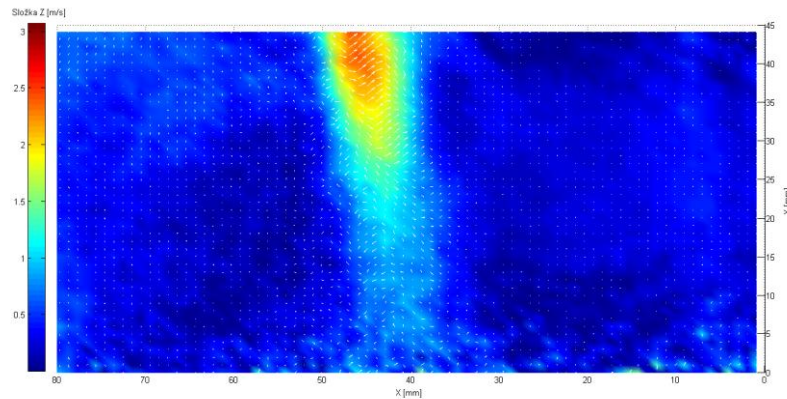


Obr. 49: Experimentální uspořádání a základní rozměry nádoby s míchadlem:  $H/T=1$ ,  $D/T=1/3$ ,  $C/T=1/2$ ,  $b/T=1/10$ ,  $1/D=1/4$

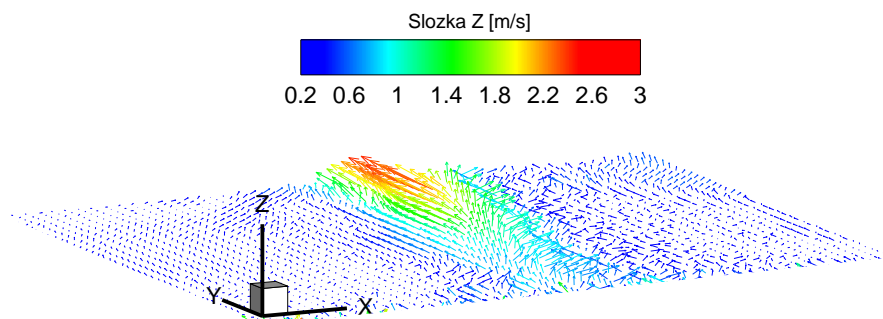
#### *Výsledky experimentu*

Na obr. 50 je znázorněn jeden z výsledků experimentu navrženou metodikou ve formě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění (definované složkami  $X$ ,  $Y$ ), včetně

skalární mapy na pozadí, odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění. Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění je pak vyobrazena na obr. 51. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 8000 vektorových map.



Obr. 50: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: pro rychlost otáčení míchadla 600 ot/min (navržená metodika)



Obr. 51: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: pro rychlost otáčení míchadla 600 ot/min (navržená metodika)

V rámci experimentálního výzkumu proudění uvnitř míchací nádoby byla ověřena použitelnost a správnost navržené metodiky. Vybrané výsledky měření metodikou jsou znázorněny na obr. 50 a 51. Charakter proudění, co do umístění hlavního toku v měřicí rovině a smyslu proudu ve směru osy Z, odpovídal předpokladům matematického popisu [40] a výsledkům výzkumu metodou 2D PIV (použitý měřicí systém od Dantec Dynamics), který předcházal experimentu. Výsledky experimentu byly mj. použity pro ověření matematického popisu proudění uvnitř míchací nádoby [38].

## ***4 Měření metodou Stereo PIV v přítomnosti výrazného optického zkreslení***

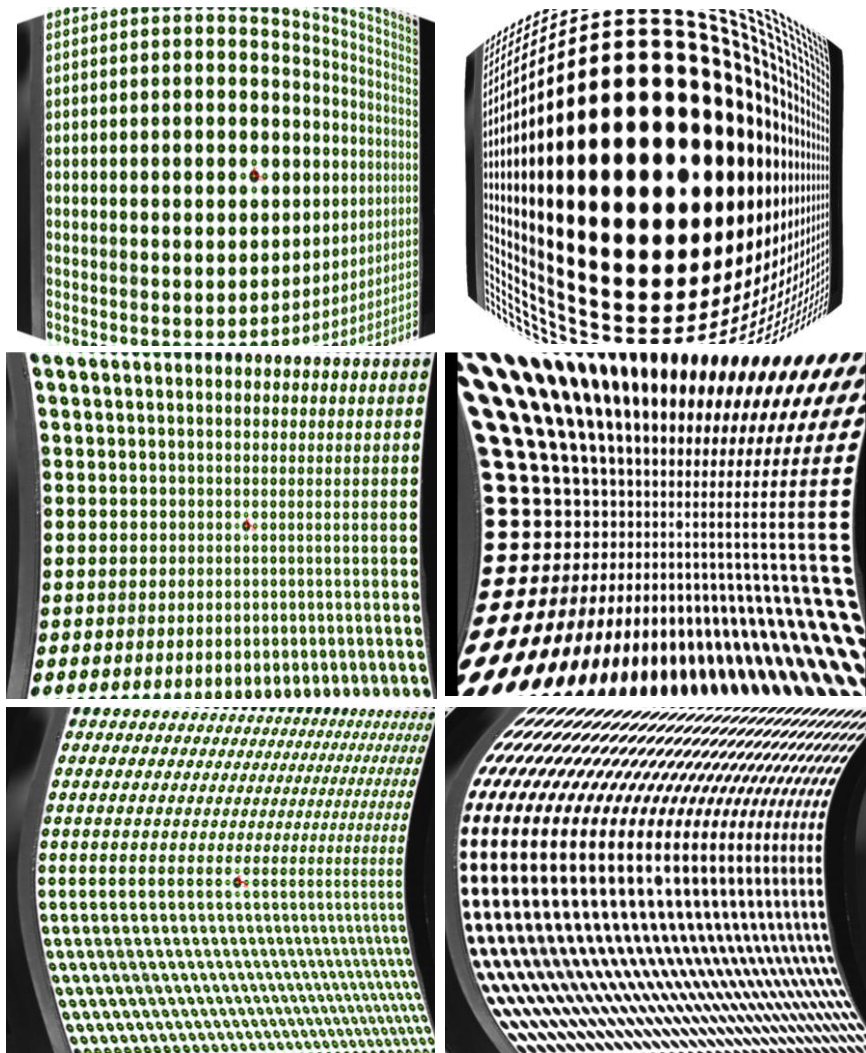
Mimo komplikací spojených s umístěním a pohybem kalibračního terčíku je dalším problematickým faktorem optické zkreslení obrazů částic. Kamery zaznamenávají pohyb mikroskopických částic rozptýlených v médiu uvnitř nádoby a výsledný obraz částic může podléhat kromě perspektivního zkreslení a zkreslení v důsledku nedokonalé optiky i optickému zkreslení zapříčiněnému stěnou nádoby. Je tomu tak například při pozorování částic uvnitř válcového potrubí, nebo skrze rozdělovací části nádob/tunelů. Před výpočtem vektorových map rychlosti proudění z obrazů částic je nutné definovat optické zkreslení a následně ho eliminovat. To je standardně provedeno v rámci kalibrace stereo-snímání ze záznamů kalibračního terčíku [11]. Záznamy k eliminaci zkreslení využívají také veškeré komerční měřicí systémy. Systémy však mají svoje limity a nejsou schopny v některých případech optické zkreslení definovat a následně pak selhává i samotné měření.

Tato kapitola se zabývá postupy použitelnými v přítomnosti výrazného optického zkreslení obrazů částic. Za výrazné zkreslení je považováno právě takové zkreslení, při kterém selhává měření s využitím dostupného komerčního systému. V laboratoři Mechaniky Tekutin na TUL, kde autor práce působí po dobu doktorského studia, je používán měřicí systém od Dantec Dynamics (včetně softwaru DynamicStudio), na kterém jsou tyto limity definovány. Neznamená to však, že tyto limity jsou shodné pro ostatní komerční měřicí systémy.

### ***4.1 Analýza problematiky a možné postupy***

Pokud obrazy částic podléhají optickému zkreslení zapříčiněnému stěnou nádoby, není obecně vhodné využít rekonstrukce založené na modelu perspektivní kamery nebo rekonstrukce na základě geometrie uspořádání (kapitoly 2.2.1 a 2.2.2). Je to z důvodu nelineárního a neznámého charakteru tohoto zkreslení v naprosté většině případů. Rekonstrukce si dokážou poradit pouze s perspektivním zkreslením. Pokud je využita

autokalibrace kamer u rekonstrukce založené na modelu perspektivní kamery je možné eliminovat také zkreslení v důsledku nedokonalé optiky. Jediným postupem použitelným k definování optického zkreslení zapříčiněného stěnou nádoby (včetně ostatních zmíněných zkreslení) je rekonstrukce na základě polynomičkého modelu (kapitola 2.2.3). K výpočtu modelů kamer jsou využity identifikované pozice bodů v záznamech kalibračního terčíku. Typ kalibračního terčíku záleží na možnostech daného experimentu, lze však využít všechny postupy uvedené v kapitole 2.3.



Obr. 52: Výpočet polynomičkého modelu v programovém prostředí DynamicStudio pro tři druhy optického zkreslení: levý sloupec odpovídá zdárnému výpočtu (viz zelená síť, určená vypočteným modelem, kterou jsou body terčíku správně proloženy) a pravý sloupec ukazuje případy, ve kterých již výpočet selhává

Před návrhem metodiky je kromě výběru postupu potřeba definovat případy, ve kterých selhává měření s využitím dostupného komerčního systému. Navržená metodika by měla být použitelná především v takových případech.

Bylo aplikováno pět typů optického zkreslení v několika stupních intenzity na záznamy posuvného kalibračního terčíku. Záznamy byly importovány do programového prostředí DynamicStudia a byly určeny případy, ve kterých výpočet polynomického modelu selhává (konkrétně tento software používá polynomický model třetího řádu). Pro názornost jsou vybrané případy vyobrazeny na obr. 52. Levý sloupec, odpovídá zdárnému výpočtu koeficientů polynomického modelu (body terčíku jsou proloženy zelenou sítí, která je určena tímto modelem). Pravý sloupec zobrazuje zkreslení s intenzitou takovou, se kterou si již software není schopen vypořádat.

## ***4.2 Metodika založena na eliminaci optického zkreslení pomocí polynomického modelu***

Autor disertační práce navrhl metodiku využívající rekonstrukce na základě polynomického modelu  $n$ -tého řádu, použitelnou v situacích definovaných v předcházející kapitole.

### **Sestavení měřicího systému a umístění kalibračního terčíku**

Prvním krokem měření touto metodikou je sestavit uspořádání měřicího systému a umístění posuvného terčíku do zkoumané oblasti (do středu laserového řezu), stejně jako tomu bylo u metodiky popsané v kapitole 3.2.2. Centrální bod a značky os terčíku poté definují objektový souřadný systém. Terčík je potřeba připevnit na traverzovací systém dovolující precizní posun v řádech milimetrů. Po umístění je terčík zaznamenán kamerami v minimálně pěti polohách podél osy  $Z$ . Doporučený posun terčíku mezi záznamy je 1 mm, pozice terčíku jsou poté následující:  $Z = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$  mm. Záporné hodnoty odpovídají pozicím terčíku za laserovým řezem. Záznam posuvného kalibračního terčíku je znázorněn na obr. 18.



## Určení polynomických modelů kamer

Na záznamech kalibračního terčíku jsou dále identifikovány pozice bodů (přesněji jejich středů). Identifikace je provedena pro všechny záznamy (v tomto případě pro pět záznamů odpovídajících kameře 1 a pět záznamů kameře 2) postupem uvedeným v kapitole 3.2.2. Algoritmus identifikace bodů je vložen do Přílohy A. Pozice bodů v záznamech jsou použity pro výpočet polynomických modelů (jednoho pro kameru 1 a druhého pro kameru 2) podle teorie uvedené v kapitole 2.2.3. Výpočet modelů je vždy vhodné zkontrolovat, tedy určit, jak dobře polynomický model mapuje body ze scény do obrazového souřadného systému (chyba  $\vartheta_B$ , viz kapitola 2.4.2). Každý bod terčíku ze scény je pomocí vypočtených modelů transformován do obrazového souřadného systému a následně je zkontrolována tato pozice s pozicí, která byla použita pro výpočet po identifikaci bodů. Průměrná hodnota chyby  $\vartheta_B$  by neměla být větší nežli jednotky pixelů. Pokud tomu tak není, je chyba v identifikaci bodů terčíku, v nízkém počtu bodů nebo je zvolen nedostatečný řád polynomického modelu k danému optickému zkreslení. Kompenzovat chybu je možné postupem uvedeným v kapitole 2.4.2.

Touto kontrolou či kompenzací je hotova kalibrace stereo-snímání, včetně definování optického zkreslení a je možné po vyjmutí kalibračního terčíku provést samotné měření.

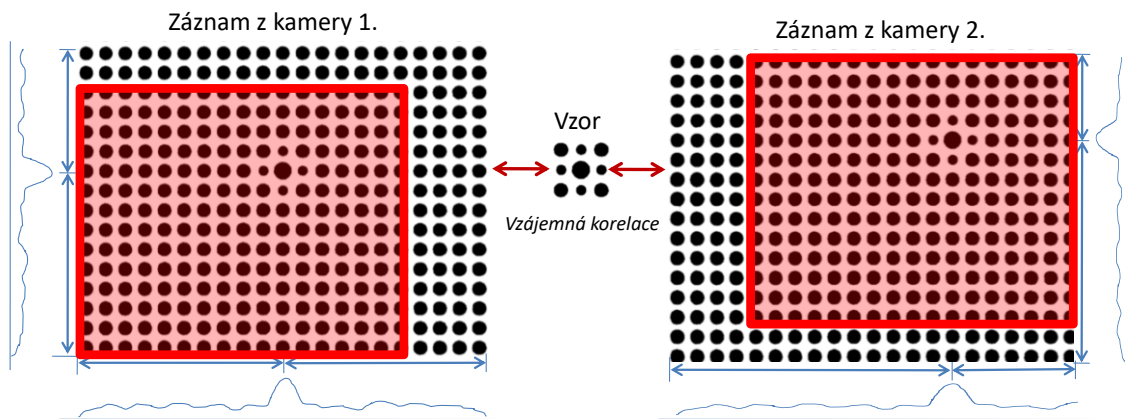
Naměřená data, tedy v tomto případě obrazy sytících částic, je možné rovnou použít pro výpočet dvojrozměrných vektorových map nebo zpětnou projekcí nejprve „narovnat“. Výsledkem jsou dvě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění: první odpovídající záznamům z kamery 1 a druhá záznamům z kamery 2. Mapy definují charakter proudění v časovém intervalu mezi pulsy laseru v čase  $t$  a  $t + \Delta t$ . Pozice vektorů těchto map jsou definovány v obrazovém souřadném systému.

## Společné zorné pole kamer

Obdobně jako u předchozích metodik je nutné určit v dalším kroku společné zorné pole kamer, jak v objektovém souřadném systému, tak v jednotlivých obrazových souřadných systémech. To lze provést ručním vymezením velikosti pole nebo zpětnou projekcí záznamu z kamery 1 a záznamu z kamery 2, kde společné pole v objektovém souřadném systému je určeno průnikem těchto dvou vzniklých oblastí. Společné pole

v obrazových souřadných systémech je pak určeno dopřednou projekcí průniku do obrazových souřadných systémů kamer (dopředná projekce: projekce z objektového s. s. do obrazového s. s.).

Tento princip je využíván také při určení společného zorného pole kamer za pomoci záznamů kalibračního terčíku a jeho centrálního bodu. Při zmíněném postupu je nejprve nalezen střed centrálních bodů posuvného terčíku v „narovnaných“ záznamech odpovídajících kameře 1 a 2 (pro pozici  $Z = 0$ ). Pokud tyto body nejsou známy, lze je nalézt vzájemnou korelací (kapitola 1.3.1) každého záznamu se vzorem tvořícím centrální bod a značky os, viz obr. 53. Střed centrálního bodu odpovídá vždy pozici maxima v dané korelační rovině. Od středů jsou zjištěny vzdálenosti (v px) k okrajům záznamů, na základě kterých je definována velikost společného zorného pole kamer (viz červené obdélníky na obr. 53).



Obr. 53: Definování společného zorného pole kamer - červený obdélník vymezuje pole v záznamech terčíku (po stranách záznamů je názorně ukázána korelační rovina z příslušného pohledu a vzdálenosti vrcholu od okrajů obrazu)

### Trojrozměrná rekonstrukce

Posledním krokem navržené metodiky je získat trojrozměrnou informaci o proudění z dvojrozměrných vektorových map. Každý vektor ve společném zorném poli kamer z vektorové mapy odpovídající kameře 1. je přiřazen k takovému vektoru v mapě, odpovídající kameře 2., který je ve stejné pozici v měřené oblasti. Pro každou korespondující dvojici vektorů (z „nenarovnaných“ vektorových map) je vypočten na základě polynomických modelů trojrozměrný vektor rychlosti proudění v objektovém souřadném systému. Pozice počátečního bodu trojrozměrného vektoru je určena ze

známých pozic počátečních bodů korespondujících vektorů v obrazovém souřadném systému. Je tak sestavena soustava čtyř nelineárních rovnic dle vztahu (33), kde řešením této soustavy je hledaná pozice počátečního bodu trojrozměrného vektoru. Obdobný postup je použit i pro výpočet pozice koncového bodu trojrozměrného vektoru.

V případě, kdy je rekonstrukce provedena z dvojrozměrných vektorových map získaných z „narovnaných“ obrazů částic je možné použít Willertovu metodu k trojrozměrné rekonstrukci.

Rekonstrukce uvedenými postupy je transformací do euklidovského prostoru, není tedy potřeba hledat koeficient změny měřítka. Není také nutné upravovat žádné vnější parametry kamer.

## Popis vytvořených algoritmů

Autor disertační práce, vytvořil algoritmy pro trojrozměrnou rekonstrukci v přítomnosti výrazného optického zkreslení na základě polynomického modelu třetího/čtvrtého řádu, v programovém prostředí Matlab R2014. Stejně tak, jako u ostatních navržených metodik, jsou v této kapitole popsány jednotlivé body algoritmů diagramem znázorněným na obr. 54. Veškeré algoritmy jsou umístěny do Přílohy A.

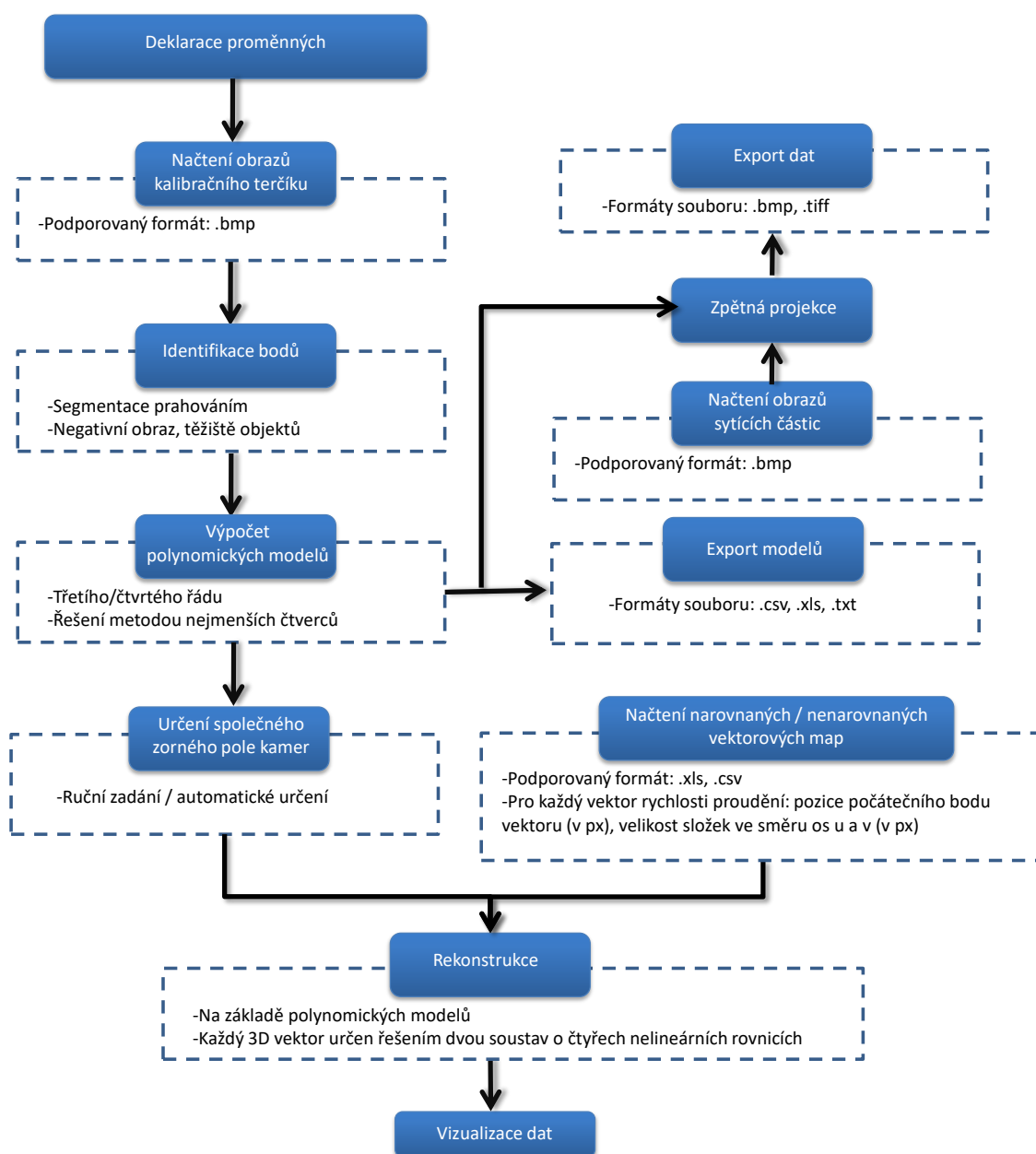
Hlavními algoritmy rekonstrukce, propojujícími ostatní algoritmy, jsou soubory s názvem: *RekonstrukceNeNarovnaneVM.m* a *RekonstrukceNarovnaneVM.m*. První jmenovaný soubor je vytvořen pro rekonstrukci z vektorových map vypočtených z obrazů částic bez zpětné projekce a druhý pro rekonstrukci z map vypočtených z obrazů částic po zpětné projekci. Výpočet dvojrozměrných vektorových map ze záznamů sytících částic není součástí algoritmů.

Vstupními daty algoritmů jsou: „narovnaná“ / „nenarovnaná“ dvojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění odpovídající záznamům sytících částic z kamery 1. a „narovnaná“ / „nenarovnaná“ vektorová mapa odpovídající záznamům z kamery 2., souřadnice bodů kalibračního terčíku v jeho záznamech (v obrazovém souřadném systému) a souřadnice jejich korespondencí v objektovém souřadném systému, dále tzv. Scale factor dvojrozměrných vektorových map (definovaný softwarem, který provádí výpočet map).

## Doplňující možnosti algoritmů

Souřadnice bodů lze zadat ručně, nebo využít algoritmus pro identifikaci bodů terčíku (*IdentifikaceBoduKalibracnihoObrazce.m*), který nalezne tyto souřadnice a uloží do souboru.

Pokud uživatel chce provést rekonstrukci z více vektorových map (vektorovou statistiku) je možné využít modifikace hlavních algoritmů k tomu určené (složka *RekonstrukceZViceVM*). Vektorové mapy a soubor se souřadnicemi bodů musí být umístěny do stejné složky s algoritmem.



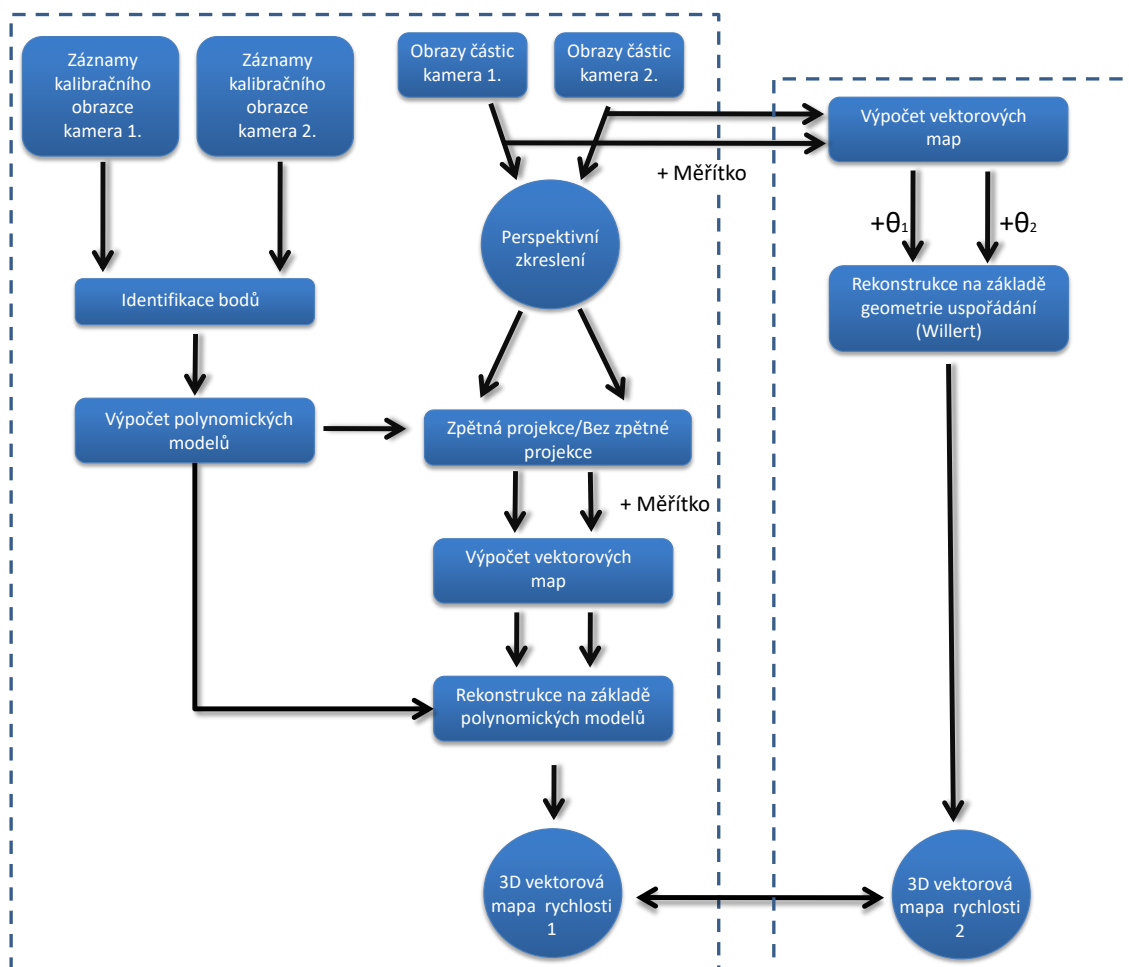
Obr. 54: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě polynomického modelu

Ke kontrole výpočtu polynomického modelu je vyčíslena chyba v proložení bodů terčiku vypočteným modelem s možností zpětné projekce záznamů terčiků v pozici  $Z=0$ . Hlavní algoritmy umožňují export polynomických modelů, a je tak možné provést rekonstrukci v jiném programovém prostředí (např. DynamicStudiu).

Výsledek rekonstrukce je vždy možné validovat a vizualizovat v několika podobách. Následně exportovat ve formě grafů nebo tabulkových souborů (.xls, .csv). Algoritmy obsahují možnost exportovat výsledky ve formátu podporovaným softwarem Tecplot 360.

## Verifikace metodiky

Obdobně jako v předcházejících případech byla navržená metodika verifikovaná na uměle vytvořených datech simulujících experiment se známým teoretickým výsledkem. Proces verifikace je znázorněn na obr. 55.



Obr. 55: Proces verifikace navržené metodiky

Generování obrazů částic a jejich další úprava byla shodná s postupem uvedeným v kapitolách 3.1.2 a 3.2.2. Kalibrační terčik byl zaznamenán kamerami ve zvoleném objektovém souřadném systému v pěti polohách vzdálených od sebe 1 mm. Centrální bod terčiku určoval počátek objektového souřadného systému (0,0,0) a značky os jednotlivé osy systému. Kamery byly v pozicích odpovídajících vnějším parametrům, které odpovídaly aplikovanému perspektivnímu zkreslení na vygenerované obrazy částic. V záznamech terčiku byly identifikovány body a následně vypočteny polynomické modely třetího řádu (v tomto případě byl výsledek shodný s výsledkem modelu čtvrtého řádu). Zkreslené obrazy částic bylo možné zpětnou projekcí „narovnat“, a nebo ponechat tak, jak byly zaznamenány, tato volba totiž neměla žádný výrazný vliv na výsledky rekonstrukce. Zpětná projekce společně s výpočtem vektorových map byla provedena v DynamicStudios, do kterého bylo možné exportovat polynomické modely. Výsledná trojrozměrná rekonstrukce proudění byla provedena na základě vypočtených polynomických modelů.

Výsledná mapa (obr. 56) byla porovnána s trojrozměrnou vektorovou mapou získanou výpočtem pouze na základě Willertovy metody (obr. 32), kde bylo potřeba dosadit pozorovací úhly kamer a definovat měřítko v obrazech sytících částic (měřítko a úhly byly shodné pro oba postupy rekonstrukce). Výpočet byl proveden v programovém prostředí Matlab.

Na obrazy částic nebylo aplikováno, mimo perspektivního zkreslení, žádné aditivní optické zkreslení simulující zkreslení stěnou nádoby. Je to z toho důvodu, že je nespočet různých druhů a intenzit zkreslení včetně vícero možností jejich umístění na daný obraz. Nebylo by pak možné stanovit chybu této metodiky pro obecný případ experimentálního výzkumu, ale pouze pro určité typy zkreslení, se kterými se nemusí experimentátor ani setkat.

*Parametry syntetických obrazů částic:*

Průměrné posunutí částic – v obrazech pro kameru 1: 10 px podél osy  $u$ , pro kamera 2:

-10 px podél osy  $u$

Průměrný počet částic na VO (32x32px) – 10

Průměr částic - 2.5 px

Tloušťka laserového řezu – 1 mm

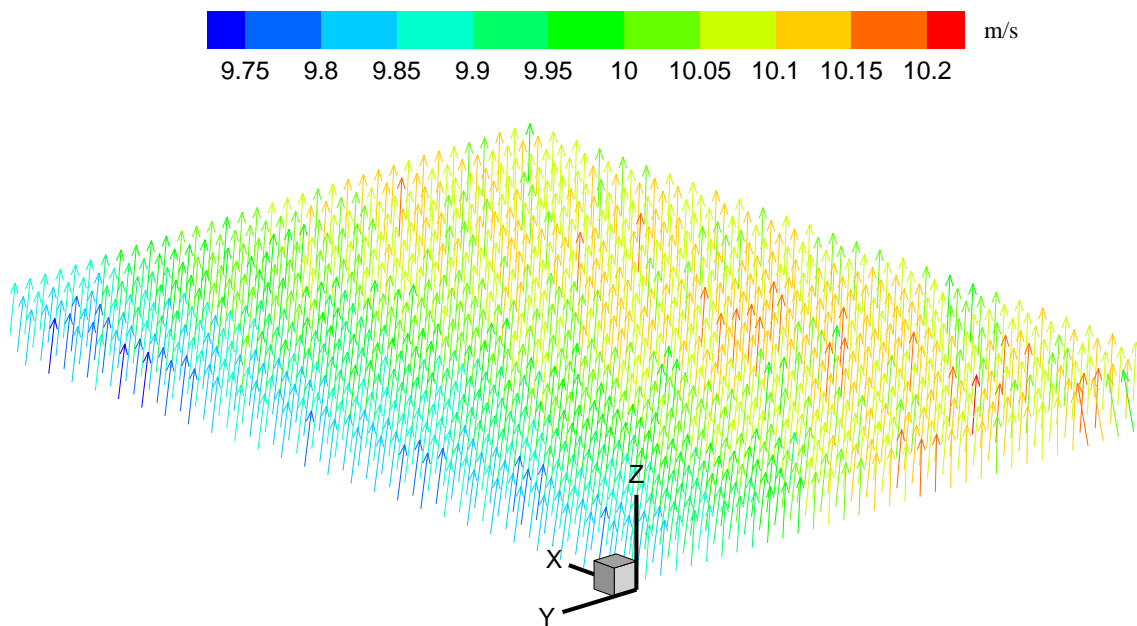
Aditivní šum – 0%

Simulace perspektivního zobrazení pro uspořádání kamer –

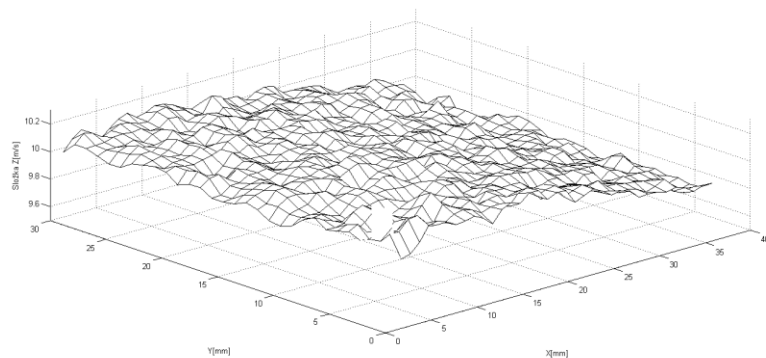
$$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ, \alpha_1 = \alpha_2, \mathbf{t}_1 = -\mathbf{t}_2$$

Parametry pro výpočet vektorových map (DynamicStudio) –

Adaptivní korelace, bez okenních funkcí a překrývání. Chyba v určení posunutí částic pomocí adaptivní korelace a zvolených parametrů obrazů částic:  $\pm 0.05$  px (viz [35]). Tato chyba je pro obě rekonstrukce shodná a jejich vliv na verifikaci metodiky se vyruší.



Obr. 56: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data zrekonstruovaná navrženou metodikou



Obr. 57: Složka Z vektorů rychlosti proudění pro vektorovou mapu získanou navrženou metodikou

Trojrozměrná vektorová mapa rekonstruována navrženou metodikou (pro pozorovací úhly  $\theta_1, \theta_2 = 45^\circ$ ) je znázorněna na obr. 56. Dle rekonstrukce na základě Willertovy metody by mělo pro všechny vektory, stejně jako v předchozích případech, vektorové mapy platit: složka  $Z = 10\text{m/s}$ , složka  $Y = 0$ , složka  $X = 0$  (obr. 32). Na obr. 57 je detailnější pohled pouze na složku  $Z$  vektorů rychlosti proudění. Porovnáním rekonstrukcí je vyjádřena chyba  $\sigma_{\Delta Z}$  v určení složky vektoru rychlosti ve směru osy  $Z$  a na základě vztahu (41) jsou odvozeny chyby  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  v určení ostatních složek.

Tabulka 3: Chyba v trojrozměrné rekonstrukci navržené metodiky

Pozorovací úhel kamer $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ [°]	Chyba ve složce vektoru rychlosti ve smyslu osy $Z$	Chyba ve složce vektoru rychlosti ve smyslu osy $X, Y$
	$\sigma_{\Delta Z}$ [%]	$\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}$ [%]
45	2,790	2,790
40	3,263	2,738
35	3,752	2,627
30	4,242	2,449
25	4,825	2,250

Uvedené chyby v trojrozměrné rekonstrukci odpovídají: určení pozorovacích úhlů kamer s přesností  $0,5^\circ$ , určení pozic kamer s přesností  $0,5\text{ mm}$  [36] a průměrné chybě v identifikaci bodů terčiku  $\vartheta_B < 1\text{px}$ . Tabulka 3. platí i pro případ, kdy měřená oblast je umístěná v tekutině jiné, než je pracovní prostor kamer. Je však potřeba upravit pozorovací úhly kamer dle vztahu (44).

Verifikace navržené metodiky byla provedena pro pozorovací úhly kamer  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ . Chyba v trojrozměrné rekonstrukci byla pro všechny složky přibližně srovnatelná s rekonstrukcí na základě vnitřních a vnějších parametrů.

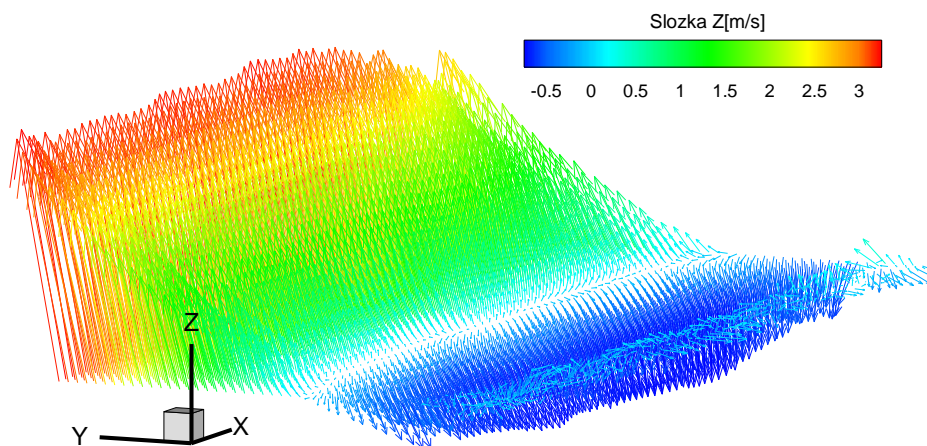
Pro daný rozsah pozorovacích úhlů byla nepřesnost navržené metodiky do 5 %, ve všech složkách vektorů rychlosti proudění. Takový výsledek se dá považovat za velmi dobrý z pohledu experimentální praxe. Pozorovací úhly  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  vycházejí znovu jako optimální pro měření navrženou metodikou, jelikož jsou pro tyto úhly chyby v jednotlivých složkách stejné. Při zmenšování úhlů se chyba  $\sigma_{\Delta Z}$  zvětšuje přibližně s lineárním charakterem. Naopak chyby  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  klesají se zmenšujícími se úhly, a to přibližně exponenciálně.



## Experimentální ověření

### Experimentální výzkum proudění za Glauert–Goldschmied profilem

Metodika byla ověřena na měření zkoumající proudění za Glauert-Goldschmied profilem stejně, jako tomu bylo u dvou předcházejících metodik. K tomu, aby bylo možné porovnat výsledky navržené metodiky s výsledky dostupného komerčního softwaru bylo nutné, aby měření nepodléhalo výraznému optickému zkreslení. Použité komponenty byly nezměněny včetně samotného uspořádání měřicího systému. Vybrané výsledky navržené metodiky jsou znázorněny na obr. 58 a 59. Následně tyto výsledky byly porovnány s výsledky komerčního softwaru, které jsou znázorněny v kapitole 3.1.2.



Obr. 58: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)

Rozptyl [36] jednotlivých složek vektorů rychlosti proudění:

$$\rho_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } X_{DS_{i,j}} - \text{Složka } X_{NM_{i,j}})^2 = 0,003 \text{ ms}^{-1}, \quad (58)$$

$$\rho_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } Y_{DS_{i,j}} - \text{Složka } Y_{NM_{i,j}})^2 = 0,169 \text{ ms}^{-1}, \quad (59)$$

$$\rho_Z^2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (\text{Složka } Z_{DS_{i,j}} - \text{Složka } Z_{NM_{i,j}})^2 = 0,109 \text{ ms}^{-1}. \quad (60)$$

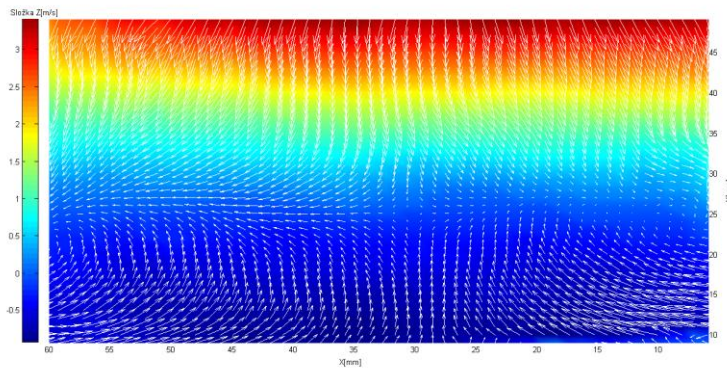
kde  $n$  je počet vektorů vektorové mapy, složka vektoru rychlosti s indexem DS je získána DynamicStudiem, složka vektoru rychlosti s indexem NM odpovídá výpočtu navrženou metodikou. Jednotlivé složky tedy nabývaly hodnot v porovnání s komerčním softwarem:

$$\text{Složka } X_{NM} = \text{Složka } X_{DS} \pm 0,003 \text{ ms}^{-1}, \quad (61)$$

$$\text{Složka } Y_{NM} = \text{Složka } Y_{DS} \pm 0,169 \text{ ms}^{-1}, \quad (62)$$

$$\text{Složka } Z_{NM} = \text{Složka } Z_{DS} \pm 0,109 \text{ ms}^{-1}. \quad (63)$$

Procentuálně byla průměrná odchylka pro složku Z rovna 4,536 %, pro složku X rovna 3,023 % a pro složku Y rovna 3,090 %.



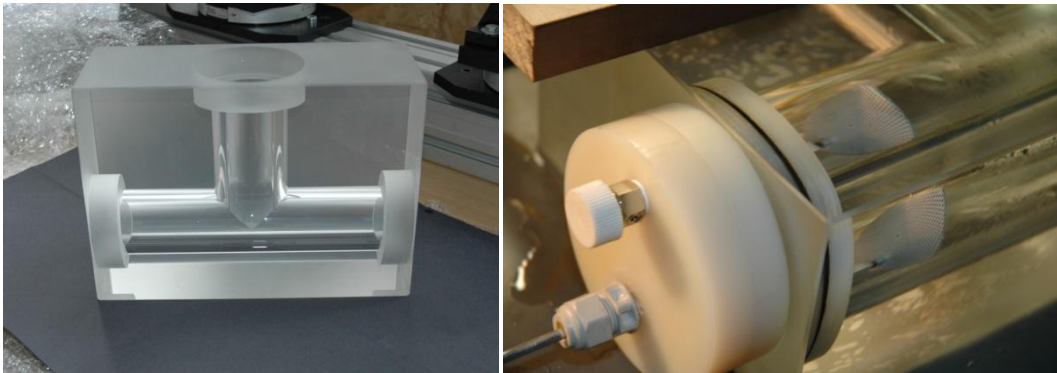
Obr. 59: Dvojměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)

Výsledky navržené metodiky se liší od výsledků dostupného komerčního softwaru průměrně kolem 4 %. V porovnání s ostatními navrženými metodikami se tak jedná o nejmenší průměrnou odchylku. Toho bylo docíleno především zvoleným způsobem kalibrace stereo-snímání. Oproti předpokladům na základě verifikace navržené metodiky se liší odchylka přibližně o pět desetin procenta pro složky X, Y a o tři desetiny pro složku Z. Rozdíl v těchto hodnotách lze přisuzovat faktu, že i komerční systém je zatížen nejistotou měření. Dále je rozdíl ovlivněn přesností určení pozic bodů kalibračního terčíku v jeho záznamech.

## Experimentální výzkum proudění uvnitř rozvětvení tvaru T

Výzkum probíhající ve spolupráci s VÚT v Brně, Fakultou strojního inženýrství [37], měl za cíl ověřit matematický model popisující proudění uvnitř rozvětvení tvaru T (obr. 60). Matematický model byl následně použit pro optimalizaci tvaru rozvětvení ve smyslu minimalizace energetických ztrát, ke kterým uvnitř takového rozvětvení v průmyslu dochází.

Uspořádání systému pro měření v jednom z řezů, ve kterých výzkum probíhal, je schematicky znázorněno na obr. 61. Měřicí rovina měla uvnitř rozvětvení efektivní tvar válce s výškou přibližně 4 mm. Kamery snímaly měřicí rovnu z opačných stran a úhel mezi osami objektivů kamer byl přibližně  $90^\circ$ . Kalibrace stereo-snímání v místě řezu byla provedena pomocí terčíku umístěného na speciálně vyrobený uzávěr (obr. 60), který dovoľoval posun terčíku podél potrubí. Jak je patrné z tohoto obrázku, kalibrační terčík je výrazně zkreslený stěnou nádoby. Při pokusu o vyhodnocení záznamů kalibračního terčíku pořízených kamerami selhala rekonstrukce v programovém prostředí DynamicStudio. Autor disertační práce tak mohl využít na tomto měření navrženou metodiku.



*Obr. 60: Ilustrace rozvětvení tvaru T (vlevo) a detail na zkreslení kalibračního terčíku připevněného na speciálním uzávěru*

### *Použité komponenty a uspořádání měřícího systému*

Pulsní laser: dvou dutinový laser New Wave Gemini Nd: YAG, 532 nm (zelená barva). Maximální frekvence 1 kHz. Každý z těchto laserů pracuje v tzv. režimu Q-spínání.

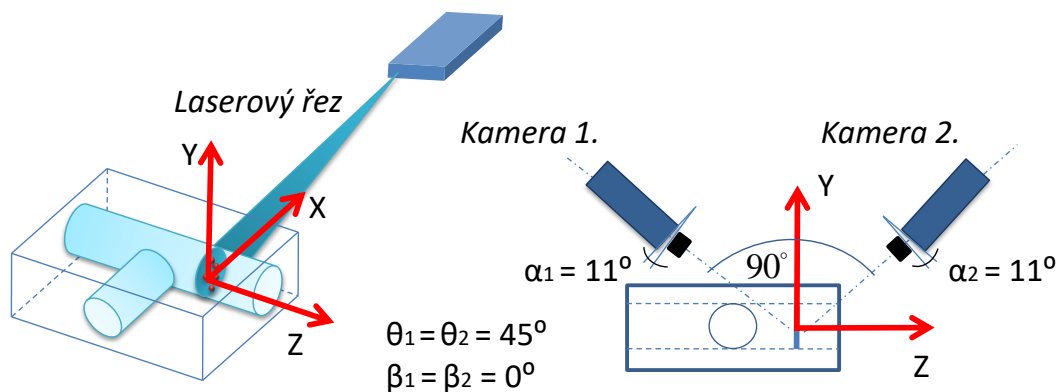
Světelného pulsu je docíleno spínáním ztrát v rezonátoru pomocí modulovaného absorberu.

Snímací technika: CCD kamery HiSense, rozlišení kamery 1280 x 1024 px a 12 bitovým jasovým rozlišením. Objektivy kamer Nikkor 60 mm. Pro potlačení optického šumu byl předřazen filtr propouštějící světlo blízké vlnové délce 570 nm.

Sytící částice: polyamidové částice o průměru 10  $\mu\text{m}$  pokryté Rhodaminem (Nile Red od Spherotec Inc.).

Velikost společného zorného pole kamer (měřená oblast): kruh o poloměru 2.5 cm.

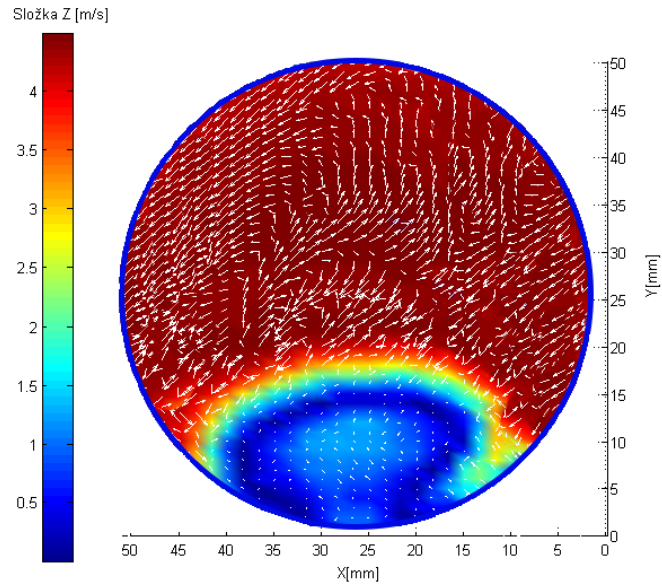
Režimy proudění: voda byla do odboček rozvětvení, napojeného na otevřený potrubní systém s čerpadlem a nádrží, přiváděna v několika režimech. Toho bylo docíleno ventily umístěnými před každou odbočkou. Podrobnější informace jsou uvedeny v [33].



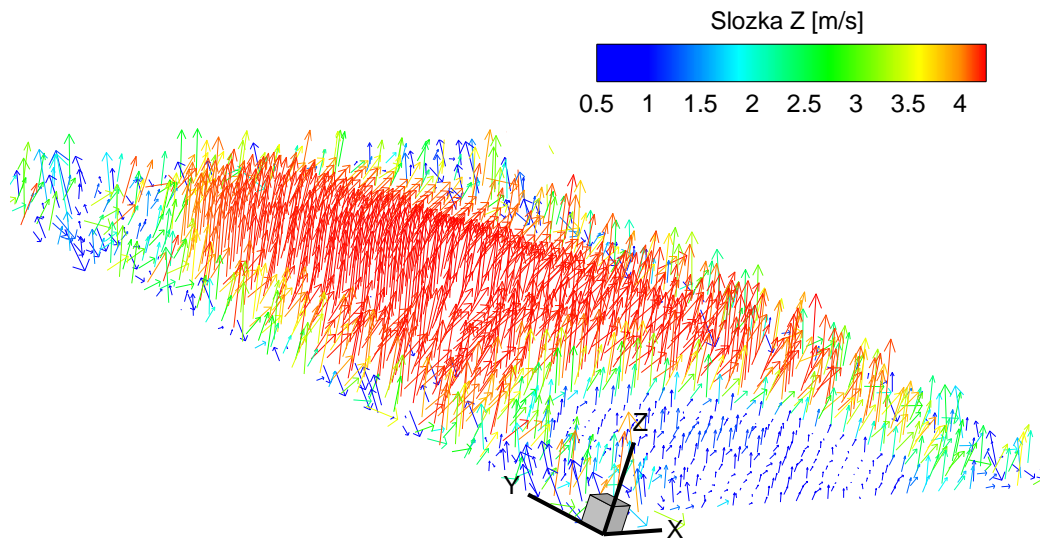
Obr. 61: Uspořádání měřicího systému

### Výsledky experimentu

Na obr. 62 je znázorněn jeden z výsledků experimentu navrženou metodikou ve formě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění (definované složkami  $X$ ,  $Y$ ), včetně skalární mapy na pozadí, odpovídající složce  $Z$  vektorů rychlosti proudění. Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění je pak vyobrazena na obr. 63. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 50 vektorových map. Jednalo se o režim proudu, kde proud vody vstupoval pouze jednou odbočkou a jedna z výstupních odboček byla právě ta, ve které se nacházela měřící rovina. Celkový průtok rozvětvením byl nastaven na hodnotu 5,5 l/s.



Obr. 62: Dvozměrná vektorová mapa rychlosti proudění (definovaná složkami X, Y) a skalární mapa na pozadí odpovídající složce Z vektorů rychlosti proudění: pro celkový průtok rozvětvením 5,5 l/s (navržená metodika)



Obr. 63: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: pro celkový průtok rozvětvením 5,5 l/s (navržená metodika)

Výsledky experimentu nebylo možné porovnat s výsledky získanými dostupným komerčním systémem pro měření metodou Stereo PIV. Je to právě z důvodu výskytu výrazného optického zkreslení v záznamech kalibračního terčíku způsobeného stěnou

nádoby. Rekonstrukce komerčním softwarem selhala při vyhodnocení těchto záznamů. Experiment sloužil jako ověření použitelnosti navržené metodiky pro experimentální výzkum v takových podmínkách. Výsledky experimentu bylo však možné porovnat s výsledky měření komerčního systému provedeného metodou 2D PIV [33], viz příloha A. Měření bylo provedeno pro stejný režim proudění v řezu podél celého rozvětvení. Měřicí rovina byla umístěna do stejné pozice jako rovina definována osami XZ souřadného systému zvoleného při měření navrženou metodikou. Odchylky navržené metodiky ve složkách X a Z trojrozměrných vektorů rychlosti byly přibližně rovny 4 %. Mimo uvedených experimentů byla metodika použita pro experimentální výzkum proudění za nakloněnou deskou [45]. Navržená metodika se dá považovat za ověřenou experimentálním měřením.

## ***5 Souhrnné informace a doporučení pro experimentální praxi***

Každé měření metodou Stereo PIV začíná zvolením uspořádání měřicího systému. Možnosti uspořádání jsou uvedeny v kapitole 2.1. Mezi nejpoužívanější patří:

- uspořádání s bočním posuvem
- uspořádání s úhlovým natočením

Každé z těchto uspořádání má svá pozitiva a negativa, záleží na konkrétním experimentu, které uspořádání je výhodnější použít. Hlavní nevýhodou uspořádání s bočním posuvem je to, že dovoluje relativně malé prostorové rozlišení oproti uspořádání s úhlovým natočením. To je definované velikostí společného zorného pole kamer. Rozlišení lze zvětšit posunutím maticových sensorů kamer mimo osy objektivů, viz obr. 10, kde vzdálenost mezi středy sensorů je větší, než vzdálenost objektivů. Takové vyosení může být z konstrukčního hlediska velice náročné a používá se zřídka kdy.

Uspořádání s úhlovým natočením pro změnu vyžaduje speciální držák kamer dovolující natočení těla kamery vůči jeho objektivu. Natočení je potřebné pro splnění Scheimpflugovy podmínky [21] a tedy zaostření celé měřicí roviny do roviny obrazové. Dalším faktorem je zvětšení kamer v tomto uspořádání, které není shodné v celém zorném poli vlivem perspektivní projekce. Nerovnoměrné zvětšení však nemusí být bráno jako nevýhoda, ale je důležité s ním počítat a podle toho vybrat vhodnou metodu rekonstrukce. Kromě většího prostorového rozlišení je výhodou uspořádání její variabilita. Je možné umístit kamery z jedné strany laserového řezu, ale také z odlišných stran. Obě kamery pak mohou být umístěny ve směru, který dovoluje zachytit dopředný rozptyl laserového světla zapříčiněný unášenými částicemi. Účinnost rozptylu světla je výrazně vyšší v přímém směru (na rozdíl od bočního rozptylu), a tedy i odstup signál/šum je vyšší.

Pro obě uspořádání je pak nutné brát v potaz vztah mezi pozorovacími úhly kamer a jejich vlivem na chybu měření. Doporučený rozsah pozorovacích úhlů je  $\theta = 30 - 45^\circ$ . Dle grafů je optimální úhel roven  $45^\circ$ . Při tomto úhlu kamer je docíleno stejných velikostí chyb v určení posunutí částic  $\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}, \sigma_{\Delta Z}$ . Pokud je měřená oblast umístěna ve vodě, je optimální úhel  $\theta = 32^\circ$  (rozhraní voda s indexu lomu  $n=1.33$  - stěna nádoby - vzduch).

Jakmile je zvoleno uspořádání, je nutné zvážit, jakým postupem bude provedena rekonstrukce trojrozměrné scény (3D vektorové mapy proudění v dané měřené oblasti), a podle toho následně postupovat při kalibraci stereosnímání. Kalibrace předchází každému měření, jedná se o proces, při kterém jsou nalezeny informace o vzájemných vazbách mezi pozorovanou scénou a jednotlivými kamerami. Rekonstrukce trojrozměrné scény lze provést na základě tří postupů:

- rekonstrukce vycházející z geometrie uspořádání
- rekonstrukce založená na modelu perspektivní kamery
- rekonstrukce založená na polynomickém modelu

První dvě uvedené rekonstrukce nejsou použitelné v případě optického zkreslení měřené oblasti zapříčiněného stěnou nádoby. Je to z důvodu nelineárního a neznámého charakteru tohoto zkreslení v naprosté většině případů. Tyto rekonstrukce si dokážou poradit pouze s perspektivním zkreslením, nebo co se týká rekonstrukce založené na

perspektivním modelu kamery, také se zkrácením v důsledku nedokonalé optiky (viz autokalibrace kamer). Pokud je použit postup rekonstrukce vycházející z geometrie uspořádání je kalibrace stereosnímání provedena změřením či výpočtem několika parametrů na základě kterých je určena trojrozměrná informace o proudovém poli. Jsou to například vzdálenost mezi kamerami, vzdálenost rovin objektivu od objektové roviny, vzdálenost objektové roviny od obrazové, jmenovité zvětšení, ohniska objektivů, pozorovací úhly, atd. Rekonstrukce je vždy provedena pro „narovnané“ obrazy částic. Pokud tomu tak není, tak jako v případě měření v uspořádání s úhlovým natočením, je nutné nejprve provést zpětnou projekci obrazů částic. Následně lze trojrozměrné posunutí v měřené rovině získat např. Willertovou metodou.

Rekonstrukce založená na modelu perspektivní kamery se zaměřuje na nalezení tzv. projekčních matic použitých kamer. Kalibrace stereosnímání je hotová, pokud jsou známy tyto matice. Ty lze získat několika postupy, pro metodiku měření metodou Stereo PIV jsou však vhodné pouze dva: výpočet projekčních matic ze známých umístění bodu v objektovém souřadném systému, nebo na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer. První postup využívá záznamů kalibračního terčíku ve zkoumané oblasti a následnou identifikaci bodů terčíku v těchto záznamech. Stejně tomu je i u rekonstrukce založené na polynomickém modelu. Model je v rámci kalibrace stereosnímání vypočten pro obě kamery.

Existuje několik druhů kalibračních terčíků a záleží znovu na daném experimentu, který použít. Nejvíce využívanými jsou:

- posuvný terčík
- víceúrovňový terčík
- šachovnicový terčík

Posuvný terčík vyžaduje uchycení a precizní posuv v měřené oblasti. Záznam je standardně proveden v pěti polohách podél osy Z objektového souřadného systému, v rozsahu -2 až 2 mm. Druhou variantou terčíku je víceúrovňový terčík. Ten je zaznamenán ve středu laserového řezu a není zapotřebí dalšího posunu. Nejčastěji se využívají dvou až tříúrovňové terčíky, kde jednotlivé úrovně jsou od sebe vzdáleny 1-2 mm. Při záznamu těchto terčíků je žádoucí, aby úhly kamer  $\beta_1, \beta_2$  byly nejlépe nulové, jinak by mohly být kalibrační body v zákrytu za povrchem terčíku. Šachovnicový terčík je na rozdíl od dvou předchozích nutné otáčet v měřené oblasti dle instrukcí daného



komerčního měřicího systému. Není však vyžadováno precizní natočení a je tak možnost ruční manipulace s terčíkem.

Důležitým krokem po zaznamenání kalibračních terčků je identifikace bodů terčíku. Pro co nejlepší identifikaci je důležité, aby celý terčík byl rovnoměrně nasvícen a kamerami zaostřen v každé z pozic při jeho manipulování v průběhu kalibrace. Pokud bylo cílem zaznamenat kalibrační terčík ve středu laserového řezu, tedy v pozici  $Z=0$  je dále nutné, aby celý kalibrační terčík při záznamu ležel co nejpřesněji v rovině určené středem laserového řezu. Ke kontrole správného umístění terčíku vůči řezu a k případné kompenzaci této nepřesnosti slouží postup uvedený v kapitole 2.4.2.

V případě, kdy experimentální uspořádání nedovoluje umístění kalibračního terčíku do měřené oblasti a zaznamenané obrazy částic nepodléhají zkreslení zapříčiněného stěnou měřicí nádoby, je možné využít navrženou metodiku:

- metodika založená na vnitřních a vnějších parametrech kamer

Vnitřní parametry kamery (ohnisková vzdálenost kamer, pozice principiálního bodu, zkosení pixelů, atd), společně s radiálním a tangenciálním zkreslením objektivu lze určit autokalibrací (kapitola 2.2.2). K tomu je použit vytisknutý šachovnicový vzor přilepený např. na pevnou desku, který je zaznamenán v několika polohách, a to nejlépe tak, aby šachovnice zabírala co největší část zorného pole kamery, viz obr. 17. Tento postup je proveden pro obě kamery. Autokalibrace kamer lze provádět nezávisle na uspořádání kamer při experimentu. Kalibrace je provedena jen jednou pro daný typ kamery a objektivu a není ji potřeba provádět na začátku každého měření.

Vnější parametry každé kamery jsou určeny pozicí ohniska objektivu a natočením objektivu v objektovém souřadném systému. K určení natočení kamer je vhodné vytvořit měřicí systém se stupnicí. Vzdálenost ohniska objektivu od objektové roviny lze získat postupem uvedeným v kapitole 3.1.2. Pokud se jedná o experiment, kdy je měřená oblast umístěná v tekutině jiné, než je tekutina, ve které jsou umístěny kamery, je vhodné upravit vnější parametry na základě Snellových zákonů. Je nutné brát v potaz fakt, že rekonstrukce na základě perspektivní kamery je rekonstrukce z projektivního prostoru do euklidovského. Taková rekonstrukce se liší od metrické koeficientem změny měřítka, který lze zjistit z předem známých parametrů daného proudění klasickým 2D PIV měřením.

V případě, kdy experimentální uspořádání nedovoluje pohyb kalibračního terčíku ve měřené oblasti lze použít:

- Metodika založena na polynomickém modelu a Willertově metodě.

Posuvný terčík je při této metodě měření zaznamenán pouze ve středu laserového řezu. Na základě výpočtu polynomického modelu  $n$ -tého řádu je poté provedena zpětná projekce zaznamenaných obrazů částic a Willertovou metodou rekonstruována trojrozměrná informace o proudění v daném řezu. Tato metodika však není vhodná pro použití v přítomnosti výrazného optického zkreslení obrazů částic zapříčiněné stěnou měřené nádoby, při kterém selhávají některé komerční systémy. Je tomu tak například u systému od Dantec Dynamics. Metodika vhodná pro tyto případy je:

- Metodika založena na eliminaci optické zkreslení pomocí polynomického modelu.

Tato metodika vyžaduje prostor pro umístění a manipulaci posuvného kalibračního terčíku do měřené oblasti.

## 6 Závěr

Cíle disertační práce, vytyčené v jejím zadání, byly rozděleny do čtyř hlavních bodů:

- I. Sestavení souboru teoretických a praktických informací o metodě PIV, Stereo PIV a principech trojrozměrné rekonstrukce scény z dvojrozměrných záznamů.
- II. Vytvoření metodiky pro měření metodou Stereo PIV použitelné v experimentálním uspořádání, které nedovoluje umístění kalibračního terčíku do měřené oblasti. Metodika by neměla pro kalibraci kamer vyžadovat náhradní nádobu, posuvný systém pro kamery nebo manipulaci s kalibračním terčíkem před měřenou nádobou.
- III. Vytvoření metodiky pro měření metodou Stereo PIV použitelné v experimentálním uspořádání, které nedovoluje pohyb kalibračního terčíku ve měřené oblasti.
- IV. Vytvoření metodiky pro měření metodou Stereo PIV použitelné v případech, kdy záznamy obrazů částic podléhají optickému zkreslení, se zaměřením na případy s relativně vysokými hodnotami zkreslení, při kterých dostupný komerční měřicí systém selhává.

Disertační práce splnila všechny body zadání, a to následujícím způsobem:

**ad I.** Teoretickým a praktickým informacím jsou věnovány kapitoly 1., 2. a 5. V uvedených kapitolách je popsána metoda PIV, metoda Stereo PIV, trojrozměrná rekonstrukce scény a souhrnné informace včetně doporučení pro experimentální praxi. Autor práce v rámci tohoto bodu vytvořil postup pro kompenzaci chyby v určení pozic bodů v záznamech kalibračního obrazce (viz kapitola 2.4.2). Důvodem byla skutečnost, že v dostupné literatuře neexistuje takový postup.

**ad II.** Autor práce vytvořil metodiku založenou na vnitřních a vnějších parametrech kamer splňující požadavky zadání (viz kapitola 3.1.2), a to v krocích jdoucích za sebou: analýza problematiky a možných postupů (kapitola 3.1.1), návrh metodiky, popis metodiky a vytvořených algoritmů, verifikace navržené metodiky na uměle vytvořených datech simulujících experiment se známým teoretickým výsledkem

(kapitola 3.1.2), ověření metodiky na experimentech a porovnání s dostupným komerčním softwarem (kapitola 3.1.2). Výsledky verifikace jsou uvedeny v tabulce 1. na str. 70. Pro daný rozsah pozorovacích úhlů byla nepřesnost navržené metodiky do 5 %, ve všech složkách vektorů rychlosti proudění. Takové výsledky se dají považovat za velmi dobré z pohledu experimentální praxe. Metodika byla experimentálně ověřena na třech experimentálních úlohách, přičemž na jedné z nich bylo možné použít mimo navržené metodiky i komerční software s klasickou kalibrací pomocí posuvného terčíku. Odchyłka výsledků metodiky a komerčního softwaru byla průměrně rovna 5 % pro pozorovací úhly kamer 30°.

**ad III.** Pro výzkum metodou Stereo PIV, v experimentálním upořádání popsaném v zadání, autor vytvořil metodiku založenou na polynomickém modelu a Willertově metodě (kapitola 3.2). Vývoj metodiky (kapitola 3.2.2) probíhal ve stejných krocích, jako tomu bylo v minulém bodě. Verifikace ukázala, že chyba metodiky je přibližně 3 - 6 % pro daný rozsah pozorovacích úhlů (tabulka 2., str. 87). Relativně vyšší chyba je „daní“ za způsob kalibrace, kterou je nutné provést pouze v jedné rovině v měřené oblasti. I tak je možné považovat výsledky navržené metodiky za velmi dobré, jelikož bez metodiky by nebylo možné v tomto experimentálním uspořádání provést samotné měření naprostou většinou komerčních měřících systémů. Pro experiment umožňující porovnání navržené metodiky s postupem využívající komerční software byla odchyłka ve výsledcích maximálně 9 %.

**ad IV.** Případům, kdy obrazy částic podléhají výraznému optickému zkreslení, je věnována kapitola 4. Autor vytvořil metodiku použitelnou v těchto situacích, tak jak bylo stanoveno zadáním. Metodika je založená na polynomickém modelu třetího / čtvrtého řádu a její vývoj probíhal v posloupnosti stejné, jako v předcházejících bodech. Výsledky verifikace uvedené v tabulce 3. ukazují, že chyba metodiky je maximálně do 5 % pro daný rozsah pozorovacích úhlů. Tyto výsledky se dají považovat za velmi dobré z pohledu experimentální praxe. Metodika byla experimentálně ověřena na třech experimentálních úlohách. Experiment dovolující porovnání výsledků navržené metodiky s výsledky komerčního softwaru ukázal vzájemnou odchyłku přibližně 4,5 %.

### **Přínosy disertační práce pro vědní obor a praxi:**

- Metodika použitelná v experimentálním uspořádání, které nedovoluje umístění kalibračního terčíku do měřené oblasti. Tento postup se ukázal v praxi jako velmi přínosný, jelikož veškeré komerční měřicí systémy vyžadují umístění a záznam terčíku uvnitř měřicí nádoby, a to nemusí být vždy proveditelné. Metodika nevyžaduje náhradní nádobu pro kalibraci kamer, posuvný systém pro kamery a manipulaci s kalibračním terčíkem před měřenou nádobou, jako tomu je u jediného srovnatelného postupu využívajícího tzv. self-calibration, viz [16]. Metodika je přímo vytvořena pro danou problematiku a obsahuje podrobnější verifikaci a experimentální ověření na rozdíl od výše uvedeného postupu.
- Metodika použitelná v situacích, ve kterých nelze pohybovat s kalibračním terčíkem, uvnitř měřené oblasti bez nutnosti použití víceúrovňového kalibračního terčíku a chromatického terčíku, což jsou jediné dohledatelné způsoby kalibrace terčíkem v této situaci.
- V přítomnosti výrazného optického zkreslení záznamů obrazů částic zapříčiněného pozorováním částic uvnitř potrubí / tunelů složitějších tvarů (např. skrze válcové potrubí) selhává vyhodnocení dostupným komerčním měřicím systémem. Přínosem je proto navržená metodika využitelná v těchto situacích.
- Vytvořené algoritmy, které jsou součástí metodik, jsou popsány a volně přístupné. Je možné je libovolně modifikovat a nejedná se o „černou skříňku“, jako tomu bývá u komerčních softwarů.
- Kapitola 5., kterou autor sepsal, nabízí experimentátorovi souhrnné informace a doporučení pro měření metodou Stereo PIV, včetně komplikovaných experimentálních úloh.
- Ucelený soubor informací o metodě Stereo PIV doplněný o teoretické a praktické informace popisující trojrozměrnou rekonstrukci scény z jejich dvojrozměrných záznamů. Tento pohled na danou tematiku je odlišný od zaměření dostupné literatury a předpokladem je proto přínos pro experimentální praxi.

## Seznam použité literatury

- [1] DURST, M., MELLING, A. a WHITELAW J. H. *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry*. Academic Press Ltd, London, 1981. ISBN: 0122252500.
- [2] KOPECKÝ, V. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Brno: Ed. TRIBUN EU s.r.o., 2008. 204 s. ISBN 978-80-7399-357-3.
- [3] KEGALJ, M. a H. P. SCHIFFER. *Endoscopic PIV measurements in a low pressure turbine rig*. HP. Exp Fluids, Germany, 2009. Online ISSN: 1432-1114. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0712-8>
- [4] PRASAD, A. K. *Stereoscopic Particle Image Velocimetry*. Experiments in Fluids 29: Springer, 2000. Dostupné také z: [http://research.me.udel.edu/~prasad/papers/expfl\\_stereo\\_review.pdf](http://research.me.udel.edu/~prasad/papers/expfl_stereo_review.pdf)
- [5] TROPEA, C., A. L. YARIN a J. F. FOSS. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Volume I*. Berlin: Springer, 2000. ISBN 978-3-540-25141-5.
- [6] ADRIAN, R. J. a J. WESTERWEEL. *Particle Image Velocimetry*. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-44008-0.
- [7] JAHANMIRI, M. *Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications*. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2011. ISSN 1652-8549.
- [8] RAFFEL, M., J. WESTERWEEL, C. WILLERT, M. GHARIB a J. KOMPENHANS. *Analytical and experimental investigations of dual-plane particle image velocimetry*. Goteborg: Optical Engineering, 35 (7), 1996, pp. 2067-2074. ISSN 0091-3286.
- [9] LINDKEN, R., J. WESTERWEEL a B. WIENEKE. *Stereoscopic micro particle image velocimetry*. Springer-Verlag: Experiments in Fluids 41, 2006. DOI 10.1007/s00348-006-0154-5.
- [10] OGLE, K. N. *Present Status of Our Knowledge of Stereoscopic Vision*. Springer-Verlag: AMA Arch Ophthalmol, 1958, 755-774. 60(4), DOI 10.1001/archopht.1958.00940080775019.
- [11] SOLOFF, S. M., R. J. ADRIAN a Z. C. LIU. *Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry*. Measurement Science and Technology, 1997, 1441-1454. 8 (12), DOI 10.1088/0957-0233/8/12/008.

- [12] BSIBSI, M. *Advances in Stereoscopic Particle Image Velocimetry and Application to supersonic base flow exhaust plume interaction*. Measurement Science and Technology, 2010, 6929-37. 184 (12), DOI 10.4049/jimmunol.0902419.
- [13] SUÁSTEGUI, L. M. *Overview on Stereoscopic Particle Image Velocimetry*. Distrito Federal, Mexico: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0241-0.
- [14] FOURAS, A., D. L. JACONO a K. HOURIGAN. *Target-free Stereo PIV: a novel technique with inherent error estimation and improved accuracy*. Springer-Verlag, K. Exp Fluids, 2008, 44: 317. ISBN 978-953-51-0241-0. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0404-1>
- [15] FOURNEL, T., J. M. LAVEST, S. COUDERT a F. COLLANGE. *Self-Calibration of PIV Video-Cameras in Scheimpflug Condition*. France, 2004, DOI 10.1007/978-3-642-18795-7\_28
- [16] WIENEKE, B. *Application of Self - Calibration Stereo PIV in Enclosed Measurement Volumes*. Lisbon, Portugal: Proceedings of the 12th international symposium on the application of laser techniques to fluid mechanics, 2004.
- [17] TUROŇOVÁ, B. *Rekonstrukce 3D scény ze stereo obrázků*. Praha, 2008. 48 s. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Dostupné z WWW: <<http://cgg.mff.cuni.cz/thesis/turonova/turonova.pdf>>.
- [18] JACQUOT, P. a P. K. RASTOGI. *Influence of out-of-plane deformation and its elimination in white light speckle photography*. Lisbon, Portugal: Optics and Lasers in Engineering, vol. 2, 1981, p. 33-55. DOI 10.1016/0143-8166(81)90011-7.
- [19] GAUTHIER, V. a M. L. RIETHMULLER. *Application of particle image displacement velocimetry (PIDV) to complex flows: measurements of the third component*. In its Particle Image Displacement Velocimetry, 1988, 44p (SEE N89-17179 09-34).
- [20] ARROYO, M. P. a C. A. GREATED. *Stereoscopic particle image velocimetry*. Measurement science and technology 2.12, 1991, 1181 s.
- [21] ALTENHOFEN, R. E. *Rectification in Manual of Photogrammetry*. Washington, D. C., 1952, 1995, 457 s.
- [22] WILLERT, Ch. *Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows*. Measurement science and technology 8. 12: 1465, 1997.

- [23] PRASAD, A. K. a K. JENSEN. *Scheimpflugstereocamera for particle image velocimetry in liquid flows*. Applied Optics, 1995. 34.30: 7092-9. DOI 1364/AO.34.007092
- [24] GAYDON, M., M. RAFFEL, C. WILLERT a M. ROSENGARTEN. *Hybrid stereoscopic particle image velocimetry*. Experiments in Fluids, 1997, 23.4: 331-334.
- [25] LANG, L. *Rekonstrukce objektu a pozice pozorovatele z 2D pohledů*. Plzeň, 2004. 102 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. WWW: <herakles.zcu.cz/~skala/MSc/Diploma\_Data/DP\_2004\_Lang\_Ladislav.pdf>.
- [26] BARDSLEY, D. a LI, B. *3D Reconstruction Using the Direct Linear Transform with a Gabor Wavelet Based Correspondence Measure*. Technical Report [online]. 2004, [cit. 2011-05-03]. Dostupný z WWW: <bardsley.org.uk/.../3d-reconstruction-using-the-direct-linear-transform.pdf >.
- [27] PETERSEN, T. *A Comparison of 2D-3D Pose Estimation Methods* [online]. Denmark: Aalborg University - Institute for Media Technology, 2008. 76 s. Thesis. Aalborg University 2008. Dostupné z WWW:<<http://www.scribd.com/doc/52970634/A-Comparison-of-2D-3D-Pose-Estimation-Methods#>>.
- [28] LAWSON, N. J. a WU, J. *Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of stereoscopic techniques*. Measurement Science and Technology, 1997, 8.8: 894.
- [29] ZANG, W. a PRASAD, A. K. *Performance evaluation of a Scheimpflugstereocamera for particle image velocimetry*. Applied optics, 1997, 36.33: 8738-8744.
- [30] PRASAD, A. K., R. J. ADRIAN, C. C. LANDRETH a P. W. OFFUTT. *Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation*. Experiments in Fluids, 1992, 13.2-3.pp 105-116.
- [31] GIORDANO, R. *Stereo PIV analysis and application to cylinder wake*. Università degli Studi di Napoli Federico II, Ph. D. dissertation, 2008, 150 s.
- [32] RAFFEL, M., C. WILLERT a J. KOMPENHANS. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. ISBN 978-3-662-03639-6.



- [33] PAVLÍK, D. *Experimentální studie proudění v rozvětvení metodou PIV*. Liberec, 2011. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Kotek, M.
- [34] BOUGUET, Jean-Yves . *Computational vision* [online]. 2010 [cit. 2011-05-03]. Camera Calibration Toolbox for Matlab. Dostupné z WWW: <[www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)>.
- [35] NOVOTNÝ, J. *Nové algoritmy při zpracování dat získaných měření metodou PIV*. Praha, 2009. Disertační práce. České vysoké učení v Praze. Školitel Nožička, J.
- [36] SCHOVÁNEK, P. a V. HAVRÁNEK. *Chyby a nejistoty měření*. 1998. Text k laboratornímu cvičení. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [37] ŠTIGLER, J. Tee junction as a pipeline net element. A new mathematical model *Journal of Mechanical Engineering*. 2006, vol. 57, no. 5. pp. 249-270. ISSN: 0039-2472
- [38] JAŠÍKOVÁ, D., KYSELA, B., KOTEK, M. a KOPECKÝ, V. *The experimental study of the coherent structures generated in the agitated vessels and effected by fluid viscosity*. International Journal of Mechanics 1. vyd. Oregon: North Atlantic University Union, 2015, roč. 9, č. 2015. S. 61 – 68. ISSN 1998-4448.
- [39] GIORDANO, R., T. ASTARITA a G. CARLOMAGNO. *Correction of misalignment errors in stereoscopic PIV systems*. Naples, Italy: XIV A.I.VE.LA. National Meeting, 2006. University of Naples Federico II.
- [40] KYSELA, B., J. KONFRŠT, I. FOŘT a Z. CHÁRA. *CFD Simulation of the Discharge Flow from Standard Rushton Impeller*. International Journal of Chemical Engineering, Volume 2014, 2014, Article ID 706149.

## ***Publikace autora spojené s disertační prací***

- [41] KOTEK, M., D. PAVLÍK, V. KOPECKÝ a D. JAŠÍKOVÁ. Stereoscopic reconstruction of 3D PIV data in circular T-Junction. In: *SCOPUS and Conference proceedings of Experimental Fluid Mechanics Conference in Hradec Králové, Czech Republic, 2012*. DOI 10.1051/epjconf/20134501110.
- [42] PAVLÍK, D., D. JAŠÍKOVÁ, B. KYSELA a V. KOPECKÝ. Three-dimensional reconstruction of 2D PIV data in agitated vessels. In: *Conference proceedings of Experimental Fluid Mechanics Conference in Prague, Czech Republic, 2015*. s. 579-583.
- [43] PAVLÍK, D., P. PROCHÁZKA a KOPECKÝ. Reconstruction of three-dimensional velocity vector maps from two-dimensional PIV data. In: *SCOPUS and Journal of Physics: Conference Series 760 (2016), XXII Fluid Mechanics Conference, Słok-Belchatow, Poland, 2016*. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/760/1/012020.
- [44] URUBA, V., D. PAVLÍK, P. PROCHÁZKA, V. SKÁLA a V. KOPECKÝ. On 3D Flow-Structures behind an inclined plate. In: *SCOPUS and Conference proceedings of Experimental Fluid Mechanics Conference in Mariánské Lázně, Czech Republic, 2016*. s. 884-889. DOI: 10.1051/epjconf/201714302137.
- [45] PAVLÍK, D., V. URUBA a V. KOPECKÝ. Reconstruction of 3D PIV data in complicated experimental arrangements. In: *SCOPUS and Conference proceedings of Experimental Fluid Mechanics Conference in Mariánské Lázně, Czech Republic, 2016*. s. 571-576. DOI: 10.1051/epjconf/201714302090.

### **Zaznamenané citace ke dni: 30.8.2017**

Ad [41] Citováno v publikaci:

- [46] ŠTIGLER, J., R. KLAS a O. ŠPERKA. Characteristics of the T-junction with the equal diameters of all branches for the variable angle of the adjacent branch. In: *SCOPUS and Conference proceedings of Experimental Fluid Mechanics Conference in Kutná Hora, Czech Republic, 2013*. DOI: 10.1051/epjconf/20146702110.

## ***Příloha A***

Jako příloha je vloženo CD, které obsahuje:

- Disertační práci ve formátu .pdf
- Vytvořené algoritmy k navrženým metodikám
- Fotografie experimentů
- Vybrané výsledky experimentů