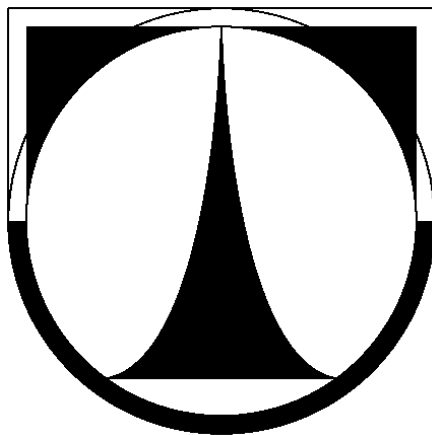


# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



## AUTOREFERÁT 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**

Autor: Ing. David Pavlík

Školitel: Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.

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

## 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 terčů s definovaným obrazcem, který vyžaduje i řada komerčních měřicích systémů. Při kalibraci je terč 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 terče ve zkoumané oblasti, nebo v situaci, kdy není možné samotné umístění terče do oblasti (v tunelu, nádobě, atd.). Problematické je také provedení kalibrace, pokud záznamy terče podléhají určité míře optického zkreslení. Disertační práce se zaměřuje na vytvoření metodik, kterými je možné provést měření metodou Stereo PIV ve zmíněných situacích.

## 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.

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| <i>Úvod</i> .....   | 4  |
| <i>Současný stav metody Stereo PIV</i> .....  | 4  |
| <i>Zadání disertační práce</i> .....  | 6  |
| <b>1 Teorie</b> .....   | 6  |
| 1.1 Metoda Stereo PIV .....   | 6  |
| 1.1.1 Možnosti uspořádání měřicího systému .....  | 7  |
| 1.2 Rekonstrukce trojrozměrné scény .....   | 9  |
| 1.2.1 Rekonstrukce vycházející z geometrie uspořádání.....                              | 9  |
| 1.2.2 Rekonstrukce založena na modelu perspektivní kamery .....                         | 11 |
| 1.2.3 Rekonstrukce založena na polynomickém modelu .....                                | 12 |
| 1.3 Možnosti kalibrace stereo–snímání .....   | 14 |
| <b>2 Vývoj metodik Stereo PIV pro výzkum v komplikovaných uspořádáních</b> .....        | 15 |
| 2.1 Metodika založena na znalosti vnitřních a vnějších parametrů kamer.....             | 15 |
| 2.2 Metodika založena na polynomickém modelu a Willertově metodě .....                  | 25 |
| 2.3 Metodika založena na eliminaci optického zkreslení pomocí polynomického modelu..... | 32 |
| <b>3 Závěr</b> .....  | 42 |
| <i>Seznam použité literatury</i> .....  | 42 |
| <i>Publikace autora spojené s disertační prací</i> .....                                | 46 |

## 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 Micro-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 z hlediska její výpočetní náročnosti, která již není takovou překážkou, jakou byla na začátku svého rozvoje. Existuje totiž několik komerčních produktů obsahujících kompletní měřící 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 měřící systémy ke kalibraci stereo-snímání využívají terč s definovaným obrazcem. Obrazec je zaznamenán v několika polohách podél osy, která je standardně zvolena kolmo na měřící 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 terčíku patří tzv. posuvný terčík [12]. Jedná se o rovnou destičku s obrazcem tvořeným černými body na bílém pozadí. Body mají definované rozestupy a velikosti. Terčík 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 terčík, jedná se znovu o rovnou destičku, kde však obrazec není tvořen body, ale čtvercovými poličky o definované velikosti a počtu. Takový terčík je zaznamenán ve středu laserového řezu a několika dalších polohách vznikajících natočením terčíku podle pravidel daného komerčního softwaru. Další používanou variantou kalibrace je tzv. více úrovněový terčík, u kterého není nutný pohyb uvnitř zkoumané oblasti [12]. Terčík je tvořen obrazcem stejným jako u posuvného terčíku, 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 terčíku ve zkoumané oblasti (výjimkou je využití více úrovněového terčíku [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 měřícího 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 měřící systémy vypořádat, je 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 části nádob/tunelů. Optické zkreslení je vždy nutné definovat, pokud jeho parametry již neznáme. Dostupné měřící systémy i k tomuto využívají výše zmíněné záznamy kalibračních terčíků [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 měřící systém od Dantec Dynamics (včetně softwaru Dynamic Studio). 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:

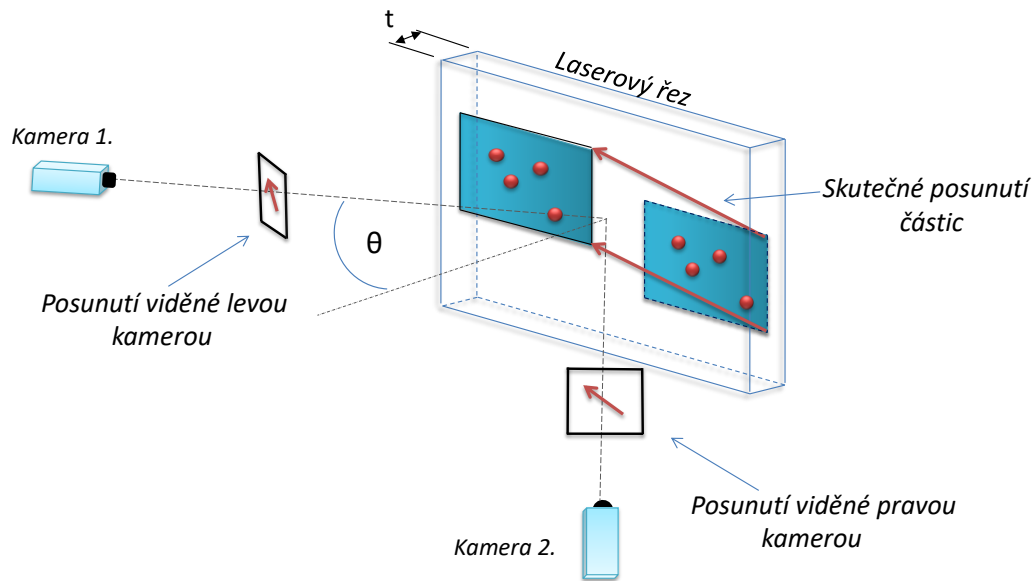
- Sestavit soubor teoretických a praktických informací o metodě PIV, Stereo PIV a principech trojrozměrné rekonstrukce scény z dvojrozměrných záznamů. Tyto informace jsou potřebné k analýze možných postupů při měření v komplikovaných experimentálních uspořádáních a k vytvoření metodik vytyčených v dalších 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 Teorie

Kapitola se zaměřuje na teoretické informace o metodě Stereo PIV a principech trojrozměrné rekonstrukce scény z dvojrozměrných záznamů.

### 1.1 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. 1. Kamery tak zaznamenají odlišný dvojrozměrný obraz proudového pole, kde je každý zpracován obdobným postupem jako u konvenční metody PIV [2]. Na základě těchto informací a tzv. kalibrace stereo-snímání je zrekonstruováno skutečné trojrozměrné posunutí sytících částic, viz kapitola 1.2. 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].

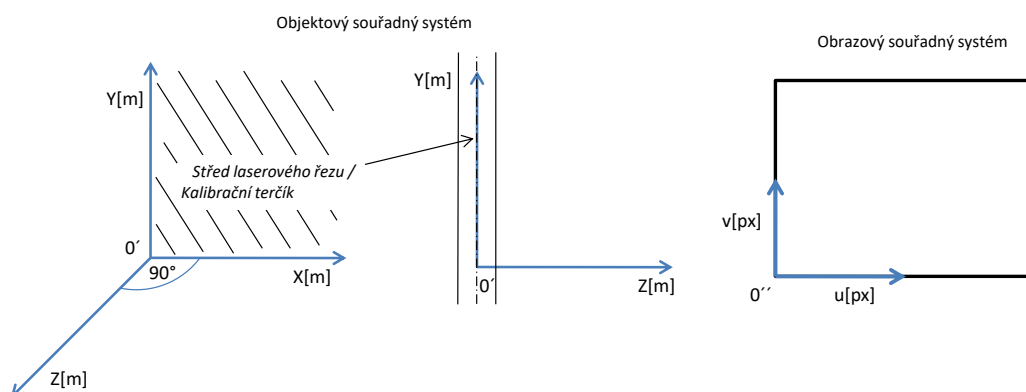


Obr. 1: Princip metody 3D PIV [22]

## Definování souřadných systémů

Pro následující teoretický výklad a trojrozměrnou rekonstrukci je nutné definovat souřadné systémy kamer a pozorované scény. Tzv. objektový souřadný systém (obr. 2) 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 (měřicí rovinu). Pozice počátku v měřicí rovině může být dále určena kalibračním terčíkem (viz kapitola 1.3).

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. 2.



Obr. 2: Souřadné systémy

### 1.1.1 Možnosti uspořádání měřicího systému

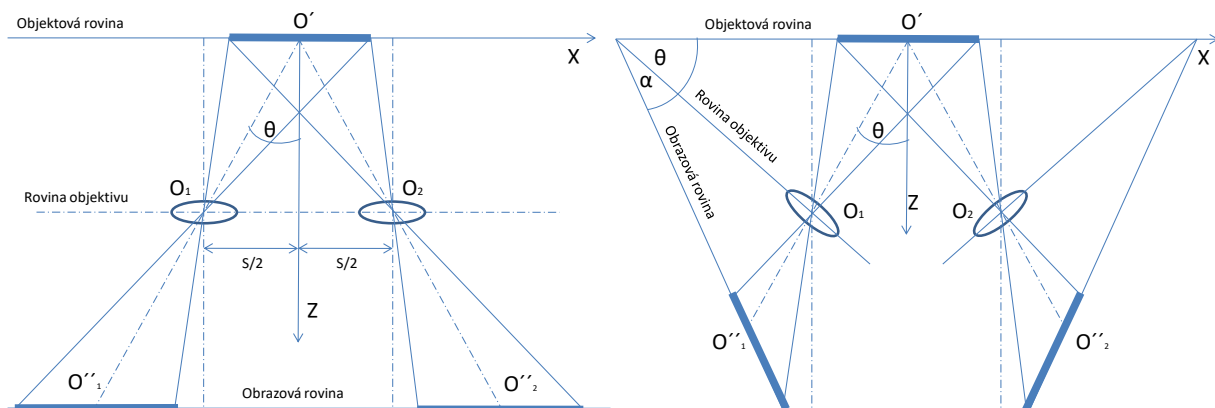
Kamery použité při snímání proudového pole mohou být uspořádány, vzhledem k měřené oblasti, dvěma způsoby [4]: uspořádání s bočním posuvem, uspořádání s úhlovým natočením. Existují další uspořádání společně s postupy, vycházející z konvenční metody PIV, díky kterým je možné získat



trojrozměrnou informaci o proudovém poli. Tyto postupy nejde striktně zařadit do metodiky Stereo PIV a jsou popsány v [4].

### Uspořádání s bočním posuvem

Na obr. 3 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 bylo 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. 3, kde vzdálenost mezi středy senzorů je větší, než vzdálenost objektivů. Takové vyosení může být z konstrukčního hlediska velice náročné a používá se zřídka kdy.



Obr. 3: Uspořádání s bočním posuvem kamer včetně vyosení detektorů kamer (nalevo), uspořádání s úhlovým natočením splňující Scheimpflugovu podmínku [4]

### Uspořádání s úhlovým natočením

Jak ukazuje obr. 3 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  $Z$ . 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 [20]. Podmínka je dodržena, pokud obrazová a objektová rovina i rovina objektivu kamery se navzájem protínají ve společné přímce v prostoru, viz obr. 3 v pravé části. 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].

Perspektivní projekce a specifické umístěním kamer má dále za následek transformaci zaznamenané scény (perspektivní zkreslení). Zkreslení je nutné definovat před trojrozměrnou rekonstrukcí (kapitola 1.3).

## 1.2 Rekonstrukce trojrozměrné scény

Kamery uspořádané dle možností uvedených v předchozí kapitole, zaznamenají obrazy částic (ve stejný časový okamžik), ze kterých je vypočtena dvojice dvojrozměrných vektorových map proudění [2]. 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 ji 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 tomto 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.

### 1.2.1 Rekonstrukce vycházející z geometrie uspořádání

Na obr. 4 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:

$$\Delta Z = \frac{-d_0(\Delta X_1 - \Delta X_2)}{M_j S - (\Delta X_1 - \Delta X_2)}, \quad (1)$$

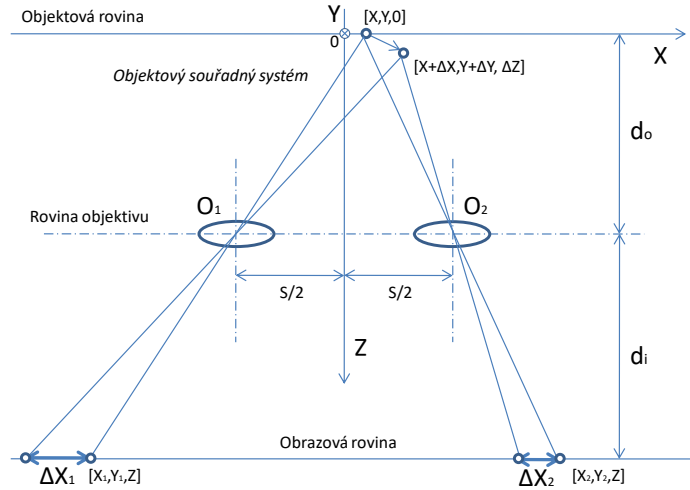
$$\Delta X = \frac{\Delta X_1 \left(X - \frac{S}{2}\right) - \Delta X_2 \left(X + \frac{S}{2}\right)}{M_j S - (\Delta X_1 - \Delta X_2)}, \quad (2)$$

$$\Delta Y = \frac{-Y \Delta Z}{d_0} + \frac{\Delta Y_1 - \Delta Y_2}{2M_j} \left(\frac{\Delta Z}{d_0} - 1\right), \quad (3)$$

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:

$$M_j = X/X_1 = Y/Y_1 = d_i/d_o. \quad (4)$$

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 proměnlivé podél obrazových rovin [4].



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

Pro uspořádání splňující Scheimpflugovu podmínku (viz obr. 3) lze použít vztahy pro zpětnou projekci (5), (6), 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:

$$X = \frac{f X_1 \sin \alpha}{M_j \sin \theta (X_1 \sin \alpha + f M_j)}, \quad (5)$$

$$Y = \frac{f X_1}{X_1 \sin \alpha + f M_j}, \quad (6)$$

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 1.2.3.

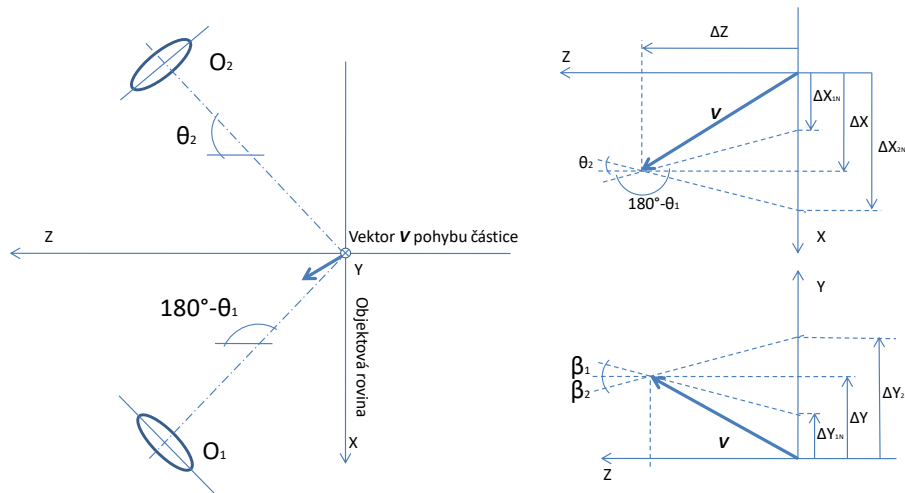
Po narovnání obrazů do objektové roviny získáme nové hodnoty posunutí zaznamenané částice  $(\Delta X_{1N}, \Delta Y_{1N})$ , odpovídající záznamu z kamery 1 a  $(\Delta X_{2N}, \Delta Y_{2N})$  z kamery 2. Skutečné trojrozměrné posunutí je možné získat na základě vztahů (7), (8), (9), které vycházejí z jednoduché geometrie znázorněné na obr. 5.

$$\Delta X = \frac{\Delta X_{2N} \tan(\theta_1) - \Delta X_{1N} \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \quad (7)$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta Y_{1N} + \Delta Y_{2N}}{2} + \frac{\Delta X_{2N} - \Delta X_{1N}}{2} \left( \frac{\tan(\beta_1) - \tan(\beta_2)}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \right) \quad (8)$$

$$\Delta Z = \frac{\Delta X_{2N} - \Delta X_{1N}}{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2)} \quad (9)$$

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. 5: Geometrie uspořádání s úhlovým natočením [12]

### 1.2.2 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], [21]

$$x = PX, \quad (10)$$

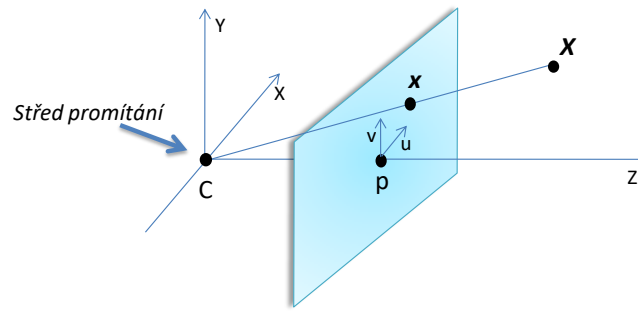
kde  $P$  je projekční matice kamery o rozměrech  $3 \times 4$  a hodnosti 3.

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. Z geometrických transformací je projektivní ta nejobecnější. Obsahuje největší množství transformací (otočení, posunutí, atd.), ale zároveň mají nejmenší počet invariantů [21]. Mezi projektivní a euklidovskou transformací je dále transformace afinní a metrická.

Na obr. 6 je znázorněn základní model projekce uvažované 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 také 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)

$$(X, Y, Z) \rightarrow \left( \frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z} \right). \quad (11)$$



Obr. 6: Model perspektivní kamery [17]

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

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

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. 2. 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  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f\sigma & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f\tau & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\pi & 0 & p_x \\ 0 & f\tau & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{I}|0] = \mathbf{K}[\mathbf{I}|0], \quad (13)$$

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 (14). Vnější parametry definují orientaci a polohu soustavy kamery v prostoru. Orientaci reprezentuje rotační matice  $\mathbf{R}$  rozměru  $3 \times 3$  (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 (angl. scale factor).

$$\mathbf{P} = \mu \mathbf{K} \mathbf{R} [\mathbf{I} | -\mathbf{t}] \quad (14)$$

### 1.2.3 Rekonstrukce založena na polynomickém modelu

Model perspektivní kamery nedokáže popsat nelineární jevy, jako je distorze obrazu způsobená pozorováním objektů, například skrze válcové sklo nebo zkreslení obrazu zapříčiněné nedokonalou

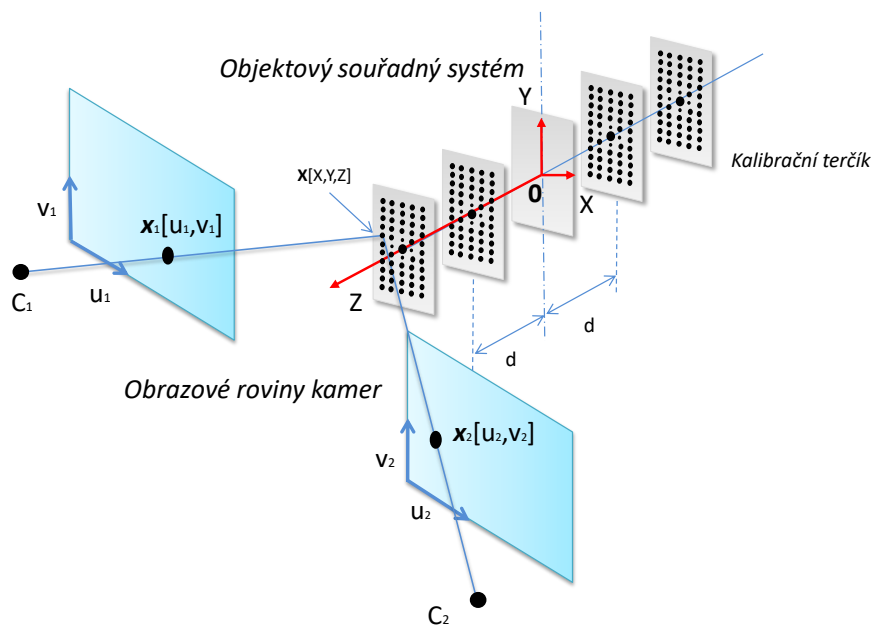
optikou bez dalších úprav, jakou je autokalibrace. V těchto případech je výhodné použít polynomičtý obrazový model  $n$ -tého řádu, který má tvar [11]:

$$F(u, v) = \sum_{i=0, j=0, k=0}^{i=n, j=n, k=n} \mathbf{A}_{i,j,k} X^i Y^j Z^k, \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = & \mathbf{A}_{000} + \mathbf{A}_{100}X + \mathbf{A}_{010}Y + \mathbf{A}_{001}Z \\ & + \mathbf{A}_{110}XY + \mathbf{A}_{101}XZ + \mathbf{A}_{011}YZ \\ & + \mathbf{A}_{200}X^2 + \mathbf{A}_{020}Y^2 + \mathbf{A}_{002}Z^2 \\ & + \mathbf{A}_{300}X^3 + \mathbf{A}_{210}X^2Y + \mathbf{A}_{201}X^2Z \\ & + \mathbf{A}_{030}Y^3 + \mathbf{A}_{120}XY^2 + \mathbf{A}_{021}Y^2Z \\ & + \mathbf{A}_{102}XZ^2 + \mathbf{A}_{012}YZ^2 + \mathbf{A}_{111}XYZ. \end{aligned} \quad (16)$$

Model není určen žádnými fyzikálními jevy, ale je stanoven zcela empiricky. Pro polynomičtý model (16) 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 a polohou vůči středu souřadného systému, viz kapitola 1.3. Pokud je záznam proveden současně pro obě kamery, které jsou uspořádány dle možností v kapitole 1.1.1, jedná se o tzv. kalibraci stereo-snímání. Na obr. 7 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.



Obr. 7: Záznam posuvného kalibračního terčiku

Neznámé vektory  $\mathbf{A}_{ijk}$  jsou vypočteny pro každou kameru. Na obr. 7 je znázorněna projekce bodu  $X$  kalibračního obrazce do jednotlivých obrazových rovin kamer. Trojrozměrnou informaci o pozici tohoto bodu (nebo sytící částice na tomto místě) lze ze známých pozic  $x_1$  a  $x_2$  a známých

koeficientů  $A$  určit triangulací [17]. Pro každý bod  $X$  (v zorném poli obou kamer) lze sestavit soustavu čtyř nelineárních rovnic na základě vztahu (16).

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

### 1.3 Možnosti kalibrace stereo–snímání

Každému měření metodou Stereo PIV 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 1.2.1), použitím kalibračního terčíku nebo projekčních matic získaných bez využití terčíku (kapitola 1.2.2). Druhá varianta je využívána v naprosté většině měření. Základem takové kalibrace je záznam bodů kalibračního terčíku 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). Nejvhodnější postup je provést kalibraci přibližně v rozmezí  $\pm 2$  mm kolem středu laserového řezu ( $Z=0$ ). Existuje několik možností kalibračního terčíku, mezi nejpoužívanější patří:

#### Posuvný terčik

Jedná se o rovinný terčik s definovaným vzorem kalibračních bodů (teček), který 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, viz obr. 7. Terčik obsahuje tři druhy bodů: centrální bod, pro který ve středové pozici platí  $X = 0, Y = 0, Z = 0$ , čtyři značky os určující směr os  $X$  a  $Y$  objektového souřadného systému a hlavní body.

#### 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 je v ostatních případech. 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. Terčik lze 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.

#### Šachovnicový terčik

Terčik s šachovnicovým vzorem je další využívaný způsob kalibračního terčíku. Místo bodů 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 umístěním speciálních políček. Záznam terčíku může být proveden postupem obdobným jako u posuvného terčíku nebo postupem určeným komerčními měřicími systémy, který je založen na rotaci terčíku v místech laserového řezu.

## **2 Vývoj metodik Stereo PIV pro výzkum v komplikovaných uspořádáních**

Teoretické a praktické informace o metodě Stereo PIV a trojrozměrné rekonstrukci scény z dvojrozměrných záznamů byly v následující kapitole použity pro návrh metodik měření metodou Stereo PIV v komplikovaných experimentálních uspořádáních.

Jak již bylo uvedeno v předcházející kapitole, výzkumu proudění metodou Stereo PIV předchází vždy kalibrace stereo-snímání. V naprosté většině experimentálních měření je ke kalibraci využito terčík s definovaným obrazcem. Body terčíku jsou zaznamenány v několika polohách podél osy Z objektového souřadného systému [11]. Varianty terčíků jsou popsány také v předcházející kapitole. Tento postup kalibrace je vyžadován dostupnými komerčními měřicími systémy pro měření metodou Stereo PIV, jako například od společností Dantec Dynamics, LaVision nebo TSI. Při použití komerčních systémů je tedy zásadní přístup do zkoumané oblasti z důvodu umístění terčíku a pohybu s ním.

V komplikovaných experimentálních úlohách může dojít k situacím, kdy není možný precizní pohyb posuvného terčíku nebo rotace šachovnicového terčíku v oblasti, a nebo dokonce není možné využít kalibrační terčík, protože ho nelze umístit do zkoumané oblasti. K tomu dochází většinou v uzavřených prostorech nádob, potrubí či tunelů. Další komplikace nastávají v přítomnosti výrazného optického zkreslení v zaznamenaných obrazech částic. Je tomu tak například při pozorování částic uvnitř potrubí složitějších tvarů nebo skrze rozdělovací části potrubí.

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 vytvořených algoritmů
- verifikace metodiky na uměle vytvořených datech simulujících experiment se známým teoretickým výsledkem
- ověření na experimentálních úlohách a porovnání s výsledky s dostupným komerčním řešením

V rámci autoreferátu je popis vývoje zkrácen. Obsahuje pouze popis navržené metodiky, vytvořených algoritmů a výsledky její verifikace a experimentálního ověření.

Pro měření bez možnosti využití kalibračního obrazce, byla navržena metodika založená na znalosti vnitřních a vnějších parametrů kamer (kapitola 2.1), pro měření bez možnosti pohybu s kalibračním obrazcem byla navržena metodika na základě polynomického modelu a Willertovy metody (kapitola 2.2). V přítomnosti výrazného optického zkreslení záznamů částic je použitelná navržená metodika na základě polynomického modelu (kapitola 2.3).

### **2.1 Metodika založená na znalosti vnitřních a vnějších parametrů kamer**

V této kapitole je popsána navržená metodika použitelná v případech, kdy nelze umístit kalibrační terčík do měřené oblasti.



Metodika je založena na modelu perspektivní kamery popsaném v kapitole 1.2.2. Vztah (14) 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 kamery [15]. 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. Stejný postup je opakován pro druhou kameru. Autokalibrace kamer lze provádět nezávisle na uspořádání kamer při experimentu. Ze záznamů šachovnicového terčíku jsou vypočteny hledané parametry. K výpočtu lze použít také algoritmy [23] 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 1.1.1. Pokud se jedná o uspořádání s úhlovým natočením, kamery je potřeba zaostřit v souladu s Scheimpflugovou podmínkou. Zorná pole kamer by se měla co nejvíce překrývat. Vnější parametry každé kamery jsou určeny vzdáleností  $t$  ohniska objektivu od středu objektového souřadného systému a natočením objektivu  $\mathbf{R}$  v objektovém souřadném systému.

K určení natočení kamery je vhodné vytvořit měřicí systém se stupnicí na nepohyblivé základně držáku kamery a ukazateli umístěným 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, skrze daný objektiv zaostřený na nekonečno, zobrazován na stínítko. 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

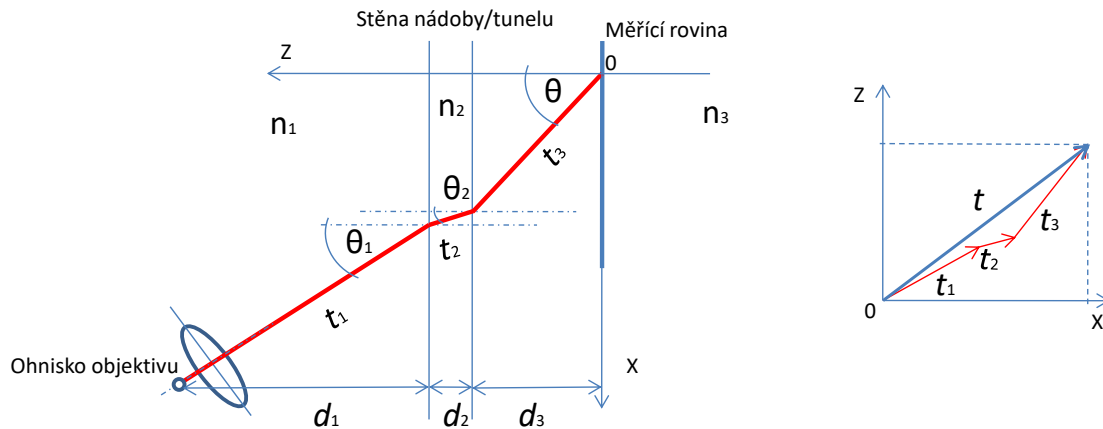
Ze získaných vnitřních a vnějších parametrů je sestavena projekční matice příslušné kamery. Stejně tak je určena projekční matice druhé z kamer měřicího systému. Následně je možné provést samotné měření. Vyhodnocení záznamů sytících částic v měřené oblasti je provedeno klasickým způsobem pro 2D PIV [2]. 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  $t + \Delta t$ . Každý vektor ve společném zorném poli kamer 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 [17] odpovídajících bodů je vypočten trojrozměrný vektor rychlosti proudění v dané vyhodnocované oblasti. Stejný postup je proveden pro každou dvojici vektorů ze společného zorného pole kamer.

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. 8, 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. 8: 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:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\sin \theta_1 \frac{n_1}{n_3}\right). \quad (17)$$

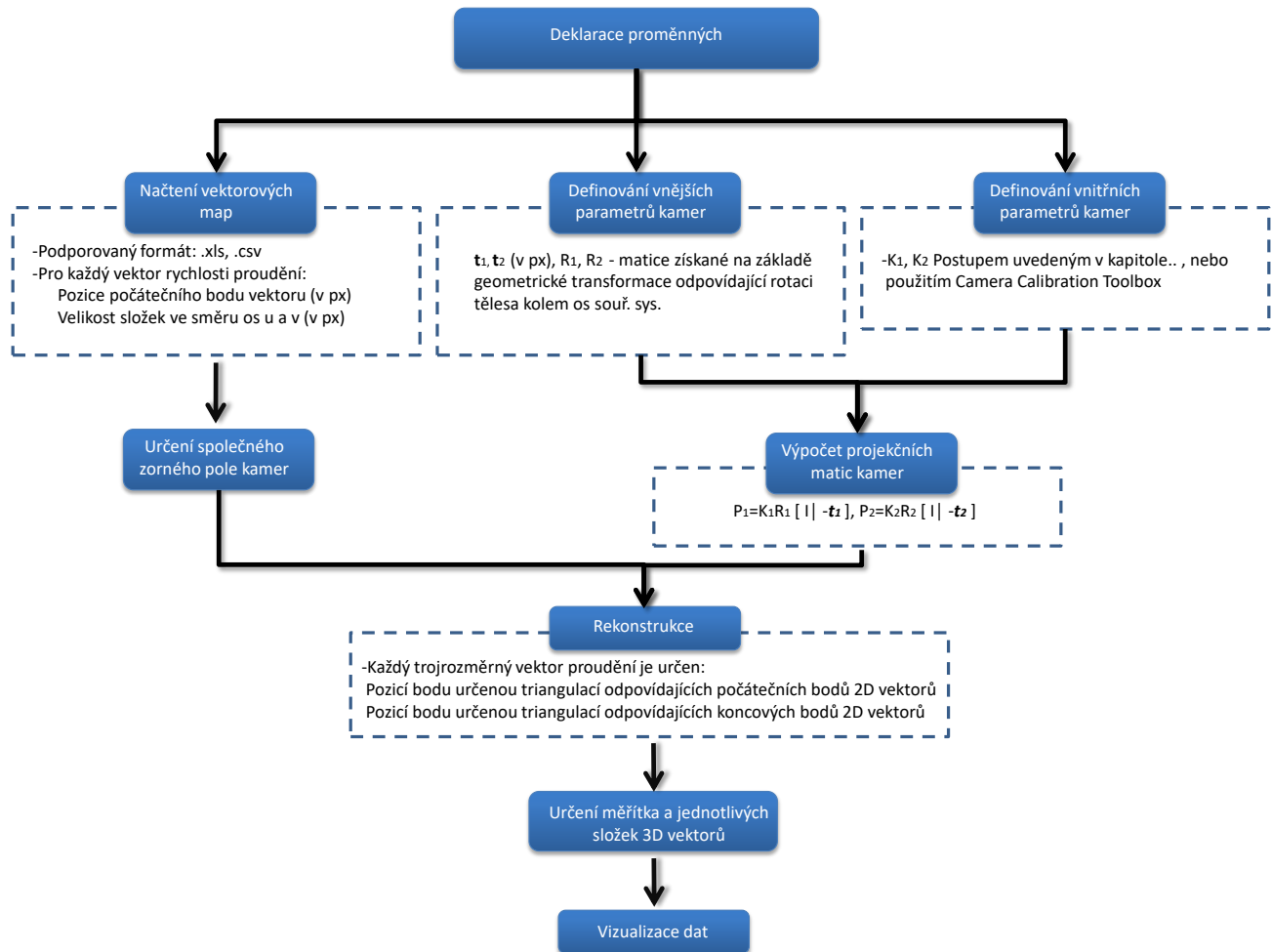
Vektor  $\mathbf{t}$  udávající polohu ohniska kamery v objektovém souřadném systému lze získat ze vztahu:

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} d_3 \tan \theta + d_2 \tan \theta_2 + d_1 \tan \theta_1 \\ 0 \\ d_1 + d_2 + d_3 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Vzdálenost  $d_3$  mezi vnitřní stranou stěny nádoby a měřicí 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 měřicí rovinu. Poté posunem kamery zaostříme na stěnu nádoby (nebo přiložený papír či destičku). Z uražené vzdálenosti kamery na traverzéro 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 v rámci autoreferátu popsány hlavní body algoritmů diagramem znázorněným na obr. 9. Všechny algoritmy jsou umístěny do přílohy disertační práce.



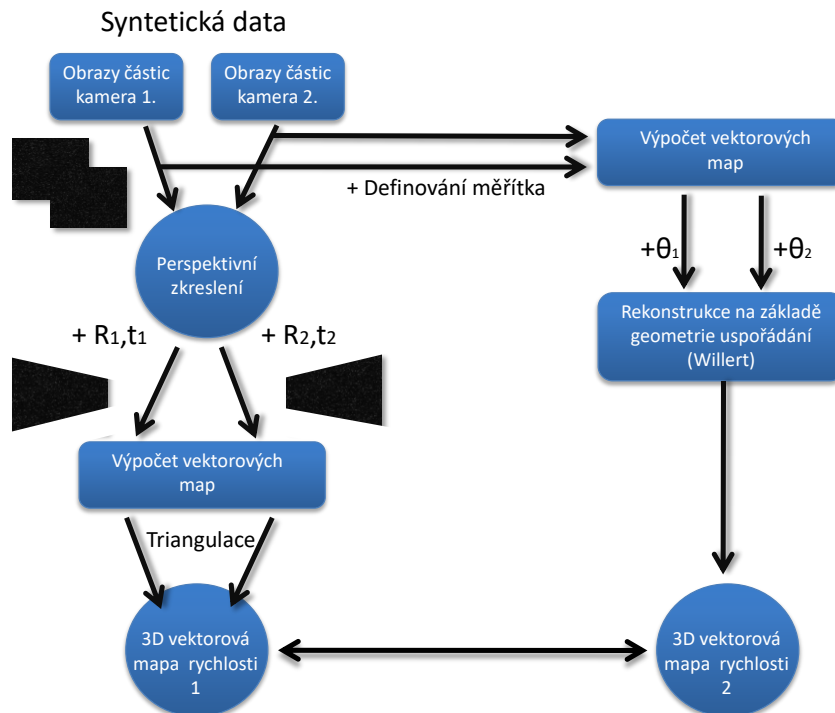
Obr. 9: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě vnitřních a vnějších parametrů kamer

## 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 1.2.1. 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

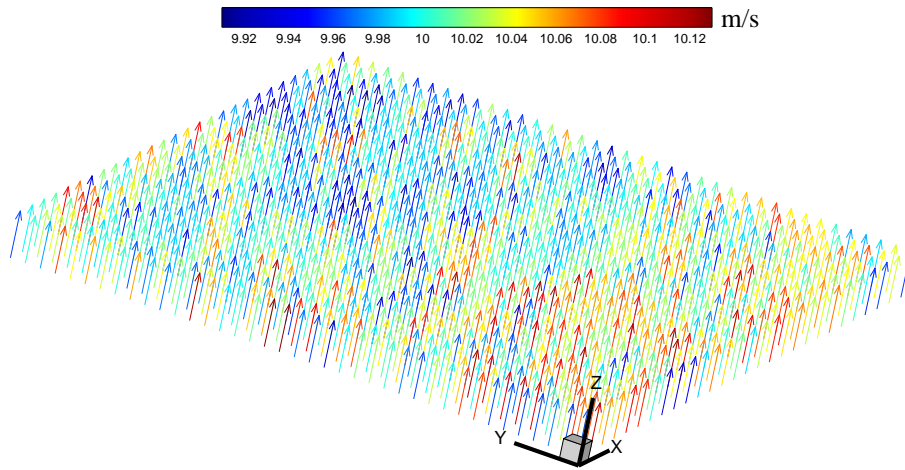
vnější parametry kamer na základě experimentů (s využitím posuvného kalibračního terčíku zaznamenaného v pěti polohách a polynomického modelu třetího řádu pro kalibraci, chyba v určení pozic bodů terčíku  $< 0.1 \text{ px}$ ). Ze zkreslených obrazů částic byla vypočtena dvojice vektorových map (odpovídající 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 DynamicStudios. Chyba v určení posunutí částic pomocí adaptivní korelace a zvolených parametrů obrazů částic:  $\pm 0.05 \text{ px}$  (viz [24]). Tato chyba je pro obě rekonstrukce shodná a jejich vliv na verifikaci metodiky se vyruší. Z vektorových map byla výše uvedeným postupem rekonstruována trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění.



Obr. 10: Proces verifikace navržené metodiky

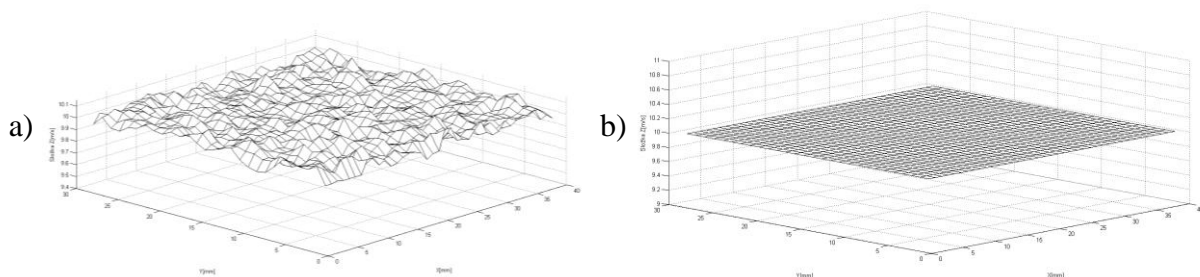
Výsledná mapa (obr. 31) byla porovnána s trojrozměrnou vektorovou mapou získanou výpočtem na základě geometrie uspořádání (obr. 32), vztahy (7), (8), (9), kde bylo potřeba dosadit pozorovací úhly kamer a definovat měřítko v obrazech (náhodně zvoleno a pro oba obrazy shodné). Výpočet byl proveden v programovém 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. Detailnější popis parametrů verifikace je uveden v kompletním textu.



Obr. 11: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data zrekonstruovaná navrženou metodikou

Na obr. 11 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 směru 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. 12b). Na obr. 12 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  $\sigma_{\Delta Z} / \sigma_{\Delta X} = \sigma_{\Delta Z} / \sigma_{\Delta Y} = 1 / \tan \theta$  jsou odvozeny chyby  $\sigma_{\Delta X}, \sigma_{\Delta Y}$  v určení ostatních složek. Uvedený vztah vychází ze studie zabývající se analýzou chyb metody Stereo PIV [4].



Obr. 12: 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<br>$\theta_1 = \theta_2 = \theta$ [°] | Chyba ve složce vektoru<br>rychlosti ve směru osy $Z$ | Chyba ve složce vektoru<br>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  $0,5\text{ mm}$  [25].

Tabulka 1. platí i pro případ, kdy měřená oblast je umístěna v tekutině jiné, než je pracovní prostor kamer. Je však potřeba upravit pozorovací úhly kamer dle vztahu (17).

*Verifikace navržené metodiky byla provedena pro pozorovací úhly kamer  $\alpha_1 = \alpha_2, \theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ . 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 měřicí 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 výsledky experimentů jsou vloženy do přílohy disertační práce.

## Experimentální výzkum proudění za Glauert–Goldschmied profilem

Tento výzkum probíhal v průběhu autorovy stáže v Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR. Glauert–Goldschmied profil (obr. 13) 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-attachment point). Docházeli k separaci proudění za profilem, vytváří se tak 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*

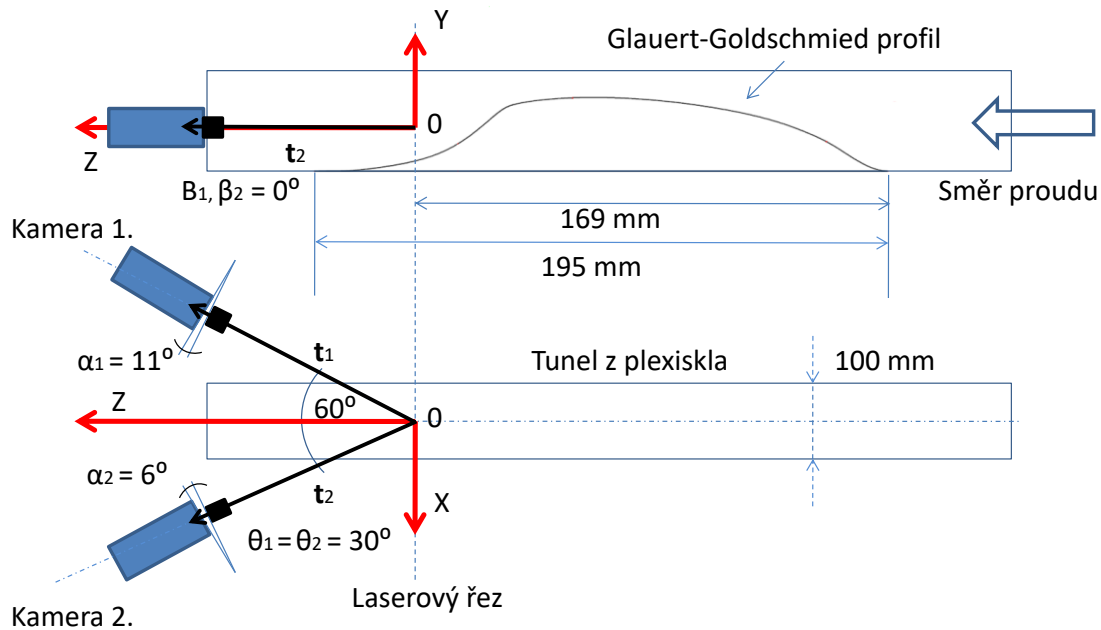
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Wave Pegasus Nd: YLF, 527 nm. Maximální frekvence 10 kHz. Energie jednoho pulsu 10 mJ pro frekvenci 1kHz (tedy 10W na jednu dutinu laseru).

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.

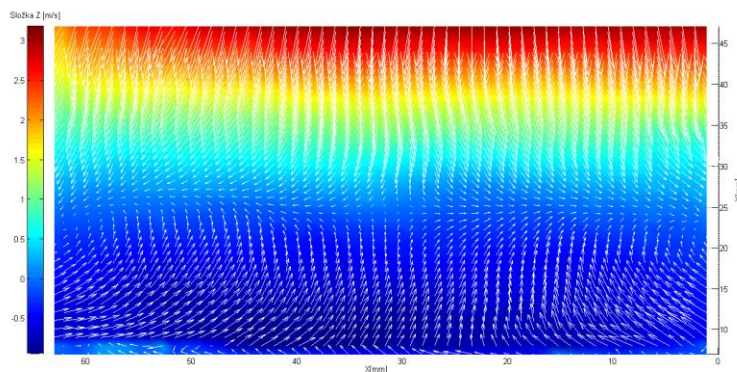
Rychlost proudění vzduchu (měřeno za vstupem do tunelu): 5 m/s.



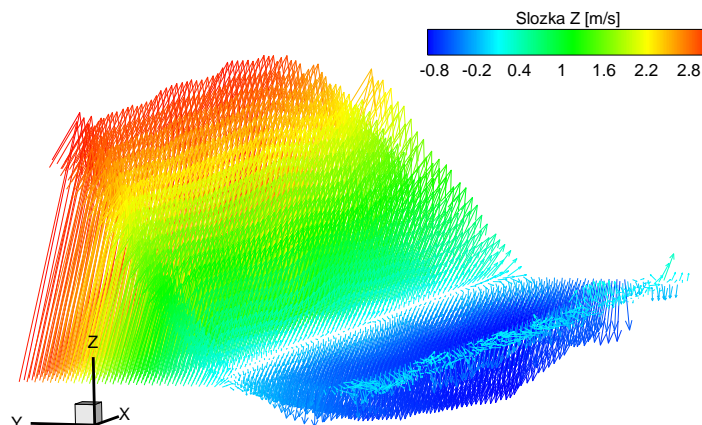
Obr. 13: Uspořádání měřicího systému

### Výsledky experimentu

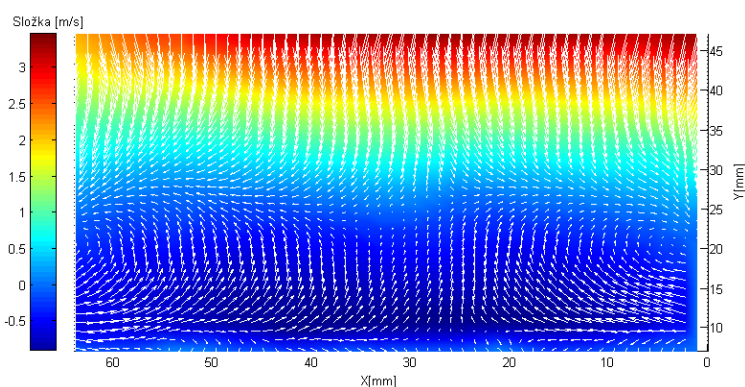
Na obr. 14 je znázorněn jeden z výsledků experimentu navrženou metodikou ve formě dvojrozměrné vektorové mapy rychlosti proudění (definované složkami  $X$ ,  $Y$ ), včetně skalární mapy na pozadí odpovídající složce  $Z$  vektorů rychlosti proudění. Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění je vyobrazena na obr. 15. 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. 16).



Obr. 14: 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)



Obr. 15: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)



Obr. 16: 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 lišily od klasického postupu s využitím kalibračního terčíku a komerčního softwaru (DynamicStudia) následovně:

$$\text{Složka } X_{NM} = \text{Složka } X_{DS} \pm 0,005 \text{ ms}^{-1}, \quad (18)$$

$$\text{Složka } Y_{NM} = \text{Složka } Y_{DS} \pm 0,015 \text{ ms}^{-1}, \quad (19)$$

$$\text{Složka } Z_{NM} = \text{Složka } Z_{DS} \pm 0,115 \text{ ms}^{-1}, \quad (20)$$

kde složka vektoru rychlosti s indexem DS je získána DynamicStudiem, složka vektoru rychlosti s indexem NM odpovídá výpočtu navrženou metodikou.

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 postupu uvedeného v kapitole 2.1. Pozice ohniska objektivů kamer byla určena experimentálně. Uspořádání měřicího systému je znázorněno na obr. 17.

### Použité komponenty a uspořádání měřicího systému

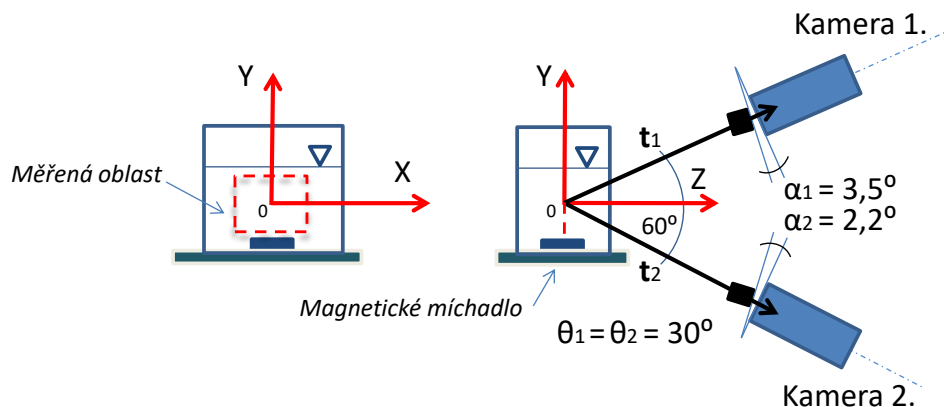
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Wave Gemini Nd: YAG, 532 nm. Použitá frekvence pulsů 1 kHz.

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  $20\mu\text{m}$  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.

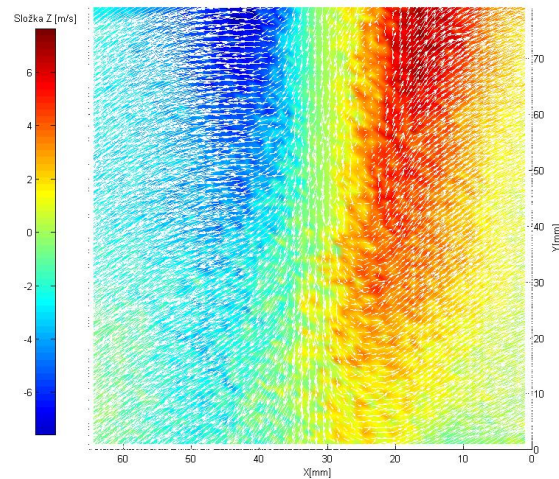
Rychlost otáčení míchadla: 300 ot/min.



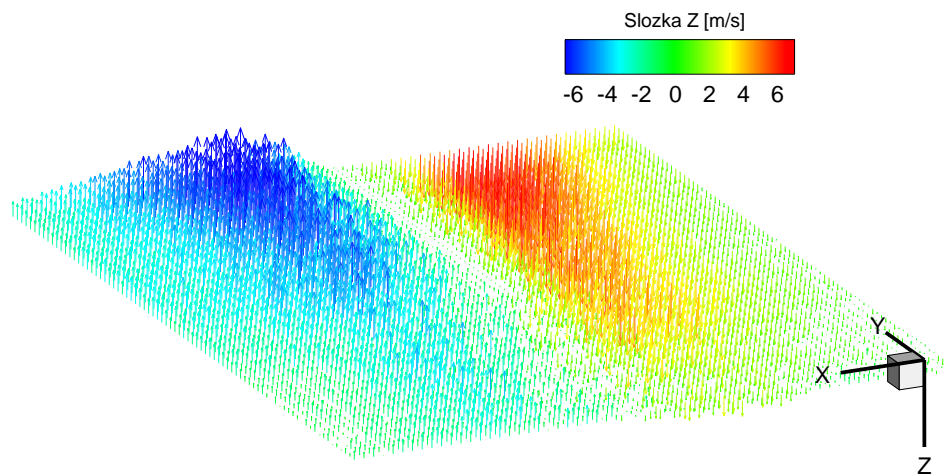
Obr. 17: Uspořádání měřicího systému

### Výsledky experimentu

Na obr. 18 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. 19. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 200 vektorových map. Změna měřítka  $\mu$  byla zjištěna měřením metodou 2D PIV, které předcházelo popsanému experimentu.



Obr. 18: Dvozměrná 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)



Obr. 19: Trojrozměrná vektorová mapa 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. 18 a 19. 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 uvedených experimentů byla metodika použita pro experimentální výzkum proudění za nakloněnou deskou [33]. Navrženou metodiku lze považovat za ověřenou experimentálním měřením.

## 2.2 Metodika založena na polynomickém modelu a Willertově metodě

Pokud není k dispozici víceúrovňový či dvouvrstvý chromatický terčík, nebo k tomu potřebná softwarová vyhodnocovací část, je možné nahradit pohyb posuvného terčíku při kalibraci stereosnímání pohybem kamer o stejný krok podél osy  $Z$  objektového souřadného systému. Pomyslný

posun terčíku 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 terčíku.

Pro situace, kdy experimentátor nevyužije jednu z výše nestandardních, však existujících postupů, je možné využít navrženou metodiku popsanou v této kapitole.

## Sestavení měřicího systému a umístění kalibračního terčíku

Prvním krokem po sestavení měřicího systému, dle možností uvedených v kapitole 1.1.1, je umístění posuvného kalibračního terčíku do měřicí roviny (do středu laserového řezu). Centrální bod a značky os terčíku poté 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 1.2.3. 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 pořizovaných záznamech. 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. Velký důraz je proto kladen na rovnoměrné nasvícení kalibračního terčíku při záznamu. Pokud tomu tak není, je nutné použít metod adaptivního prahování.

Po kalibraci je terčík vyjmut z měřicí roviny a je možné provést měření. Záznamy sytících částic jsou následně „narovnané“ na základě získaných polynomických modelů a vyhodnoceny klasickým způsobem pro 2D PIV [2]. 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  $t + \Delta t$ .

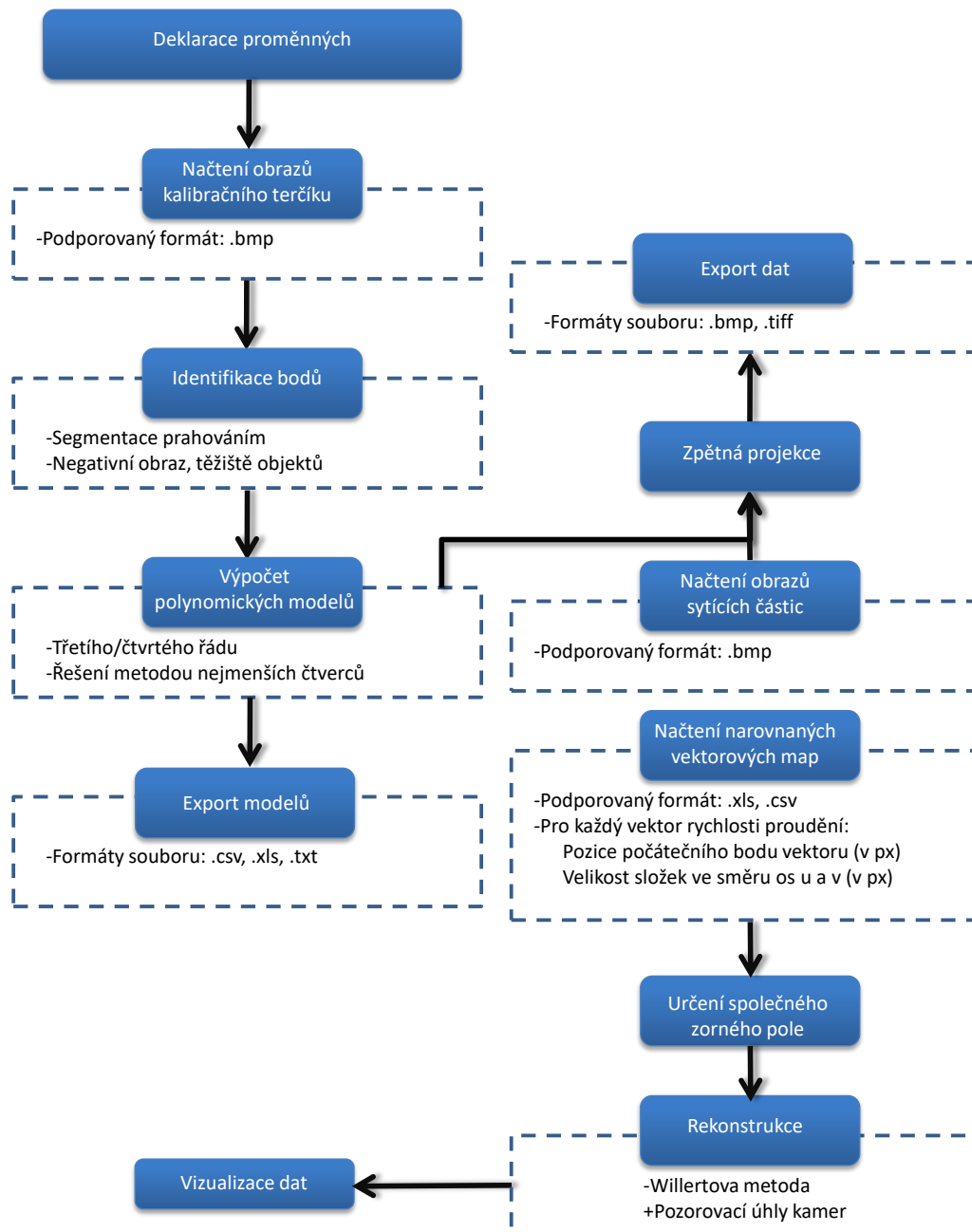
## Společné zorné pole kamer a trojrozměrná rekonstrukce

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 2.3.

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 1.2.1). Složky odpovídajícího trojrozměrného vektoru rychlosti proudění jsou získány ze vztahů (7), (8), (9). 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, nežli je tekutina, ve které jsou umístěny kamery, je vhodné upravit pozorovací úhly postupem uvedeným v kapitole 2.1.

## Popis vytvořených algoritmů

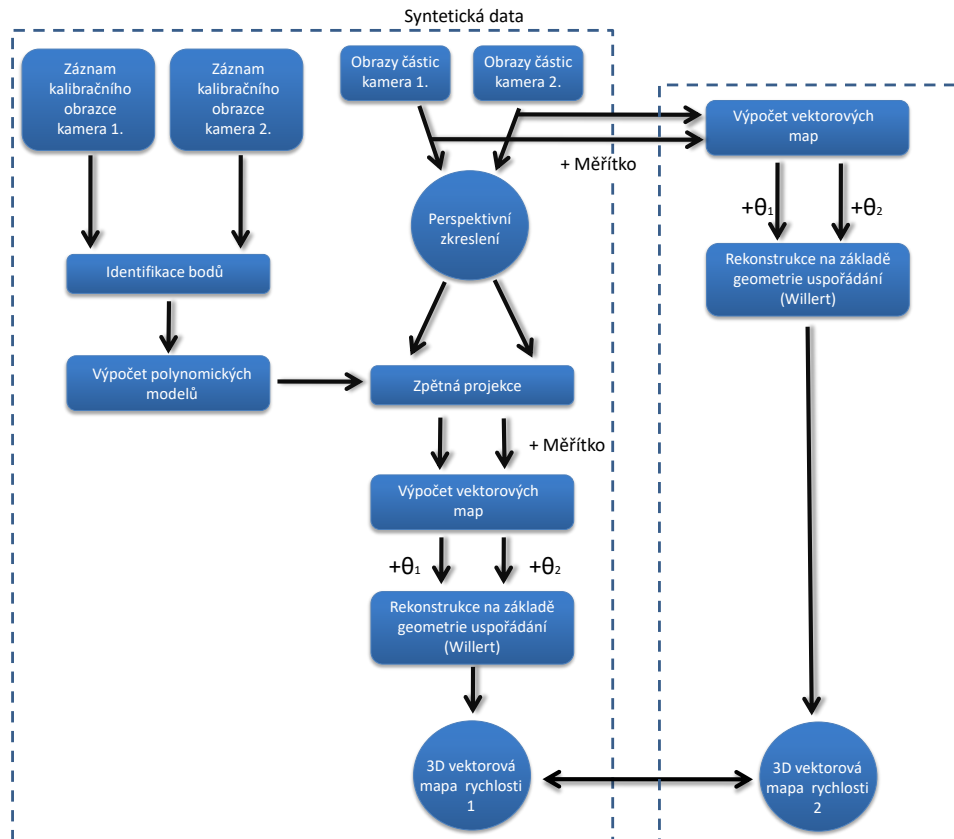
Autor disertační práce vytvořil algoritmy pro trojrozměrnou rekonstrukci na základě polynomického modelu a Willertovy metody v programovém prostředí Matlab R2014. V této kapitole jsou popsány jednotlivé body algoritmů diagramem znázorněným na obr. 20.



Obr. 20: Vývojový diagram algoritmu rekonstrukce na základě polynomického modelu a Willertovy metody

## Verifikace metodiky

Navrženou metodiku bylo, stejně jako v předcházejícím případě, nutné ověřit na uměle vytvořených vstupních datech experimentu. Proces verifikace je znázorněn na obr. 21.



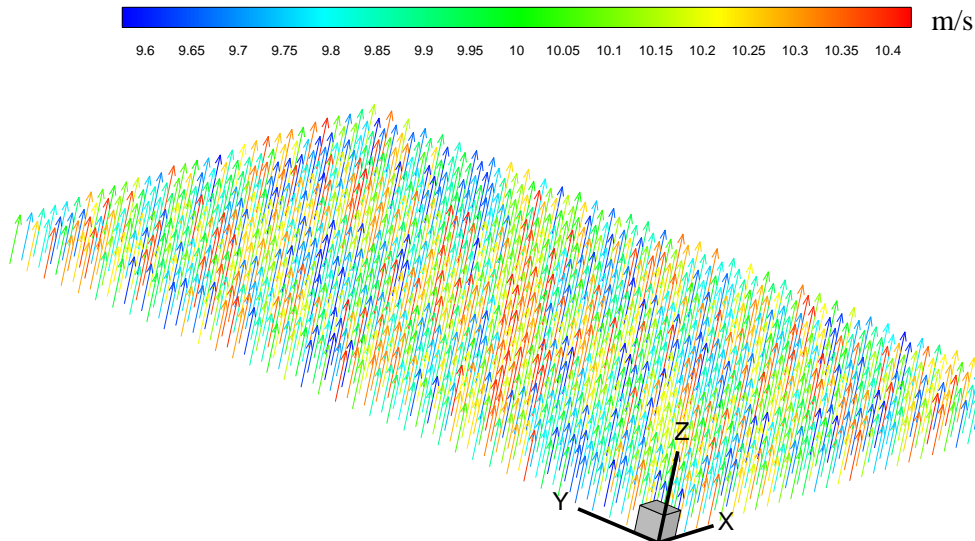
Obr. 21: Proces verifikace navržené metodiky

Generování obrazů částic a jejich další úprava byla shodná s postupem v předcházející kapitole. Kalibrační terčik byl zaznamenán kamerami ve zvoleném objektovém souřadném systému. Centrální bod terčiku určoval počátek objektového souřadného systému (0,0,0) a značky os jednotlivé osy systému. Kamery byly umístěny do pozic určených vnějšími parametry, které odpovídaly aplikovanému perspektivnímu zkreslení na vygenerované obrazy částic. Následně byl proveden záznam kalibračního terčiku. V záznamech byly identifikovány body a poté vypočteny polynomické modely třetího řádu. Zkreslené obrazy částic byly po výpočtech „narovnané“ 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 (obr. 22) byla provedena na základě Willertovy metody, kde hodnoty pozorovacích úhlů kamer, dosažené do výpočtu, se shodovaly s úhly pro aplikované perspektivní zkreslení. Výsledná mapa byla porovnána s trojrozměrnou vektorovou mapou získanou výpočtem pouze na základě Willertovy metody (totožnou s předcházející verifikací). Chyby v rekonstrukci pro složky vektoru rychlosti ve smyslu osy  $X$  a  $Y$  byly určeny obdobným způsobem jako v kapitole 2.1.

Tabulka 2: Chyba v trojrozměrné rekonstrukci navržené metodiky

| Pozorovací úhel kamer<br>$\theta_1 = \theta_2 = \theta$ [°] | Chyba ve složce vektoru<br>rychlosti ve smyslu osy $Z$ | Chyba ve složce vektoru<br>rychlosti ve smyslu 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  $0,5\text{ mm}$  [25] a průměrné chybě v identifikaci bodů terčíku  $< 1\text{ px}$ . 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 (17).



Obr. 22: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data zrekonstruovaná navrženou metodikou

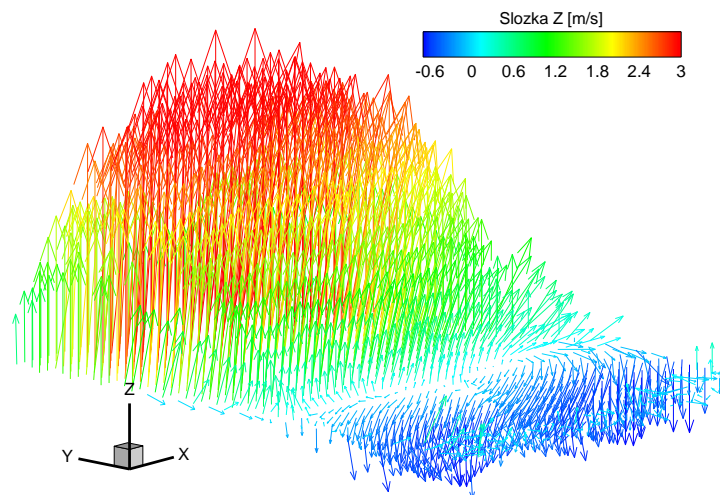
Chyby  $\sigma_{\Delta Z}$ ,  $\sigma_{\Delta X}$ ,  $\sigma_{\Delta Y}$  jsou v celém zkoumaném rozsahu pozorovacích úhlů vyšší v porovnání s rekonstrukcí na základě vnitřních a vnějších parametrů. To je zapříčiněno způsobem kalibrace stereo-snímání. Kalibrace je provedena pouze v jedné rovině v objektovém 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

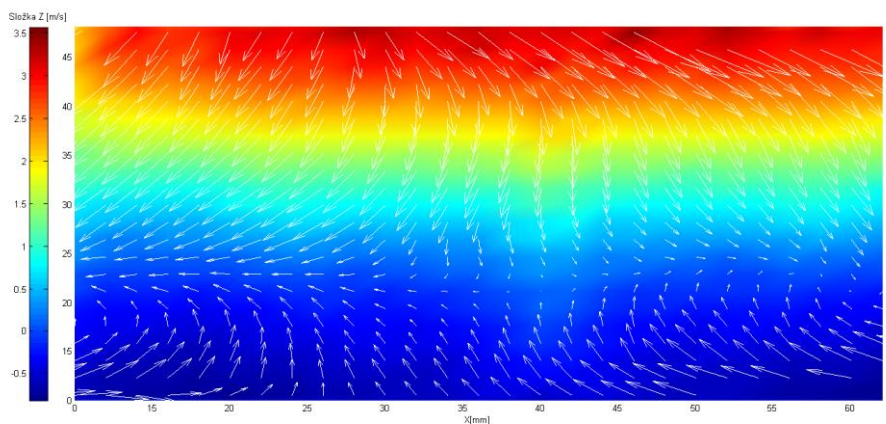
### Experimentální výzkum proudění za Glauert–Goldschmied profilem

Ověření metodiky bylo provedeno na již zmíněném experimentálním výzkumu proudění za Glauert–Goldschmied profilem (kapitola 2.1). Kalibrace stereo-snímání byla provedena posuvným kalibračním terčíkem, o rozměrech  $7 \times 6\text{ cm}$ , zaznamenaným ve středu laserového řezu. Použité komponenty a uspořádání měřicího systému nebylo změněno.

Vybrané výsledky jsou znázorněny na obr. 23 a 24. Výsledky navržené metodiky byly také porovnány s výsledky získanými klasickým způsobem kalibrace a rekonstrukcí provedenou dostupným komerčním softwarem DynamicStudio (obr. 16).



Obr. 23: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)



Obr. 24: 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)

Jednotlivé složky nabývaly hodnot, v porovnání s komerčním softwarem:

$$\text{Složka } X_{NM} = \text{Složka } X_{DS} \pm 0,013 \text{ ms}^{-1}, \quad (21)$$

$$\text{Složka } Y_{NM} = \text{Složka } Y_{DS} \pm 0,040 \text{ ms}^{-1}, \quad (22)$$

$$\text{Složka } Z_{NM} = \text{Složka } Z_{DS} \pm 0,338 \text{ ms}^{-1}. \quad (23)$$

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. 25) byl vytyčen experimentální výzkum ve spolupráci s Institutem hydrodynamiky Akademie věd ČR [27]. 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. 25, včetně základních rozměrů nádoby. Další informace o výzkumu jsou uvedeny v [27].

### Použité komponenty a uspořádání měřicího systému

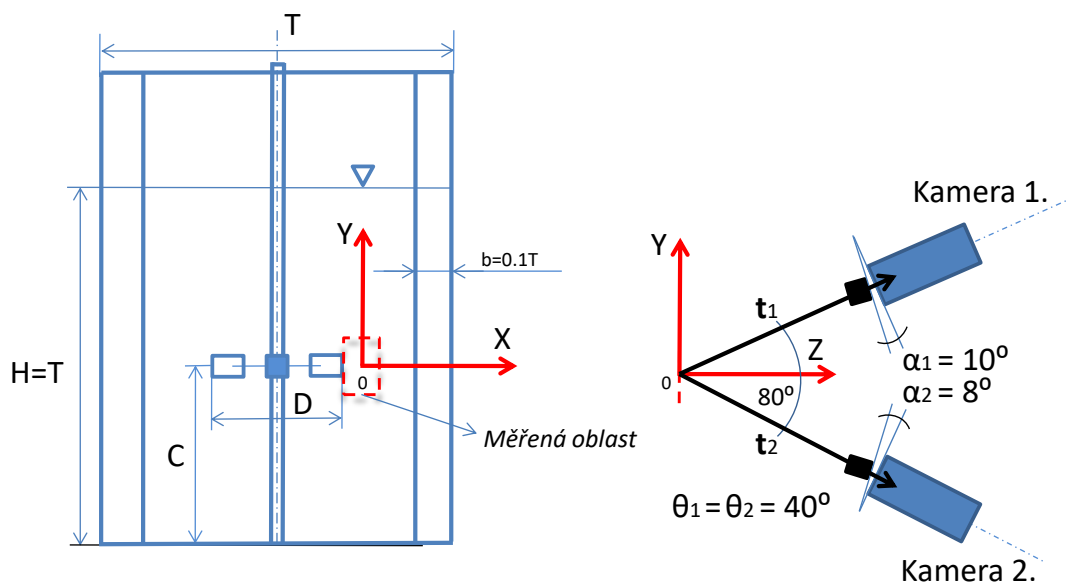
Pulsní laser: dvou dutinový laser New Litron: Y300. Energie jednoho pulsu 15 mJ pro frekvenci pulsů 1kHz. Vlnová délka 527 nm.

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 $\mu$ m pokryté Rhodaminem B. Při osvětlení částic použitým laserem emitují záření oranžové barvy (570 nm).

Velikost společného zorného pole kamer (měřená oblast): 8 x 4,5 cm.

Rychlost otáček míchadla: 600 ot/min.

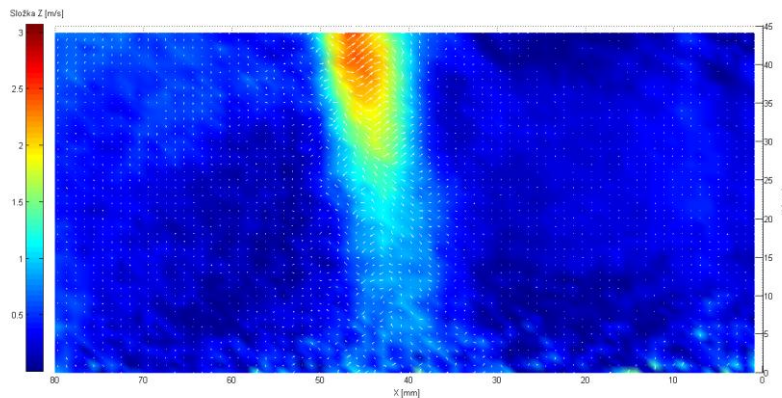


Obr. 25: Experimentální uspořádání a základní rozměry nádoby s míchadlem:  $H/T=1$ ,  $D/T=1/3$ ,  $C/T=1/2$ ,  $b/T=1/10$ ,  $1/D=1/4$

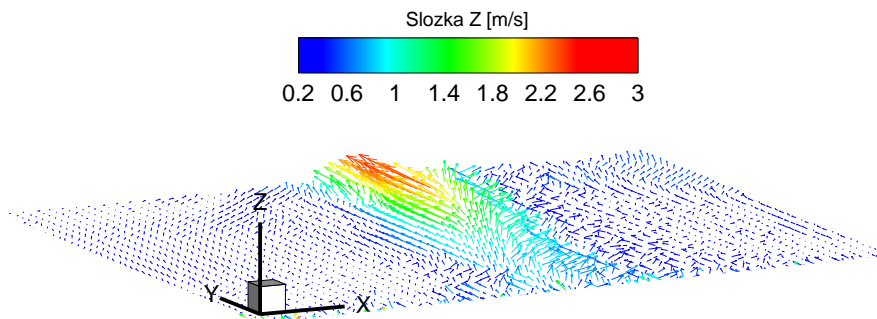


### Výsledky experimentu

Na obr. 26 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. 27. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 8000 vektorových map.



Obr. 26: Dvojrozměrná 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. 27: 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. 26 a 27. Charakter proudění, co do umístění hlavního toku v měřicí rovině a smyslu proudu ve směru osy  $Z$ , odpovídal předpokladům matematického popisu [28] a výsledkům výzkumu metodou 2D PIV (použitý měřicí systém od Dantec Dynamics), který předcházel experimentu. Výsledky experimentu byly mj. použity pro ověření matematického popisu proudění uvnitř míchací nádoby [27].

## 2.3 Metodika založena na eliminaci optického zkreslení pomocí polynomického modelu

Jak již bylo uvedeno, mimo komplikací spojených s umístěním a pohybem kalibračního terčíku je problematickým faktorem optické zkreslení záznamů 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 částí 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 s použitím 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 je věnována navržené metodice použitelné 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 TUL, kde autor práce působí po dobu doktorského studia, je používán měřicí systém od Dantec Dynamics (včetně softwaru Dynamic Studio), na kterém jsou tyto limity definovány.

Bylo aplikováno pět typů optického zkreslení v několika stupních intenzity na záznamy posuvného kalibračního terčíku. Tyto záznamy byly poté importovány do programového prostředí Dynamic Studio a byly určeny případy, ve kterých výpočet polynomického modelu selhává (konkrétně tento software používá polynomický model třetího řádu).

Popis navržené metodiky je rozdělen do následujících bodů:

### 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 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. 7.

### 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 již v kapitole 2.2. Pozice bodů v záznamech jsou použity pro výpočet polynomických modelů (jednoho pro kameru 1 a druhého pro kameru 2) podle teorie uvedené v kapitole 1.2.3. Výpočet modelů je poté vždy vhodné zkontrolovat, tedy určit, jak dobře polynomický model mapuje body ze scény do obrazového souřadného systému. 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 by neměla být větší, než 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. Autor práce vytvořil postup pro kompenzaci této chyby, který je uveden v kompletním textu.

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 obrazu kamery 1 a 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 tohoto průniku do obrazových souřadných systémů kamer (dopředná projekce: projekce z objektového souř. syst. do obrazového souř. syst.).

## Trojrozměrná rekonstrukce

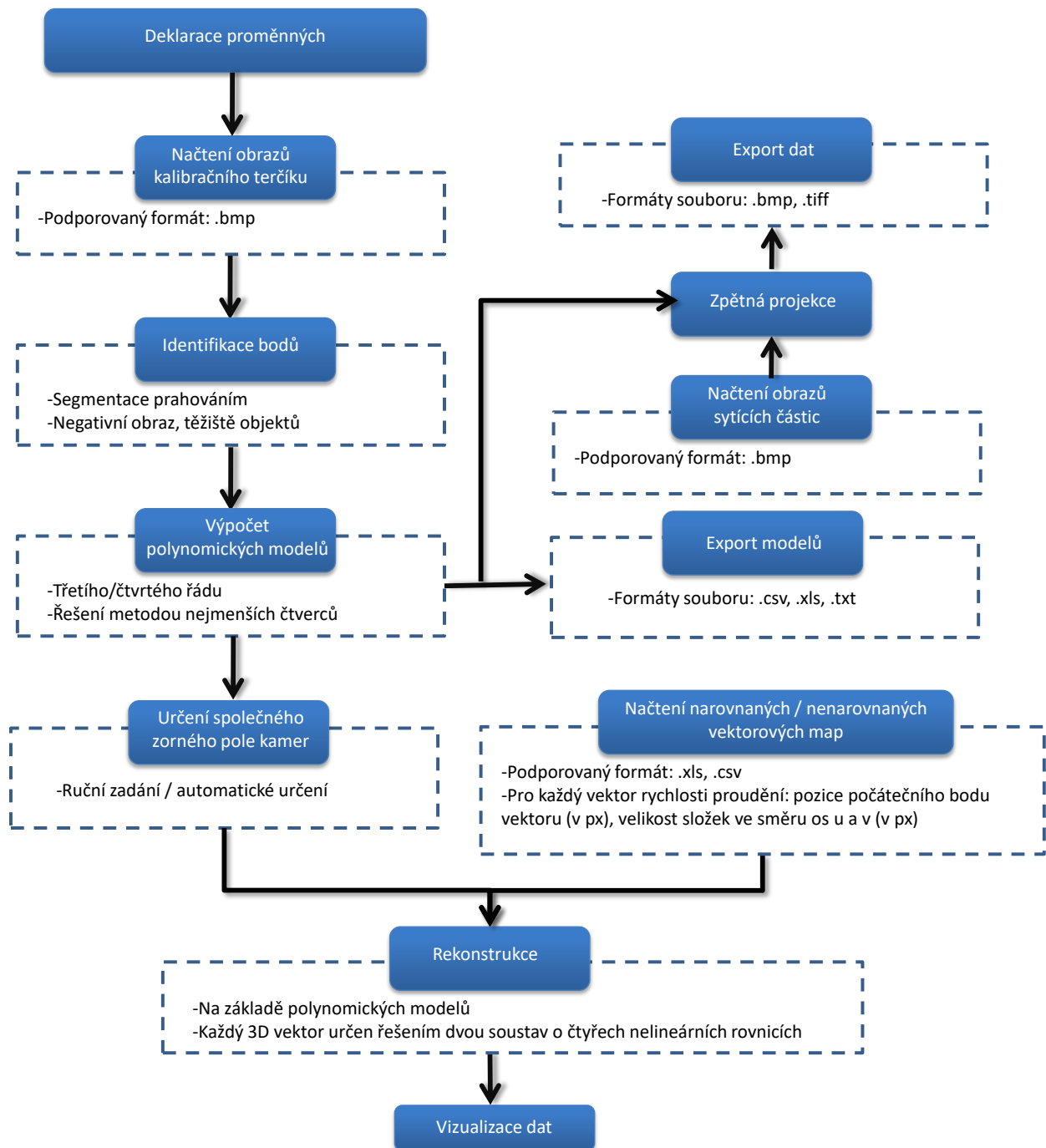
Posledním krokem navržené metodiky je získat trojrozměrnou informaci o proudění z dvojrozměrných vektorových map. Každý vektor ve společném zorném poli kamer z vektorové mapy odpovídající kameře 1. je přiřazen k takovému vektoru v mapě, odpovídající kameře 2., který je ve stejné pozici v měřené oblasti. 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 (15), 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

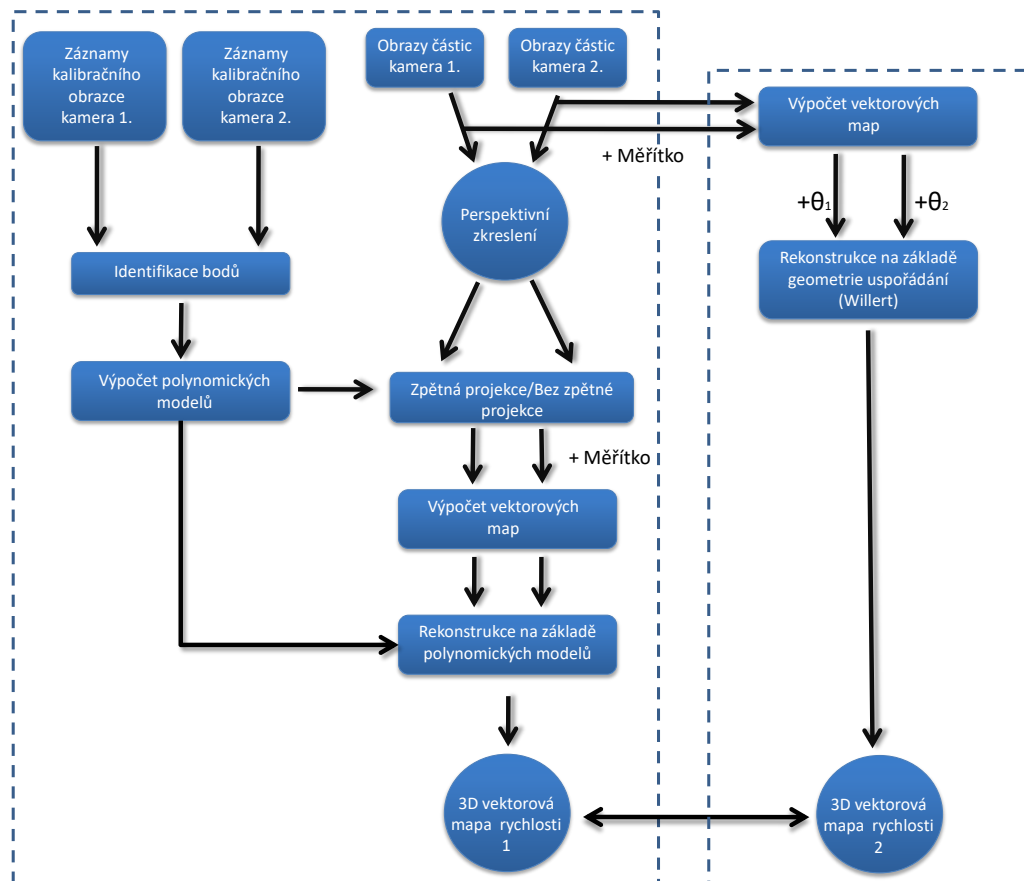
Autor disertační práce, vytvořil algoritmy pro trojrozměrnou rekonstrukci v přítomnosti výrazného optického zkreslení na základě polynomického modelu třetího/čtvrtého řádu a to v programovém prostředí Matlab R2014. Stejně tak, jako u ostatních navržených metod, jsou v této kapitole popsány jednotlivé body algoritmů diagramem znázorněným na obr. 28.



Obr. 28: Vývojový diagram algoritmů rekonstrukce na základě polynomického modelu

## 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. 29.

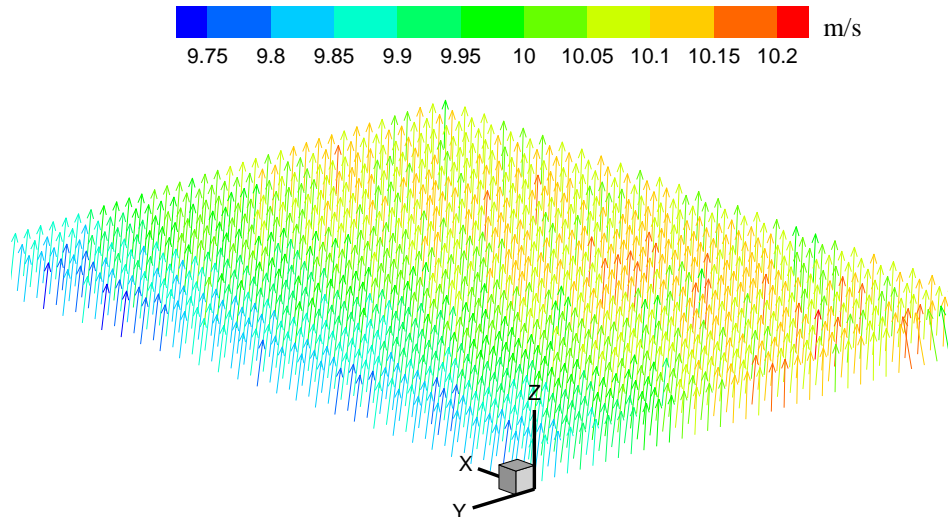


Obr. 29: Proces verifikace navržené metodiky

Generování obrazů částic a jejich další úprava byla shodná s postupem uvedeným v předcházejících kapitolách. Dále kalibrační terčík byl zaznamenán kamerami ve zvoleném objektovém souřadném systému v pěti polohách vzdálených od sebe 1 mm. Centrální bod terčíku 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 zkrselení na vygenerované obrazy částic. V záznamech terčíku 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 je možné exportovat polynomické modely. Výsledná trojrozměrná rekonstrukce proudění byla provedena na základě vypočtených polynomických modelů.

Výsledná mapa (obr. 30) byla porovnána s trojrozměrnou vektorovou mapou získanou výpočtem pouze na základě Willertovy metody (totožnou s ostatními verifikacemi), kde bylo potřeba dosadit pozorovací úhly kamer a definovat měřítko v obrazech sytících částic (měřítko a úhly byly shodné pro oba postupy rekonstrukce). Chyby v rekonstrukci pro složky vektoru rychlosti ve směru osy  $X$  a  $Y$  byly určeny obdobným způsobem jako v kapitole 2.1.

Na obrazy částic nebylo aplikováno, mimo perspektivního zkrselení, žádné aditivní optické zkrselení simulující zkrselení stěnou nádoby. Je to z toho důvodu, že je nespočet různých druhů a intenzit zkrselení 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 zkrselení, se kterými se nemusí experimentátor ani setkat.



Obr. 30: Trojrozměrná vektorová mapa rychlosti proudění pro syntetická data zrekonstruovaná navrženou metodikou

Tabulka 3: Chyba v trojrozměrné rekonstrukci navržené metodiky

| Pozorovací úhel kamer<br>$\theta_1 = \theta_2 = \theta$ [°] | Chyba ve složce vektoru<br>rychlosti ve smyslu osy Z | Chyba ve složce vektoru<br>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  $0,5 \text{ mm}$  [25] a průměrné chybě v identifikaci bodů terčíku  $< 1 \text{ px}$ . 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 (17).

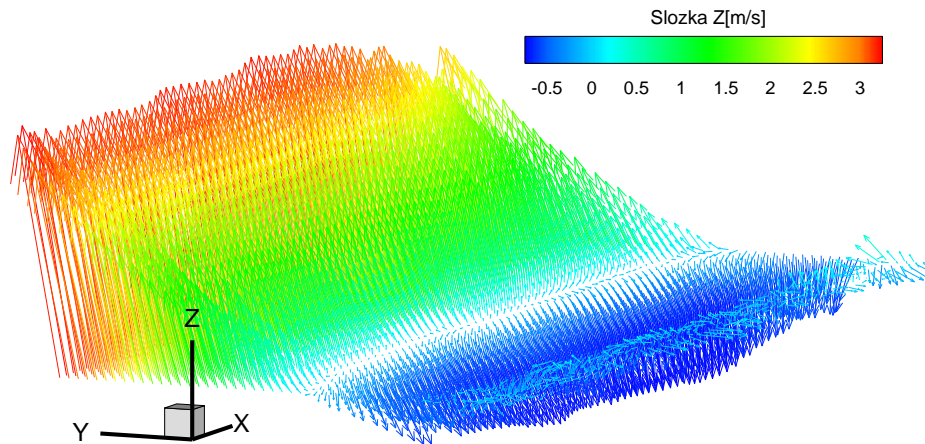
Verifikace navržené metodiky byla provedena pro pozorovací úhly kamer  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ . Chyba v trojrozměrné rekonstrukci byla pro všechny složky přibližně srovnatelná s rekonstrukcí na základě vnitřních a vnějších parametrů.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

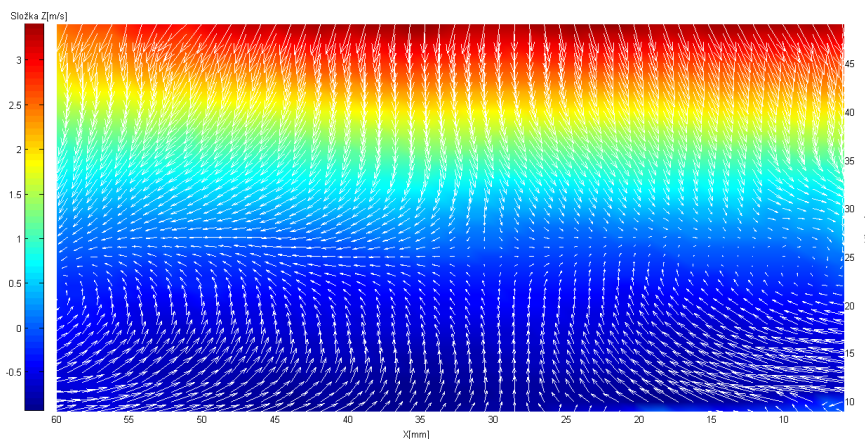
### Experimentální výzkum proudění za Glauert–Goldschmied profilem

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. 31 a 32.



Obr. 31: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: vstupní rychlost proudění 5m/s (navržená metodika)



Obr. 32: 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)

Jednotlivé složky nabývaly hodnot, v porovnání s komerčním softwarem:

$$\text{Složka } X_{NM} = \text{Složka } X_{DS} \pm 0,003 \text{ ms}^{-1}, \quad (24)$$

$$\text{Složka } Y_{NM} = \text{Složka } Y_{DS} \pm 0,169 \text{ ms}^{-1}, \quad (25)$$

$$\text{Složka } Z_{NM} = \text{Složka } Z_{DS} \pm 0,109 \text{ ms}^{-1}. \quad (26)$$

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

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 [26], měl za cíl ověřit matematický model popisující proudění uvnitř rozvětvení tvaru T (obr. 33). 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. 34. Měřicí rovina měla uvnitř rozvětvení efektivní tvar válce s výškou přibližně 4 mm. Kamery snímaly měřicí rovinu 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. 33), 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. 33: 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 absorbéru.

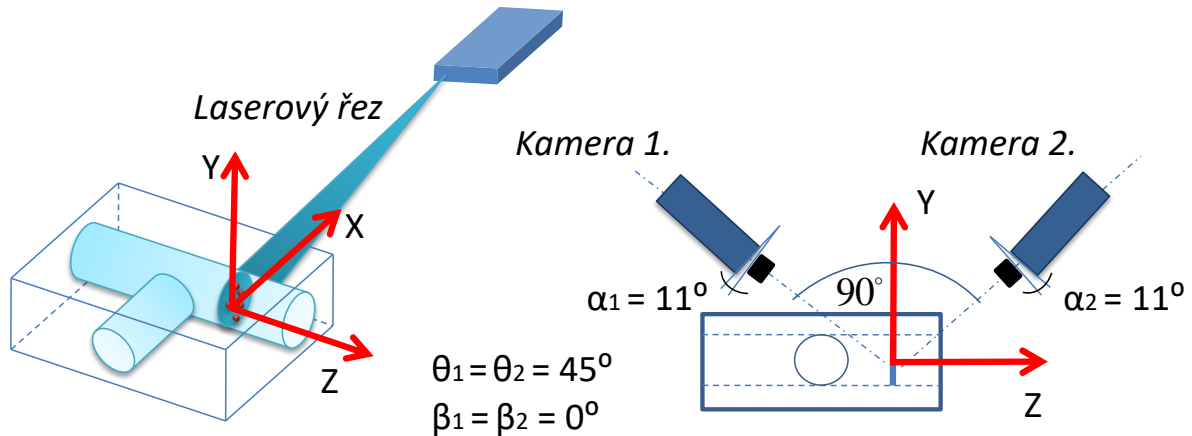
Snímací technika: CCD kamery HiSense, rozlišení kamery 1280 x 1024 px a 12 bitovým jasovým rozlišením. Objektivy kamer Nikkor 60 mm. Pro potlačení optického šumu je předřazen filtr propouštějící světlo blízké vlnové délce 570 nm.

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.

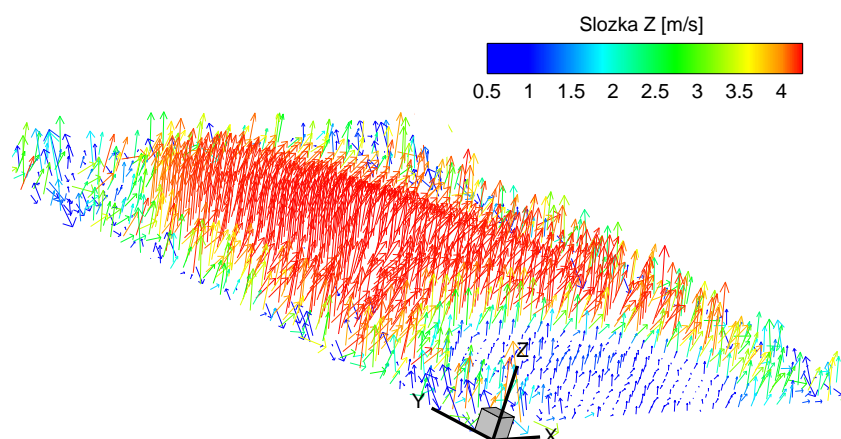
Režimy proudění: voda byla do odboček rozvětvení, napojeného na otevřený potrubní systém s čerpadlem a nádrží, přiváděna v několika režimech. Toho bylo docíleno ventily umístěnými před každou odbočkou. Podrobnější informace jsou uvedeny v [22].



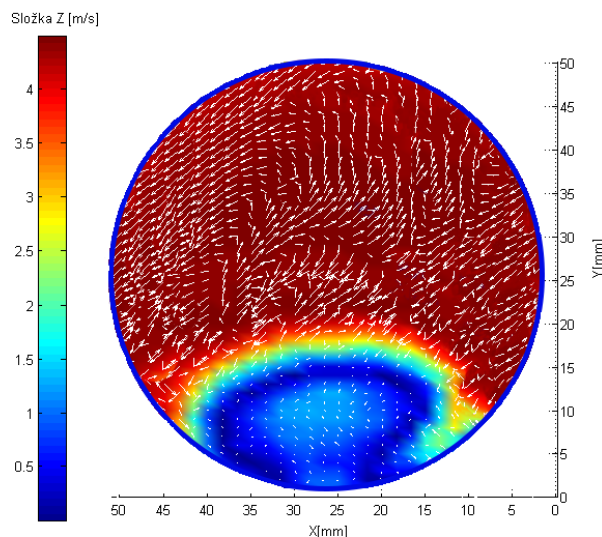
Obr. 34: Uspořádání měřicího systému

### Výsledky experimentu

Na obr. 35 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. 36. Výsledky jsou statisticky určeny ze souboru obsahujícího 50 vektorových map. Jednalo se o režim proudu, kde proud vody vstupoval do rozvětvení 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. 35: Trojrozměrná vektorová mapa proudění: pro celkový průtok rozvětvením 5,5 l/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: 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 terčiku 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, viz [22]. 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. Odchyšky 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 [33]. Navržená metodika se dá považovat za ověřenou experimentálním měřením.

## 3 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 úvodní kapitoly disertační práce. V kapitolách je popsána metoda PIV, metoda Stereo PIV a trojrozměrná rekonstrukce scény. V závěru práce jsou uvedeny souhrnné informace včetně doporučení pro experimentální praxi. Autor práce v rámci tohoto bodu dále vytvořil postup pro kompenzaci chyby v určení pozic bodů v záznamech kalibračního obrazce. 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, a to v krocích jdoucích za sebou: analýza problematiky a možných postupů, návrh metodiky, popis metodiky a vytvořených algoritmů (viz kapitola 2.1), verifikace navržené metodiky na uměle vytvořených datech simulujících experiment se známým teoretickým výsledkem (kapitola 2.1), ověření metodiky na experimentech a porovnání s dostupným komerčním softwarem (kapitola 2.1). Výsledky verifikace jsou uvedeny v tabulce 1. na str. 20. 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 2.2). Vývoj metodiky 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. 28). Relativně vyšší chyba je „daná“ 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 měřicích 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 2.3. 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 odchylku 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. autokalibraci kamer, 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.
- 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 1*. 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/archophth.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 Particle Image Displacement Velocimetry, 1988, 44p (SEE N89-17179 09-34).
- [20] ALTENHOFEN, R. E. *Rectification in Manual of Photogrammetry*. Washington, D. C., 1952, 1995, 457 s.
- [21] 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>.
- [22] PAVLÍK, D. *Experimentální studie proudění v rozvětvení metodou PIV*. Liberec, 2011. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Kotek, M.
- [23] 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/ >.
- [24] NOVOTNÝ, J. *Nové algoritmy při zpracování dat získaných měření metodou PIV*. Praha, 2009. Disertační práce. České vysoké učení v Praze. Školitel Nožička, J.
- [25] SCHOVÁNEK, P. a V. HAVRÁNEK. *Chyby a nejistoty měření*. 1998. Text k laboratornímu cvičení. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [26] 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
- [27] 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.
- [28] 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***

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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, Slok-Belchatow, Poland, 2016*. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/760/1/012020.
- [32] 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.
- [33] 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 29. Citováno v publikaci:

- [34] 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.