

ANALÝZA PROUDĚNÍ VZDUCHU POMOCÍ PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

Vojtěch Mazanec, Karel Kabele

Laboratoř vnitřního prostředí, UCEEB, ČVUT, Buštěhrad

ANOTACE

Příspěvek se zabývá principem měření proudění kapalin a plynů pomocí integrální laserové anemometrie (v angl. Particle Image Velocimetry, PIV) a jejím možným přínosem při zkoumání vnitřního prostředí budov.

V první části je rozebírána samotná technologie měření, potřebné součásti, postupy a způsoby vyhodnocení. Druhá část se pak zabývá možným využitím při zkoumání vnitřního prostředí, ale také tím, co použití této metody limituje.

SUMMARY

The paper deals with gas and liquid flow measurement with use of specific technology: particle image velocimetry (PIV). It's focused on its utilization in indoor environment measurements.

The first part of the paper is focused on individual elements of the PIV technology and evaluation methods. The second part analyses the ways to use this technology in indoor environment measurements, its benefits and limits of usage.

ÚVOD

Neustále pokročilejší systémy počítačové simulace proudění, ať už v kapalinách, či ve vzduchu, nám mnohdy dodávají pocit, že dokáží zobrazit vše. V rekordním čase a bez potřeby komplikovaných laboratoří. Ovšem nenechme se tak úplně zmýlit, komplexnost a složitost výpočtu simulace způsobuje, že je velmi citlivá na drobné změny v zadání, a základem pro výpočet bude vždy zjednodušený matematický model. Simulace tedy nikdy nedokáže vzít v potaz veškeré externality a konkrétní specifikace daného prostředí, což nevádí, pokud konkrétní prostředí nemáme, nebo není rozhodující, ale může být klíčové v opačných případech. Velmi obtížně se pracuje i se složitými organickými tvary, případně mechanickými prvky. Podrobná anemometrie nám v takových situacích dokáže dát přesný obraz proudění v reálné situaci a za skutečných podmínek.

Záběry použité v tomto článku jsou z experimentu, provedeném v PIV laboratoři univerzitního centra energeticky efektivních budov (dále UCEEB), který měřil proudění vzduchu okolo lidské hlavy, při použití vzduchové trysky a rychlosti proudění cca 0,2 m/s.

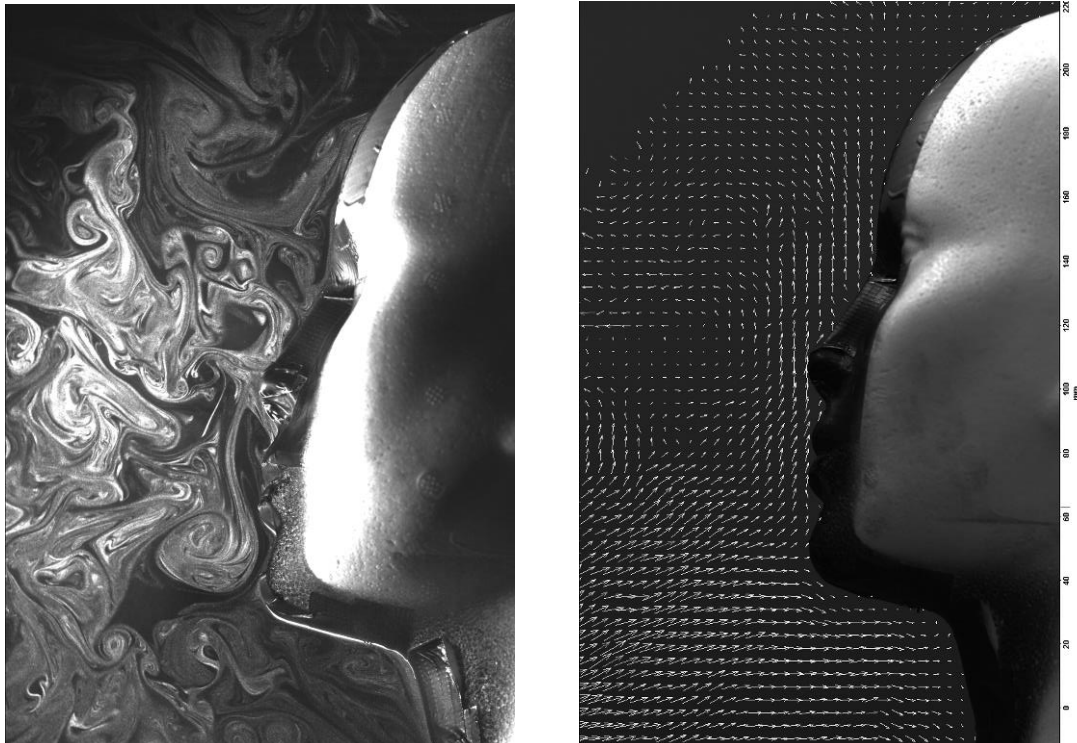
TECHNOLOGIE MĚŘENÍ POMOCÍ PIV

Integrální laserová anemometrie je způsob vizualizace a následné počítačové vektorizace proudění vzduchu nebo průsvitných kapalin. Jak toho ale dosáhnout, když vzduch sám o sobě je průhledný a jeho pohyb je tak velmi obtížně detekovatelný? Odpověď nám dává již samotný název technologie: particle image velocimetry. Principem jsou tedy drobné částičky (particles) s hustotou co nejbližší hustotě měřené látky, které jsou v ní rozptýleny a které jsou osvětlovány laserovou rovinou, a jejichž odrazy snímají vysoce citlivé kamery, schopné

zachytit dva snímky po sobě v čase okolo jednotek nanosekund. Podle počtu a nastavení kamer lze měřit proudění přímo ve 3D prostoru (3 kamery snímající stejný záběr ze tří úhlů), ve 3D rovině (2 kamery), měřena je jedna rovina, ovšem zaznamenávána je i rychlost a směr částic na třetí souřadné ose), nebo jen ve 2D rovině (1 kamera).



Obr. 1 Fotografie z experimentu, lze vidět proud rozptýlených částic (v tomto případě speciálních jemných olejových částic), osvětlený laserovou rovinou.



Obr. 2 Vlevo vizuální snímek měřené oblasti, patrné jsou částice rozptýlené v prostoru okolo obličeje. Vpravo vektorizovaný snímek, který ukazuje rychlosti proudění částic.

Vizualizace proudění

Jak už bylo uvedeno, k vizualizaci proudění látky metoda PIV využívá drobných částec rozptýlených ve vzduchu a jejich odrazu do speciálních kamer. Částic, které se takto využívají, je velké množství a záleží převážně na velikosti měřeného projektu a měřené látce. Nejpřesnějšího výsledku totiž dosáhneme, když částice během měření zabírá velikost více než jednoho pixelu kamery, ale je zároveň co nejdrobnější, aby se jich na jeden záběr vešlo dostatečné množství. Pro malé sledované plochy proto využíváme menší částice, například drobné olejové kapičky, nebo pevný, prachu podobný expansel. Pro větší experimenty pak lze využít například bublinek, vytvářených z oleje a hélia, které mají rozměr od desetin, do několika jednotek milimetrů. Je důležité, aby částice byly rozptýlené a nechaly se vzduchem volně unášet. Díky různým částicím je rozsah měření poměrně veliký, na jednom zařízení tak lze podrobně zkoumat prostor od 10 x 10 cm, do přibližně 1,5 x 1,5 m.

Částice jsou osvětlené vysoce výkonným laserem, který vysílá jednotlivé pulsy pro každý snímek. Puls trvá jen 6 nanosekund, aby se pohyb exponované částice nestihl na čipu rozmazat. Vzhledem k tomu, že snímkování je v opravdu krátkém čase (v jednotkách až stovkách nanosekund, podle rychlosti proudění), je potřeba využívat dvou laserových emitorů s optikou upravenou tak, aby paprsek obou zařízení svítil jedním objektivem a osvětloval tak totéž místo. Programovatelná jednotka pak velmi přesně synchronizuje laserové záblesky se snímkováním kamer.

Laserová optika se rozlišuje podle toho, v jakém prostoru měříme. Potřebujeme totiž osvětit právě a jen ty částice, které jsou měřeny. Při měření v 3D prostoru se používá rozptýleného paprsku, zatímco ve 2D měření, je využíváno speciální optiky, která rozvine laserový paprsek do roviny, a osvětlí tak pomyslný řez prostorem (lze vidět na obrázku 1 a 2). Stejně roviny se používá i v případě 3D rovinného zobrazení, kterým byl měřen právě zmíněný experiment.

Zachycení dat

Aby bylo možné zachytit i nepatrný pohyb částic v laserové rovině, využívá se ke snímání vysoce citlivých kamer se speciálním vysoce citlivým CCD čipem, který poskytuje 2D obraz pro každý laserový záblesk. Vzhledem ke krátkému časovému úseku mezi jednotlivými snímky nelze využít konvenčních kamer, které v tak krátkém čase nejsou schopny odečíst data z čipu a exponovat nový snímek. CCD čip proto ukládá první snímek do mezipaměti přímo na ploše čipu, a zatímco je tento první snímek odečítán, dochází k exponování snímku druhého. Tento postup umožňuje velmi rychlé snímání a zachytí tak i ten nejmenší pohyb osvětlených částic.

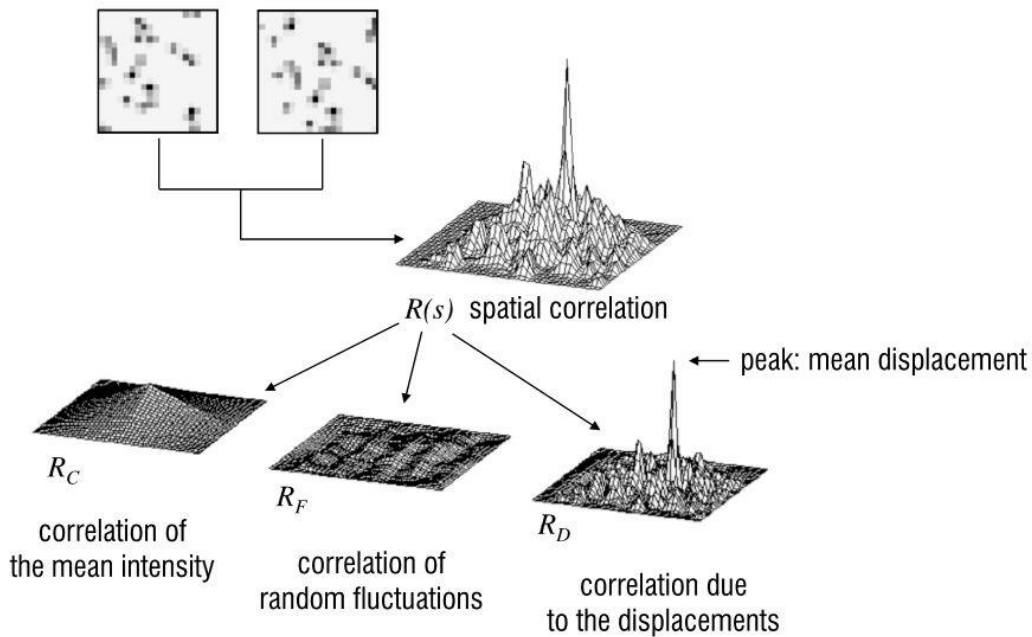
Dvě kamery, tak jak byly využity v ukázaném experimentu, pak dokáží vytvořit čtyři informace na každé snímání, tedy ze dvou různých úhlů a ve dvou různých okamžicích. Zpětnou rekonstrukcí tak lze vyčíst pohyb částic ve všech třech osách, a zároveň lze i přesně zjistit údaje o kalibraci a tedy přesnosti experimentu.

Vyhodnocení dat

K vyhodnocení dat PIV se jako nejvhodnější jeví metoda cross-correlation. Ta spočívá v rozdělení snímku na pravidelná okna stejné velikosti, např. 32 x 32 pixelů. Pro každé z těchto oken se pak zjišťuje vektor rychlosti. Software položí přes sebe odpovídající okna z prvního a druhého časového úseku a následně snímky posouvá vůči sobě. Pro každou polohu následně spočítá míru shody signálu v každém jednotlivém pixelu, čím vzniká korelační mapa (spatial correlation, obr. 3). V bodě, kde si signály z obou snímků vzájemně

odpovídají nejlépe, můžeme vidět vysoký „pík“ a z jeho polohy pak lze určit výsledný vektor pro dané integrační okno.

Od tohoto způsobu vyhodnocení se pak logicky odvíjí i nastavení rychlosti snímání. Lze si odvodit, že bude-li rychlost částic velká a snímání pomalé, bude nutno využít velikých integračních oken a dojde k nepřesnostem, pokud bude snímání ovšem příliš rychlé, pohyb částic na posloupných záběrech bude minimální a dojde opět k nepřesnostem ve výpočtu. Je proto důležité vhodně zvolit rychlost snímání ku rychlosti proudění částic a mohou nastat problémy, pokud se v rámci zkoumané oblasti budou rychlosti částic ve veliké míře lišit.



Obr. 3 Podrobná ukázka výpočtu pomocí metody cross-correlation

VYUŽITÍ A LIMITY METODY PIV

Využití metody

Výhod, a tedy využití PIV anemometrie je mnoho. V první řadě lze pomocí pomocí experimentů, které svou časovou náročností mnohdy odpovídají své výpočetní konkurenci, získat velice přesná a data, věrně odpovídající realitě. Velmi přesně lze určit i chybu měření a případné okolní faktory, díky kterým může počítačová simulace vytvořit nejasné, či nevěrohodné výsledky. Oproti jiným metodám anemometrie je pak zřejmou výhodou přesné rozložení vektorů v konkrétním čase, případně možnost jejich přesného průměrování v delším časovém úseku. Dokáže velmi přesně ukázat proměnlivost proudů v časovém intervalu a rozdíl jednotlivých proudů oproti průměrovanému toku (typická ukázka takového stavu je například proměna proudového pole při nátoku na šikmou desku).

Metoda je vhodná k měření okamžitých stavů proudění otevřených i uzavřených soustav plynů i tekutin, které je možné vybavit vhodnými stopovacími částicemi, a které umožní dostatečné vizuální vstupy. Lze zkoumat poměrně široké pole proudění i velmi malé detaily. Stejná variabilita je i u samotné rychlosti proudění látky. Rozsah využití je tedy veliký, od měření proudění uvnitř válce spalovacího motoru, po měření proudění vzduchu nad topnými tělesy, či výstřiky vzduchotechniky.

Limity metody

Stejně jako využití, i limity velmi přímo vycházejí ze samotné technologie, a jsou ve velkém měřítku popsány výše.

V první řadě, měřená látka musí být opticky průchozí. Kamery musí vidět osvětlené částice uvnitř média. S tím souvisí i samotné částice, které musí být pro danou látku zobrazitelné, a přitom mít co nejhodnější vlastnosti v proudění, aby nedocházelo ke zkreslení dat.

V druhé řadě je potřeba, aby vizuálně prostupný byl samotný experiment, a to v rovině laseru i v rovině kamer. Nebezpečné mohou být výrazně odrazivé plochy, protože přímý odraz paprsku do kamery může přesvětlit a poškodit snímací plochu, a i pokud nepoškodí zařízení, osvětlí odrazy i jiné částice, než samotná zadaná rovina, čímž může dojít ke zkreslení výsledků. Stejný efekt může mít i výrazný lom světla v tekutinách, či jiných průsvitných materiálech.

V poslední řadě pak je zobrazení limitováno laserovým paprskem, jeho stíněním (viditelné na obrázku 1), kdy je třeba vhodně volit směr a osvětlenost měřených částí a určitou prostorovou náročností při rozmístování experimentu, což omezuje velkoplošná měření v menších místnostech.

ZÁVĚR

I přes některé limity je metoda PIV anemometrie velice flexibilní a otvírá široké možnosti využití, od měření nejmenších detailů, po velké celky. Její hlavní předností jsou reálná data, která dokáží zobrazit dynamiku proudění v okamžitém čase, i jeho změny během delšího časového úseku.

LITERATURA

- [1] ZUBÍK P.: *Integrální laserová anemometrie*, Brno, 2001, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc.
- [2] ZUBÍK P.: *Integrální laserová anemometrie v praxi*. In: 15. Sympozium o anemometrii, Úvaly 1998, s. 91-96. ISBN: 80-86020-23-1.

Tento příspěvek vznikl za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpl č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.