



doc. Michal Švanda
Astronomický ústav UK
V Holešovičkách 2
180 00 Praha 8
svanda@sirrah.troja.mff.cuni.cz
+420 605 577 166

Babice, 16. dubna 2023

FSI VUT v Brně
studijní oddělení
Technická 2
616 69 Brno

Posudek oponenta dizertační práce Ing. Zdeňka Hrazdíry

Obor: Aplikovaná matematika

Katedra: Ústav matematiky. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně

Název práce: Vysoce přesné metody sub-pixelové registrace obrazů a jejich aplikace v astrofyzice

Vedoucí práce: prof. RNDr. Miloslav Druckmüller, CSc.

Předložená doktorská dizertační práce kolegy Hrazdíry se zabývá hned několika tématy, která jsou mi odborně velmi blízká. Jádro práce je spíše teoretického charakteru, tím je vývoj nové metody registrace obrazů se sub-pixelovou přesností (Iterative Phase Correlation, IPC). Cíle autor dosahuje aplikací zpřesňujícího iteračního schématu obalujícího víceméně standardní výpočet parametrů afinní transformace (posun, rotace, změna měřítka) metodou fázové korelace.

Práce má 83 stran z toho 67 čistě textových, zbývající zahrnují úvodní stránky, obsah, seznam publikovaných prací a seznam literatury. Dizertace je psána ve velmi srozumitelném anglickém jazyce a má velmi pěknou formální úpravu. Při jejím studiu jsem nenarazil na žádné podstatné jazykové, stylistické ani typografické nedostatky. Dizertační práci doprovázel její autoreferát, který splňuje všechny požadavky na něj kladené.

Samotná dizertace je členěna do pěti kapitol. Začíná matematickým úvodem, pokračuje shrnutím současného stavu problematiky registrace obrazů. Ve třetí kapitole autor zevrubně popisuje a testuje a validuje novou iterativní metodu. Kapitola čtvrtá se zabývá astrofyzikálními aplikacemi a v poslední páté kapitole je celá práce stručně shrnuta.

Při studiu práce jsem až do kapitoly 4.1 neměl žádné zásadní připomínky, pouze naprosté drobnosti, které povětšinou ani nestojí za písemnou zmínku. Vyvinutý program lze považovat za schopných reálných aplikací, což autor dokazuje rozsáhlým testováním. Zde musím ocenit některé ne zcela zřejmé přístupy. Jednak, použití filtru s pásmovou propustností není zcela obvyklé. Jiní autoři se nejčastěji omezují na omezení vysokých frekvencí kvůli dominanci šumu, avšak nízké frekvence,

kteře obsahují podstatné jasové změny, obvykle ponechávají, byť i toto zjevně hraje v registraci svoji roli. Dále pak použití principů běžných v metodách strojového učení, kdy se pro nalezení optimálních hodnot volných parametrů učící soubor rozdělí na dva (pak metoda dostává přívlástek O, „with optimised parameters“). Na jedné polovině se metoda natrénuje (odladí) a na druhé otestuje (validuje). Přístup zabraňuje „přefitování“ dat, které se v praxech často vidí. Zapracování obou zmíněných přístupů jistě zkvalitňuje celkový výkon a přesnost metody a je jen k dobru věci.

Obě výhody se uplatní v aplikaci sesazování snímků s různými vlastnostmi, jakou jsou kupříkladu různé pásmové filtry přístroje AIA na družici SDO (kapitola 4.1). Sesazování snímků z různých kanálů AIA je denní rutinou a současně noční mûrou desítek slunečních fyziků na celém světě. K tomuto účelu jsou sice vyvinuty programové balíky, ale udané souřadnice v obrazových souborech často trpí odchylkami, takže snímky formálně sesazené na základě souřadnic jsou často i o několik obrazových bodů posunuty. Pak přichází na řadu dodatečná registrace, nejčastěji s pixelovou přesností. Sub-pixelová přesnost by byla velkou pomocí.

Co se týče kapitoly 4.2, zde bohužel nesdílím autorovo nadšení a to hned z několika důvodů, které si dovolím rozvést dále. Na úvod však musím zdůraznit, že astrofyzikální aplikace jsou vedlejším produktem hlavní činnosti, kterou byl vývoj a testování kódu IPC(O), které poukazují na další možnosti využití tohoto kódu.

Mé výhrady pramení především z toho, že se v oboru měření rychlostních polí ve sluneční fotosféře (což zahrnuje i diferenciální rotaci a meridionální cirkulaci) pohybují již téměř dvě desítky let. Metodologicky je tento obor mnohem bohatší, než odpovídá velmi stručné rešerši prezentované jak v disertační práci, tak v odpovídajícím odborném článku Hrazdíra a kol. (2021, DOI:10.3847/1538-4365/abc702). Proto jsem velmi skeptický vůči tvrzení, že použití IPC(O) je vůči jiným dostupným metodám superiorní.

Předně i jiné metody poskytují výsledná rychlostní pole v diferencovatelné formě (s konstantním prostorovým krokem). Mezi ty nejpoužívanější jistě patří algoritmus local correlation tracking (LCT; November, 1986, DOI:10.1364/AO.25.000392) nebo jeho fourierovská verze (Welsch et al., 2004, DOI:10.1086/421767). Diferencovatelnou rekonstrukci nabízí i coherent structure tracking (CST; Rieutord et al. 2007, DOI:10.1051/0004-6361:20066491). Obě metody sice neřeší změnu měřítka nebo otočení snímků, ale posuny detekují spolehlivě. Výsledkem použití těchto metod je diferencovatelné dvojrozměrné rychlostní pole, z něž lze průměrováním v délce získat jak diferenciální rotaci tak meridionální proudění. Podstatný zlomek mých impaktovaných prací staví na použití LCT a CST metod pro analýzu povrchového proudění ve sluneční fotosféře, využívajících družicová pozorování přístrojů MDI/SOHO a HMI/SDO, a tyto práce jdou dále za detekci diferenciální rotace nebo meridionálního proudění v oblasti centrálního meridiánu Slunce. Nejsem přesvědčen o tom, že by mohl být soustavný výzkum v tomto směru v současné době konkurenceschopný. Jako vedlejší aplikace metody primárně určené k něčemu jinému je měření diferenciální rotace zajímavé, ale tím to zřejmě končí.

V této kapitole se objevují i četné nepřesnosti, které jdou jednoznačně na vrub náhlého vstupu do neznámých vod. Uvedené tvrzení, že jižní polokoule rotuje rychleji než severní, nemá univerzální platnost. Závisí především na úrovni magnetické aktivity (polokoule s nižší aktivitou rotuje rychleji) a tedy na konkrétní situaci ve sluneční fotosféře.

Dále jsem přesvědčen o tom, že detekovaný meridionální proud směrem k rovníku je artefaktem metody, který by ovšem stál za hlubší prozkoumání. Ve fotosféře meridionální proudění existuje, ovšem v opačném směru. Objeven Duvallem (1979, DOI:10.1007/BF00155690) a konzistentně mapován jako „od rovníku k pólům“ na povrchu. V přípovrchových vrstvách (měřeno helioseismicky) též převládá směr k pólům, v literatuře reportované „protibuňky“ se ukázaly být

artefakty zpracování dat (viz rozsáhlá diskuse v sedmé kapitole přehledu od Hanasogeho, 2022, DOI:10.1007/s41116-022-00034-7). Vratný proud od pólu k rovníku nebyl spolehlivě detekován, dlouhodobá analýza jej však umísťuje na dno konvektivní zóny (Gizon et al., DOI:10.1126/science.aaz7119). Rychlost meridionálního proudu je při povrchu kolem 10 m/s. To při plném rozlišení HMI (cca 370 km/px) při 45s kadenci odpovídá posunu 0,001 px. Je třeba mít na paměti, že signál meridionálního proudění je „utopen“ v realizačním „šumu“ konvektivních pohybů, zejména supergranulí s typickými rychlostmi přinejmenším o řád vyššími (oproti tomu rychlost rotace je cca 2 km/s, tedy přibližně čtyřikrát větší než je charakteristická rychlost v supergranulích). V disertační práci a odvozené publikované studii jsou odvozené rychlosti v řádu stovek m/s. Takové pohyby jsou dostupnými metodami snadno detekovatelné a pozornosti by neunikly. Nabízí se ke zvážení, zda nejde o efekt vyvolaný p -mody oscilací, které jsou v HMI intensitygramech též pozorovatelné a mají tendenci měřicí metody mást. Je ustálenou praxí v případě trasování povrchových měření potlačit p -mody buď časovým průměrem (s gaussovskou vahou) nebo časoprostorovým filtrem s potlačením rychlostí vyšších než 7 km/s. Popravdě jsem byl velmi nepříjemně překvapen, že tento výsledek doprovázený velmi zmatenou argumentací literaturou prošel recenzním řízením v The Astrophysical Journal (Supplement Series). Domnívám se, že oponent článku v tomto případě nemohl být z oboru. K dalšímu bych doporučil studium již zmíněného přehledu od Hanasogeho (2022, DOI:10.1007/s41116-022-00034-7).

Ke kapitole 4.3 bych se jen zeptal, zda by bylo možné též využít IPC(O) metody místo feature-tracking metody. Výsledkem by bylo opět 2-D rychlostní pole, snad s indikací proudění slunečního větru. Tento přístup by mohl být užitečnější než detekce pohybů několika málo bodů. Je ovšem možné, že koronální struktury zůstávají víceméně statické a pohyb velmi malé části obrazu by se ztratil v efektivním průměrování v pohyblivém okně.

Z drobností musím zmínit pro mě matoucí použití normalizovaných souřadnicových os při kresbě dvojrozměrných obrázků. Doporučil bych spíše přímo použití jednotek s rozměrem (obrazových bodů), lépe by pak vynikla např. sekvence $L^3 \rightarrow L^1$ subpolí na obr. 3.12. Podobně je téměř nečitelný obr. 3.17, z něž je kvůli normalizaci nemožné odečíst hodnotu pozic obou maxim. K tomuto obrázku bych se ještě krátce vrátil, neboť zde jsou patrná tři maxima korelace, zatímco autor diskutuje jen dvě z nich. Je důvod pro tichou ignoranci třetího? Tisková kvalita některých obrázků (např. 2.1 d) není dostatečná ke spatření 1-pixelových vrcholů.

Nezbývá než konstatovat, že i přes zmíněné nedostatky práce naplnila zadání a dosáhla stanoveného cíle. Do budoucna bych snad pouze doporučil větší opatrnost při náhlém vstupu do vod jiných oborů. I zde je třeba nejprve se seznámit s problematikou přiměřeně do hloubky, přehlédnutí desítek let výzkumů znevěhodňuje závěry získané z prezentovaných výsledků.

Závěr: Předloženou doktorskou dizertační práci doporučuji k obhajobě a bude-li úspěšná, i udělení akademického titulu Ph.D.

Dotazy k obhajobě:

1. V tabulce 3.1 pan Hrazdára uvádí přesnost výpočtu registrace pro různé testovací obrázky. Není mi zcela jasné, proč by tato přesnost měla záviset na velikosti obrázku. Mohl by toto autor ozřejmit?
2. V Algoritmu 2 (str. 47) autor uvádí, že pro testovací/validační účely vytváří druhý obraz I_2 z prvního I_1 jeho subpixelovým posunem bilineární interpolací. Domnívám se, že by bylo vhodnější využít teoremu (1.4) a provést interpolaci ve fourierovské doméně, neboť by byla přesnější. Není bilineární interpolace pro extrémně malé subpixelové posuny problematická?
3. V rovnici (3.5) zavádí autor malý parametr ξ , aby se vyhnul potenciálnímu dělení nulou. Hodnota tohoto parametru je volitelná, jeho vliv na výsledné spektrum je však nesporný. Nebylo by lepší využít konstrukcí programovacího jazyka a buď se dělením nulami přímo

vyhnout a výsledek nahradit nulou, nebo využít rozšířené definice oborů reálných čísel (zde hádám, neumím jazyk C++, IDL, Matlab nebo Python/Numpy toto umožňují) a vzniklé Inf nebo NaN nahradit nulou?

4. Autor svůj kód zveřejnil na platformě GitHub (zde musím bohužel konstatovat, že program neobsahuje komentáře). Pro přímé aplikace však může být limitující volba implementačního jazyka. Astrofyzikové (a sluneční astronomové obzvláště) si pro zpracování a analýzu dat programují své vlastní zpracovatelské řetězce s využitím komunitních knihovnických balíčků. V současnosti v tomto světě dožívá jazyk IDL a na jeho místo se dere Python. Publikace kódu jako Python balíčku by jistě zjednodušila zástavbu tohoto kódu do zpracovatelských řetězců. Je možné kód obalit wrapperem pro Python?

Michal Švanda