

Vizualizacijska metoda za izračun hitrostnih polj toka na osnovi advekcijsko-difuzijske enačbe

Benjamin Bizjan^{1,2,*} – Alen Orbanič^{2,3} – Brane Širok¹ – Tom Bajcar¹ – Lovrenc Novak¹ – Boštjan Kovač^{2,3}

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

² Abelium d.o.o., Slovenija

³ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Slovenija

V današnjem času obstajajo številne vizualizacijske metode, ki omogočajo izračun hitrostnih polj opazovanega toka tekočine, pri tem pa je njihova glavna prednost, da so brezdotične in zato ne vplivajo na tok. Najpogostejše se uporabljajo metode, ki delujejo na osnovi križne korelacije (npr. PIV), znane pa so tudi metode na osnovi optičnega toka. PIV metode so dokaj uveljavljene za meritve hitrostnih polj, vendar pa je njihova slabost kompleksnost in razmeroma visoka cena merilnega sistema. Metode na osnovi optičnega toka lahko po drugi strani delujejo na tokovih z manj zahtevno izvedbo vizualizacije (npr. dim, delci...), vendar so v primerjavi s korelacijskimi še dokaj neuveljavljene in slabo računalniško podprte.

Naš namen je bil razviti robustno računalniško podprto metodo na osnovi optičnega toka, ki bo omogočala analizo različnih tokovnih pojavov v laboratorijskem in industrijskem okolju. Metoda, implementirana v programskem okolju *ADMflow*, temelji na reševanju advekcijsko-difuzijske (AD) enačbe in predpostavki gostega tokovnega polja, pri čemer v AD enačbi koncentracijo polutanta v toku nadomestimo kar z lokalno sivinsko stopnjo na sliki. Z vidika natančnosti metode je ključen del računskega algoritma podvzorčenje slik (ang. downsampling, parameter Δxy) in uvedba penalizacijskih členov (β , γ , θ), ki zgladijo nenadne spremembe hitrostnih gradientov, divergence in gradienta rotorja. Pred samim izračunom se slika zgladi z neuteženim filtrom (velikost okna za glajenje določa parameter *SWS*), glajenje po času pa posredno določimo s številom zaporednih slik (parameter *IIE*), ki se uporabijo za izračun hitrostnega polja v danem trenutku. Poleg predstavitve metode je glavni namen prispevka ovrednotiti njeno natančnost pri izračunu hitrostnih polj na različnih tipih tokovnih struktur.

Našo vizualizacijsko metodo smo ovrednotili na sekvenci sintetičnih slik zračnega toka čez krilo (profil NACA4421) v vetrovniku, ki smo jo ustvarili v dveh korakih. Prvi korak je bila numerična simulacija zračnega toka čez krilo v okolju za računalniško dinamiko tekočin *Fluent*, pri čemer smo uporabili model SST-SAS. S tem smo dobili izhodiščna hitrostna polja (ang. ground truth), ki smo jih nato uporabili še za pripravo sintetičnih slik - simulacijo dima z uporabo AD enačbe v obratni smeri. Koncentracijo dima na izviru smo sinusno pulzirali, da smo zagotovili zadostne časovne in prostorske gradientne sive na slikah za pravilno delovanje naše metode. Iz dobljenih sintetičnih slik smo nato v programu *ADMflow* izračunali hitrostna polja in jih primerjali z izhodiščnimi vrednostmi. Izvedli smo variacijo parametrov izračuna v *ADMflow-u*, pri čemer smo za vsak nabor parametrov (β , γ , θ , Δxy , *SWS*, *IIE*) izračunali napako hitrostnih polj po iznosu (absolutni hitrosti) in smeri. Z variacijo smo ugotovili, pri katerem naboru parametrov je dosežena najmanjša računska napaka, na podlagi česar smo lahko sklepali o optimalnih nastavitvah teh parametrov.

Rezultati kažejo, da je metoda najbolj natančna na slojevitih, brezvrtinčnih tokovih, nekoliko manj pa na vrtinčnih tokovih. Napaka po iznosu hitrosti se je za različne tipe toka gibal med 4 in 14%, napaka po kotu pa med 0.5 in 15°. Na natančnost izračuna najizraziteje vpliva nastavev parametra za podvzorčenje (Δxy), ki ga je potrebno prilagoditi hitrosti pomikanja tokovnih struktur med zaporednima slikama, le-ta pa naj bo 1 do 10 pikslov na sliko. Pomemben vpliv imajo tudi penalizacijski koeficienti za hitrostne gradientne (β), divergence (γ) in gradienta rotorja (θ), ki znatno znižajo računsko napako glede na primer, ko so nastavljeni na ničelne vrednosti (pri prevelikih vrednostih pa povzročijo hiter porast napake). Optimalno število zaporednih slik v enačbah (*IIE*) je tem nižje, čim bolj je tok nestacionaren.

Glede na to, da se vizualizacija v vetrovniku z dimom običajno uporablja le za kvalitativno analizo toka, so dobljeni rezultati (razpon napak) zelo zadovoljivi, saj predstavljena vizualizacijska metoda odpira nove možnosti za hitro, robustno in z vidika merilne opreme nezahtevno oceno hitrostnih polj toka. Glede nadaljnjega razvoja metode se kaže možnost uporabe strojnega učenja z namenom vsaj delne avtomatizacije pri izbiri parametrov izračuna, smiselno je tudi razvoj 3D metode za opazovanje kompleksnejših tokov.

Ključne besede: računalniško podprta vizualizacija, hitrostno polje, izračun gostega tokovnega polja, optični tok, advekcijsko-difuzijska enačba, računalniška dinamika tekočin