

Výzkumný úkol

Vývoj a aplikace geometrické matice pro rychlou kameru v tomografii na tokamaku COMPASS

Jakub Svoboda

Obsah

1	Zadání	2
2	Přehled použití maticových kamer	2
2.1	DIII-D SXR rekonstrukce	2
2.2	TCV real-time rekonstrukce okraje	2
2.3	EDICAM na tokamaku COMPASS se započítáním odrazů	3
3	Návrh algoritmu pro kameru RIS	4
3.1	Odrazy	4
3.2	Implementované odrazy	4
3.3	Porovnání metod výpočtu geometrické matice	5
4	Implementace	5
4.1	Kalibrace kamery softwarem Calcam	5
4.2	Úpravy v kódu používaném na JET	6
4.3	Úpravy v restrukturalizovaném kódu z JET	7
5	Testování	8
5.1	SXR data z JET	8
5.2	SXR data z COMPASS	8
6	Výsledky	8
6.1	Vliv MFI	8
6.2	Svazek ubíhajících elektronů	8
6.3	Započítání odrazů	12
	Seznam použitých zdrojů	13

1 Zadání

1. Odladění výpočtu geometrické matice metodou svislých rovin na reálných datech pro rychlou kameru na tokamaku COMPASS.
2. Implementace matice do tomografického algoritmu (MFR), analýza dat.
3. Započítání odrazů na stěně vakuové nádoby tokamaku do geometrické matice nebo do algoritmu regularizace, diskuse výsledku.

2 Přehled použití maticových kamer

2.1 DIII-D SXR rekonstrukce

Je používána maticová SXR kamera, která sleduje oblast divertoru. Pozorovaná oblast je dělena na prostorové pixely ve tvaru kvádrů. Toto dělení nevyužívá předpoklad toroidální symetrie. Umožňuje také poměrně snadno započítat helicitu. Vypočítá se silokřivka vycházející ze středu krychle, příspěvek který leží v krychli se poté přičte do toho pixelu, kterým projde ve zvolené poloidální rovině.

V tomto případě je více zón než detektorů v kameře, jedná se o předdefinovaný problém[3]. Tomografický algoritmus využívá regularizaci s parametrem λ . Jeho hodnota je hledána pomocí nalezení rohu L křivky, která vyjadřuje poměr mezi residuální normou a seminormou (znázorněna na obr. 1). Jsou použity dvě metody pro nalezení rohu, maximum křivosti a minimum vzdálenosti od počátku os.

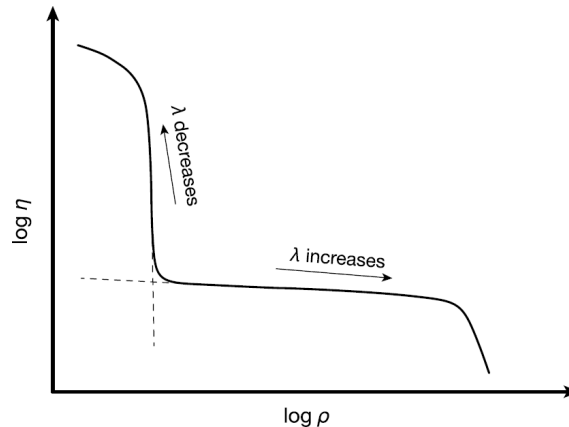
Vlastní řešení je realizováno metodou GSVD (generalized singular value decomposition), omezující (constraint) podmínka Laplaceova. Obsahuje diference druhého řádu, proto je potřeba ošetřit okraje. Je využita Dirichleta nebo Von Neumann okrajová podmínka.

2.2 TCV real-time rekonstrukce okraje

Nejedná se o tomografii, pouze o příklad využití maticové kamery snímající viditelné spektrum na tokamaku.

Instalovány jsou dvě rychlé kamery s tangenciálním pohledem na plazma snímající viditelné světlo.

Motivací pro vývoj jsou nedostatky magnetických diagnostik. Tyto mohou trpět integrálními nepřesnostmi při dlouhých výbojích, případně zaznamenávat slabý signál, v případě kdy prochází malý proud plazmatem.



Obr. 1: L křivka pro tomografický algoritmus použitý na maticovou SXR kameru na tokamaku DIII-D. ρ je residuální norma a η seminorma. [3]

Kamery je potřeba stínit proti magnetickému poli. Jsou umístěny dále od komory. Světlo je vedeno přenosovou optikou, která zároveň slouží k zaostření širokoúhlého záběru komory na čip v kameře.

Tato diagnostická metoda využívá OFIT algoritmus, který nevyžaduje tomografickou rekonstrukci, která je časově náročná. to umožní dosáhnout rekonstrukce v reálném čase tzv. RT-OFIT. Tento systém předpokládá maximum vyzařování na hranici plazmatu. Využívá jen některé části z celkového snímaného obrazu. Především jde o oblasti kde se okraj promítne do liniových útvarů v obraze zaznamenaném kamerou. Zvané oblasti zájmu (*angl.* ROI -Region Of Interest). V těchto oblastech dojde k převzorkování obrazu a hledání největšího gradientu v radiálním směru. Výběr ROI je prováděn ručně, automatické nastavení zatím nebylo implementováno. Pixelům jsou přiřazeny pozorovací linie, které jsou pak převedeny do kolmé roviny pomocí OFIT transformace. Využívá se přiblížení pinhole a započítává se i rozbíhání linií.

Pro potlačení vlivu nečistot, které nezáří v oblasti okraje je možné použít filtry.

Bylo úspěšně testováno i pro feedback. Rozdíl od magnetické diagnostiky byl menší než 1 cm.

[1]

2.3 EDICAM na tokamaku COMPASS se započítáním odrazů

Byla nastavena na tangenciální pohled. Kamera se už nepoužívá a je nahrazena kamerami RIS1 a RIS2, jejichž poloha se liší pro různé kampaně.

Kamera EDICAM v důsledku svého nastavení snímala i velké množství odrazů na vakuové komoře tokamaku a limitech. Pro získání použitelných výsledků bylo nutné odečíst tyto odrazy. Pro toto byly použity dva modely odrazů podle typu materiálu. Zvlášť pro lesklý (1), použitý pro komoru tokamaku a matný (2) pro limity. Hlavní rozdíl mezi těmito modely je v závislosti na úhlu odrazu. Matný model na tomto úhlu nezávisí a odpovídá tedy případu, kdy ve Phongově modelu zvolíme $c_s = 0$.

$$f_{Phong} = c_p \cos^{c_s} \alpha \quad (1)$$

Kde α je úhel mezi normálovým vektorem povrchu, na kterém dochází k odrazu, a směrového vektoru odraženého paprsku.

$$f_{Lambert} = c_l \quad (2)$$

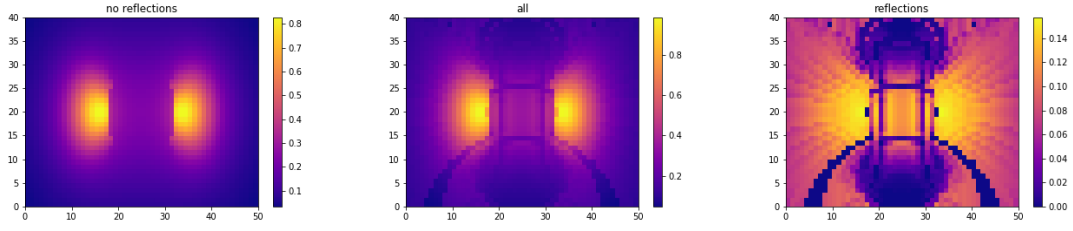
c_p , c_s , c_l jsou konstanty popisující materiál. Určení těchto konstant v tokamaku je velmi obtížné a proto byl použit numerický algoritmus pro jejich určení. Bylo provedeno několik rekonstrukcí pro různé parametry a poté vhodnou metrikou zvolen nejlepší výsledek [2].

Aby bylo možné výpočet odrazů implementovat, musela být učiněna následující přiblížení

- Zanedbání vícenásobných odrazů
- Předpoklad toroidální symetrie
- Matný model počítaný pouze v poloidální rovině
- Materiálové konstanty určeny numericky
- Zanedbání lesklých odrazů na limitech
- Zanedbání matných odrazů na vakuové nádobě

Za těchto předpokladů byl spočítán model odrazů. Dále byl pořízen snímek komory s difúzním světlem, který byl použit jako maska k odstranění nepravidelností, jako jsou například diagnostické porty.

Pro samotnou tomografickou rekonstrukci byl použit standardní regularizační algoritmus používaný pro záření v rentgenové oblasti, pro které se používá podstatně menší množství detektorů a tudíž i geometrická matice je řidší. Toto mělo za následek poměrně špatnou konvergenci, která se ještě zhoršila po zavedení odrazů, které dodali do matice další nenulové prvky.



Obr. 2: Signál získaný násobením geometrické matice bez odrazů, s odrazy a odrazové matice s modelovou funkcí. Byli použity modelové chordy a geometrie komory tokamaku COMPASS.

3 Návrh algoritmu pro kameru RIS

Pro výpočet geometrické matice bez odrazů byla implementována upravená metoda svislých rovin. Východí metoda je z mé bakalářské práce, která byla přepsána do jazyka python. Dále došlo k úpravám ve funkci *follow_los*, tak aby se zajistila správná detekce kolize pozorovací linie se stěnou. Konkrétně byla pro všechny pozorované linie použita stejná metoda detekce kolize vycházející ze "složitější detekce" a byl u ní upraven způsob v jakém pořadí funkce prochází pixely. Toto nové pořadí průchodu pixelů předpokládá pohled z horizontálního směru.

3.1 Odrazy

Využití stejných předpokladů jako v části 2.3. Pro započítání odrazů je potřeba znát průsečíky pozorovacích linií s okrajem vakuové komory. Z jejich znalosti lze určit typ odrazu (lesklý, nebo matný) a jeho směr, vypočítaný ze směrového vektoru pozorovací linie a normály povrchu na který dopadne podle vzorce,

$$\vec{\sigma} = 2(\vec{d} \cdot \vec{n})\vec{n} + \vec{d} \quad (3)$$

kde $\vec{\sigma}$ je směrový vektor odraženého paprsku, $\vec{d}$ dopadajícího a $\vec{n}$ je normálový vektor povrchu na který dopadne. $\vec{d}$ je následně využito jako osa "odrazového jehlanu", tj. skupiny vektorů, z nichž se vytvoří chordy pro geometrickou matici odrazu. Následně se spočítá nová geometrická matice s pinhole nastavenou na místo dopadu a s chordami generovanými z odrazného jehlanu. Následně se příspěvky vynásobí váhovou funkcí (2) nebo (1) podle typu povrchu a sečtou se, tím vytvoří vektor, který rozměrově odpovídá jednomu řádku původní geometrické matice. Protože metoda svislých rovin je optimalizovaná na výpočet pro kameru s pohledem, který je spíše ve vodorovném směru, jeví se jako vhodnější způsob integrální metoda, vytvořená pro ověření výsledků metody svislých rovin (viz oddíl 3.3), která je sice méně přesná, ale je univerzálnější a robustnější. Navíc, při vhodné volbě kroku může být přesnost jen nepatrně horší a časově srovnatelně i dokonce méně náročná.

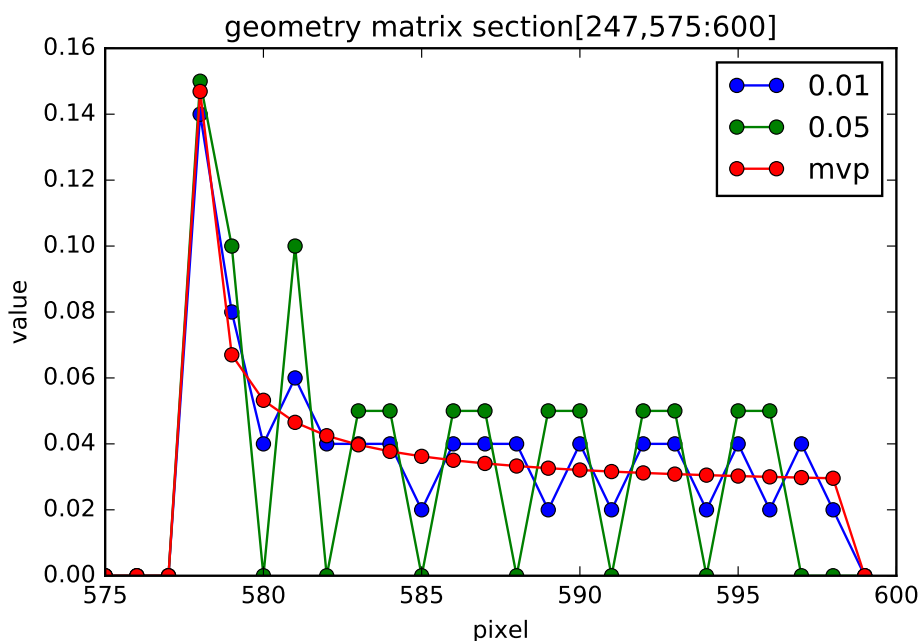
3.2 Implementované odrazy

Z časových důvodů nebylo možné provést poměrně náročný výpočet odrazů pomocí dvou modelů. Vyžadovalo by to rozdělení chord podle místa dopadu. Navíc by bylo potřeba určit 3 konstanty pro váhové funkce odrazů. Z těchto důvodů jsem se rozhodl odklonit od modelu popsaného v části 2.3 a navrhnout zjednodušený univerzální model. Tento hybridní model je něco mezi matným a lesklým. Využívá váhové funkce jako u matného, tj. násobení konstantou, ale chordy odrazu jsou generovány v závislosti na směru dopadu, jako u lesklého modelu. Pro výpočet bodů dopadu chord na komoru byl upraven algoritmus metody svislých rovin, tím lze ušetřit časově náročné procházení chord programem *calcam*. Ukázka signálu s odrazy spočítaná v testovacím prostředí na geometrii tokamaku COMPASS je na obr. 2.

3.3 Porovnání metod výpočtu geometrické matice

Pro potřeby testování a porovnání byla použita modelová geometrie uvažující vakuovou nádobu obdélníkového průřezu s obdélníkovou překážkou. Kamera skládající se z 500 citlivých míst (25 v řádku, 20 ve sloupci) byla umístěna na ekvatoriální rovinu s vodorovným pohledem přímo na osu souměrnosti komory.

Na obrázku 3 je znázorněna část hodnot geometrické matice počítaná pomocí různých metod. U hodnot počítaných numerickou integrací si lze všimnout diskrétních hladin lišících se právě o velikost integračního kroku. Platí, že čím menší krok, tím více se integrační metoda přibližuje spojitým, analyticky počítaným hodnotám určených metodou svislých rovin, jak je patrné z obr. 4, kde jsou zobrazeny výsledky integrační metody s 10x menším krokem než na obr. 3. Výhodou integrační metody je především její algoritmická jednoduchost a nevýhodou menší přesnost. Tuto nevýhodu je částečně možné odstranit menším krokem (viz. srovnání obr. 3 a 4), nikoliv však zcela, při příliš malém kroku se objeví zaokrouhlovací chyba. Zároveň se zmenšujícím krokem se zvyšuje časová náročnost výpočtu geometrické matice. Výpočetní doba integrální metodou v závislosti na kroku počítaná na modelové konfiguraci je znázorněna na obr. 5.

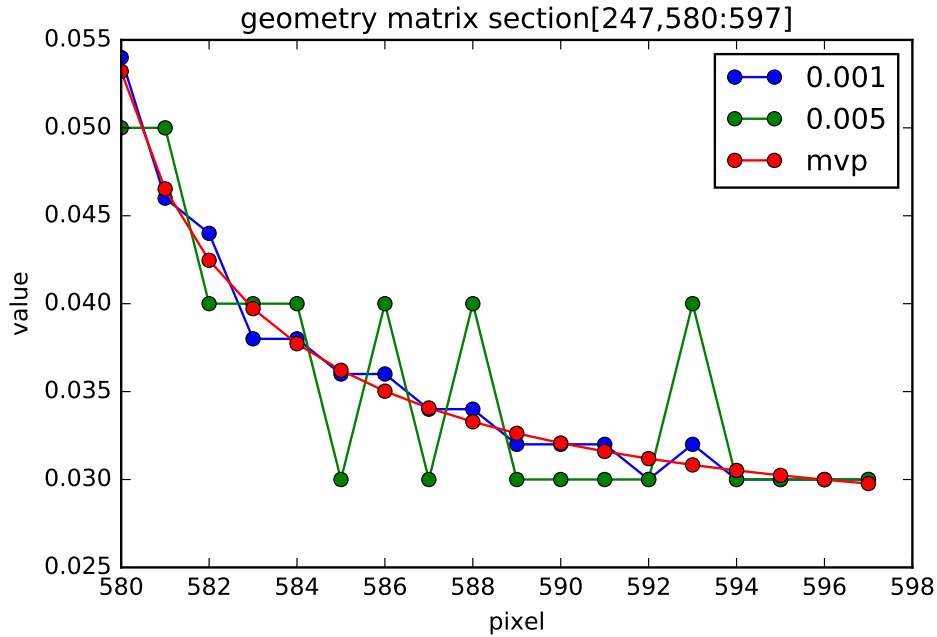


Obr. 3: Porovnání části geometrické matice, počítané metodou svislých rovin a integrační metodou pro dvě různé velikosti kroku

4 Implementace

4.1 Kalibrace kamery softwarem Calcam

Kalibrace byla provedena pro data z výstřelu 13000. Stručný a zároveň výstižný návod, jak spustit Calcam, který napsal Ing. Petr Vondráček, je k nalezení na adrese [/compass/Shared/Common/IT/projects/calcam/how](#). V softwaru Calcam se porovnává reálný obraz z kamery s pohledem na CAD model a označují se stejná místa. K softwaru Calcam je napsán manuál, kde je dobře popsáno ovládání. Je nutné správně natočit CAD model, aby došlo k dobré konvergenci fitu. Je vhodné vybrat snímky, kde je hodně odrazů na stěně komory. To umožní dobře vidět detaily na komoře, které jsou potřeba pro správnou kalibraci kamery. Také je nezbytně nutné, aby snímek byl ve stejném rozlišení, v kterém kamera snímá! Z tohoto důvodu není vhodné vybrat snímek ze souboru ve video formátu (mp4,



Obr. 4: Porovnání části geometrické matice, počítané metodou svislých rovin a integrační metodou pro 10x menší hodnoty kroku než na obr. 3. Pro názornější zobrazení byla vybrána menší část matice

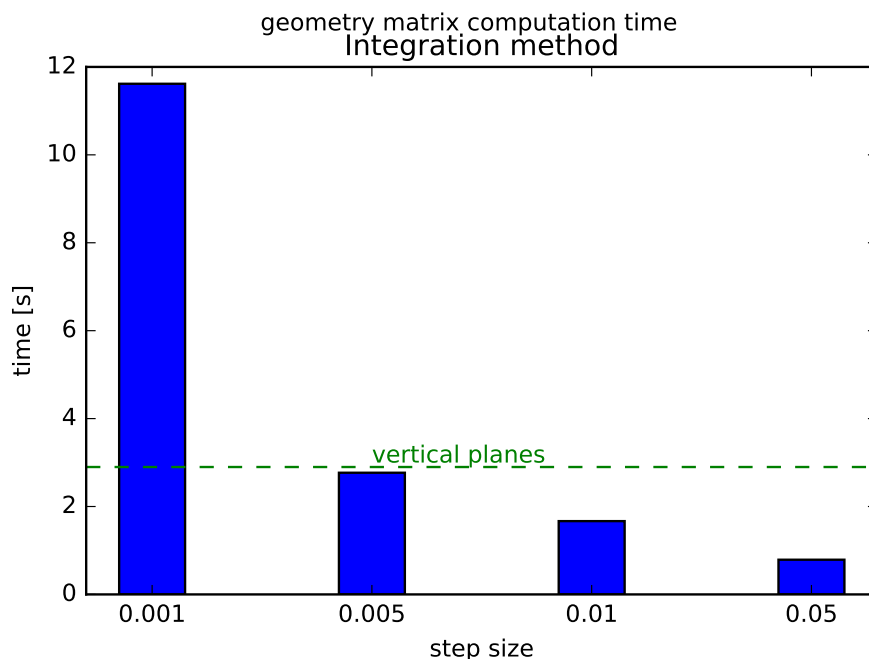
...), protože tato videa mohou mít změněné rozlišení. Pro vytvoření takovýchto snímků jsem napsal kód `data_load.py`, který obsahuje funkci načítající data a funkci vytvářející z nich grafické soubory pro jednotlivé snímky z kamery se správným rozlišením. Zároveň se mi osvědčilo, když byl obrázek pro kalibraci v odstínech jedné barvy, obzvláště se osvědčilo barevné schéma 'copper' knihovny `matplotlib.pyplot`. Příklad takového snímku je na obr. 6. Vykreslený pohled pomocí kalibrace je na obr. 7.

Po provedení kalibrace je potřeba ze souboru s kalibračními výsledky získat souřadnice pro chordy. K tomu byl napsán kód `calcam_notes.py`, který je potřeba spustit ve složce se složkou obsahující zdrojové kódy Calcam, aby bylo možné nainportovat třídu výsledků `CalibResults` (viz dokumentace Calcam).

4.2 Úpravy v kódu používaném na JET

Níže je uveden seznam úprav provedených v kódu *TOMO_NEW_BUILD*, který lze nalézt ve složce `/compass/home/Shared/Exchange/JET-TOMO_dev`.

- přidání zdrojového kódu `geom_mat_gen_vp.py`, který obsahuje funkce pro výpočet matice metodou svislých rovin
- přepsání části volající starou proceduru výpočtu geometrické matice v `geom_mat_setting.py`
- nakopírování složky obsahující geometrické vlastnosti tokamaku COMPASS do složky `geometry`
- přidání diagnostiky "RIS" do kódu `compass.py`
- přidání podpůrných funkcí pro načítání a ukládání dat, načítání chord... do různých míst kódu

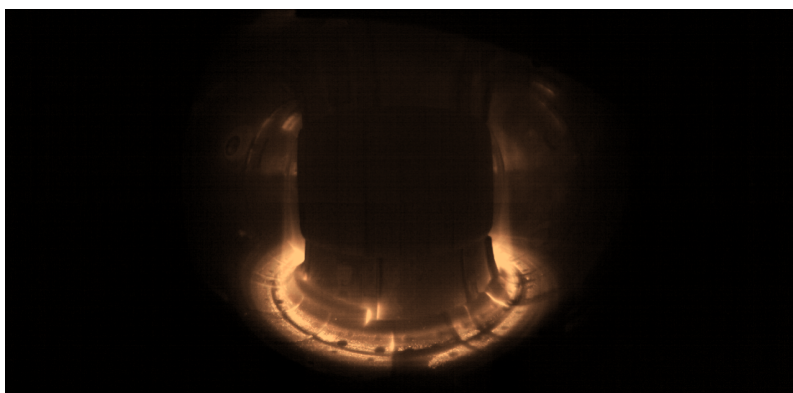


Obr. 5: Zobrazení časové náročnosti výpočtu geometrické matice integrační metodou v závislosti na velikosti integračního kroku. Pro porovnání je znázorněna doba výpočtu metodou svislých rovin

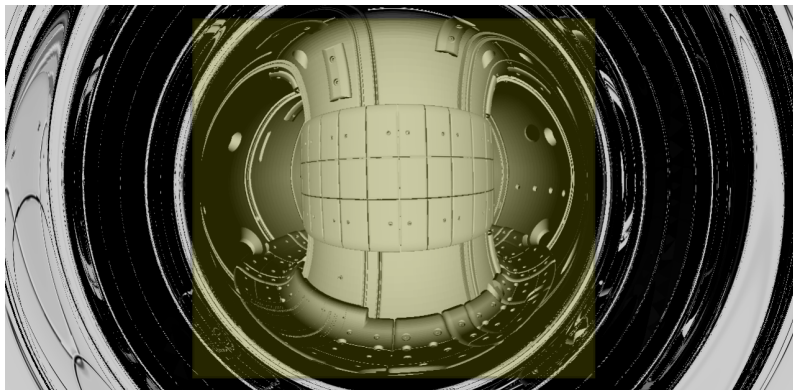
- přidání vlastnosti *dim* objektu COMPASS, pro standardní tomografie roven 2 pro maticovou kameru 3 (počet souřadnic pro chordy) vypíná předkalibraci nutnou pro detektory rentgenového záření, úprava v několika místech kódu
- úprava podmínky vytvářející jednotkové kalibrace pro detektory *calbs*, aby fungovala i pro *dim* = 3 ve *start_nogui.py*

4.3 Úpravy v restrukturalizovaném kódu z JET

Během práce na úpravě staršího kódu byla Ing. Ondrou Groverem provedena jeho restrukturalizace a také došlo k aktualizaci softwarových modulu na počítačích COMPASSu. Po této aktualizaci python verze 2.7 nenačítá modul řídkých matic, který přibližně 6x zrychlí tomografickou rekonstrukci. Proto byl proveden pokus o úpravu restrukturalizované verze. Bohužel se ukázalo, že ani



Obr. 6: Jeden ze snímků komory vyjmutý z raw dat z kamery RIS ze shotu 13000, podle kterých byla prováděna kalibrace. Tento je s pořadovým číslem 1668.



Obr. 7: Snímek komory vygenerovaný z kalibrace calcam s vyznačenou oblastí, která byla použita pro rekonstrukci.

u nová verze se nedaří načíst modul pro výpočet s řídkými maticemi a proto jeho úprava nebyla dokončena. Níže jsou popsány provedené kroky, které ovšem nezaručí funkčnost kódu pro tomografickou rekonstrukci z dat z kamery RIS.

- nakopírování upravené složky compass, souborů start_lite... a úprava importů podle nové struktury
- přidání importu do inicializačního souboru v tomotok/input/tokamak
- úprava proměnné tokamak_list a přidání importu v tomotok/input/tokamak/load.py

5 Testování

5.1 SXR data z JET

Prvním krokem v implementaci bylo nahrazení původního algoritmu pro výpočet geometrické matice. Výsledné součty geometrických matic, přenesené do poloidální roviny jsou znázorněny na obr. Po implementaci metody svislých rovin se naskytla možnost otestovat funkčnost celého algoritmu a srovnat výsledky s původním. Tato srovnání jsou zobrazena na obrázcích 9 a 10. Byl použit výstřel 86614, především proto, že byl k dispozici pro původní kód.

5.2 SXR data z COMPASS

Po implementaci geometrie tokamaku COMPASS do tomografického kódu, se naskytla možnost provést stejný test a vyzkoušet u toho zároveň kompatibilitu geometrické konfigurace COMPASSu s tomografickým algoritmem. Test byl proveden stejně jako v předchozím oddíle. Použitá data jsou z výstřelu 5751. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 11 a 12.

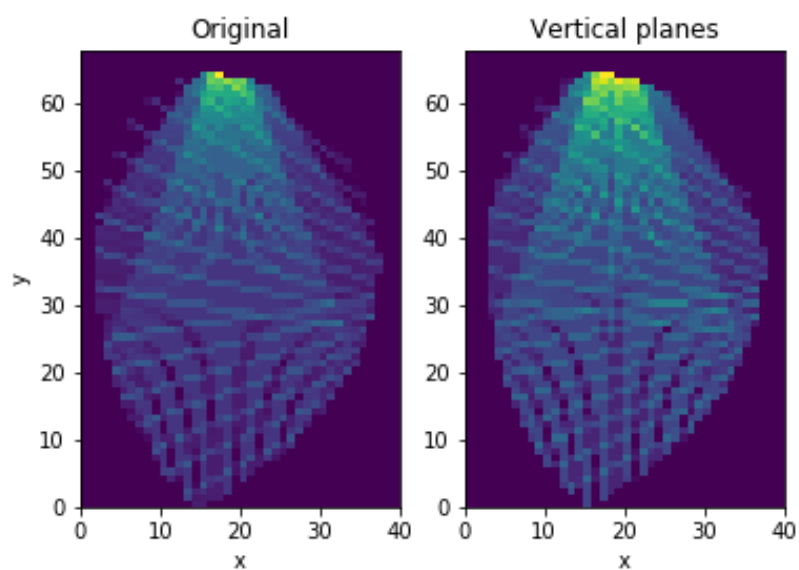
6 Výsledky

6.1 Vliv MFI

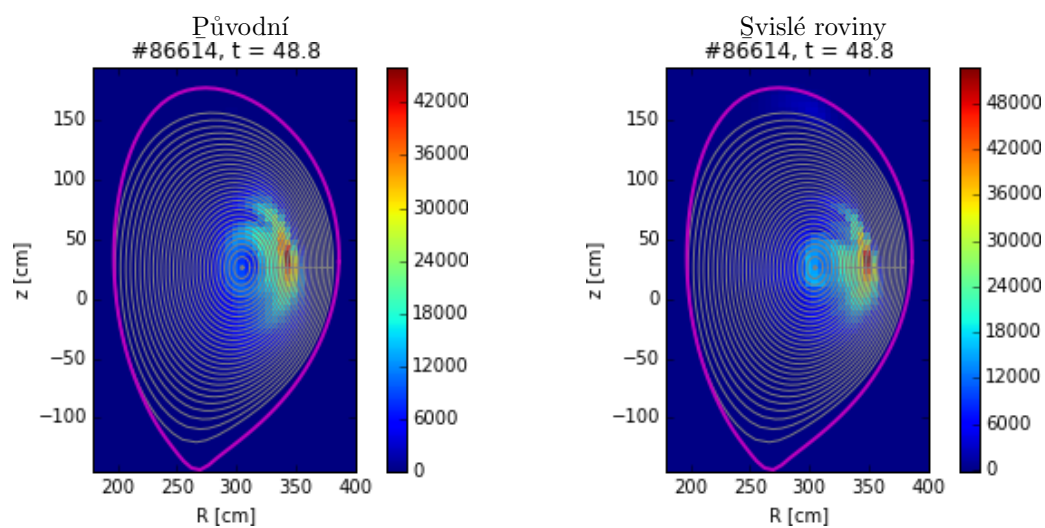
Vliv regularizace pomocí MFI je zobrazen na obr. 13, původní data na obr. 14

6.2 Svazek ubíhajících elektronů

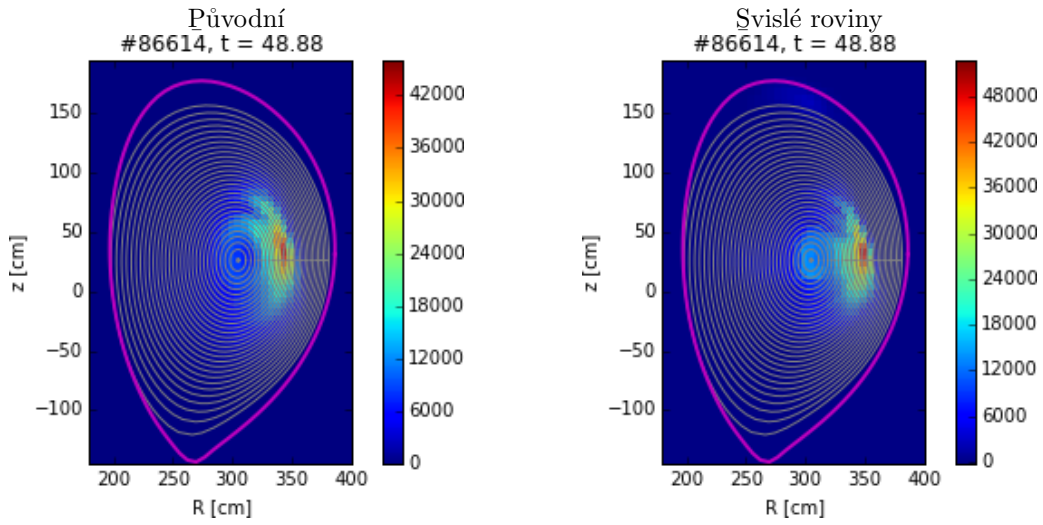
Byl proveden pokus o rekonstrukci svazku ubíhajících elektronů. Původní data a rekonstrukce jsou zobrazena na obr. 15. Inverze nedokázala najít přesnou pozici svazku, to může být způsobeno jak nedostatkem různých směrů pohledu, tak i nesymetrií svazku v toroidálním směru.



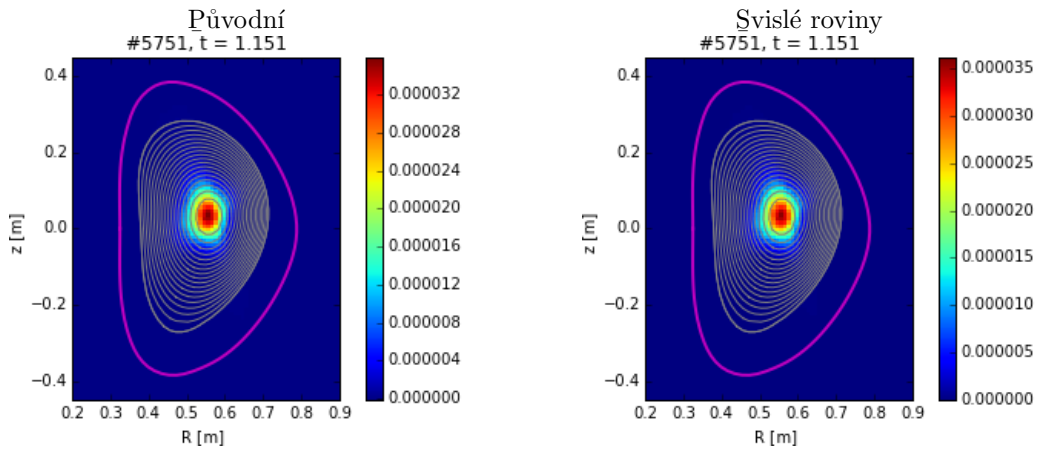
Obr. 8: Příspěvková matice počítaná původním způsobem a metodou svislých rovin.



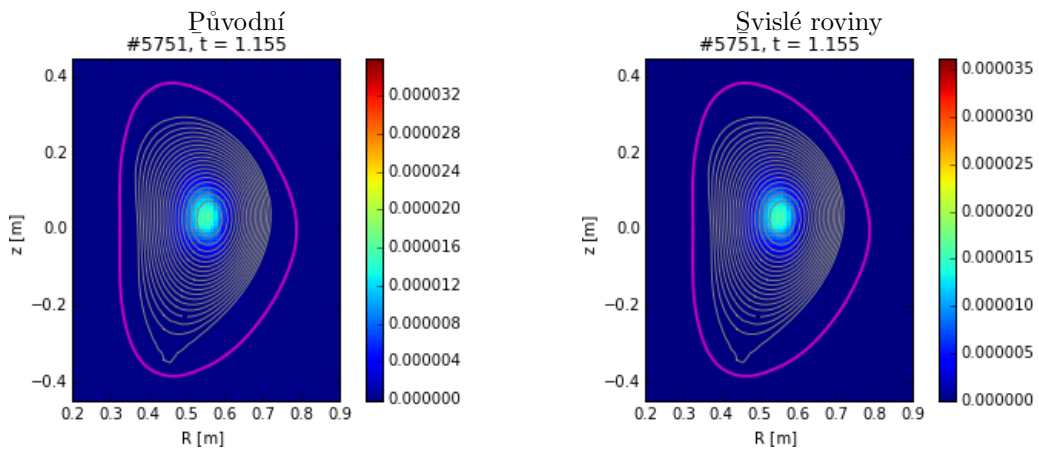
Obr. 9: Srovnání výsledků tomografie při využití geometrické matice vypočítané původní metodou, nebo pomocí metody svislých rovin



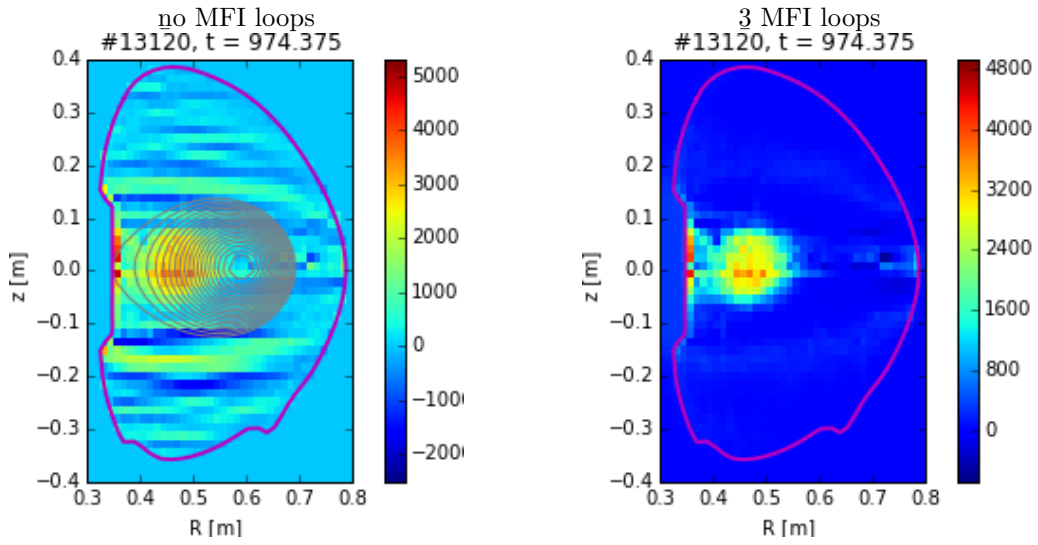
Obr. 10: Srovnání výsledků tomografie při využití geometrické matice vypočítané původní metodou, nebo pomocí metody svislých rovin



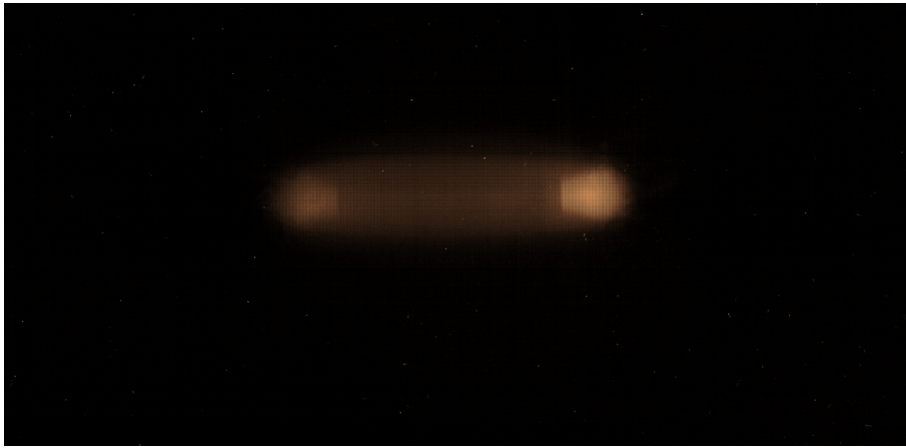
Obr. 11: Srovnání výsledků tomografie při využití geometrické matice vypočítané původní metodou, nebo pomocí metody svislých rovin



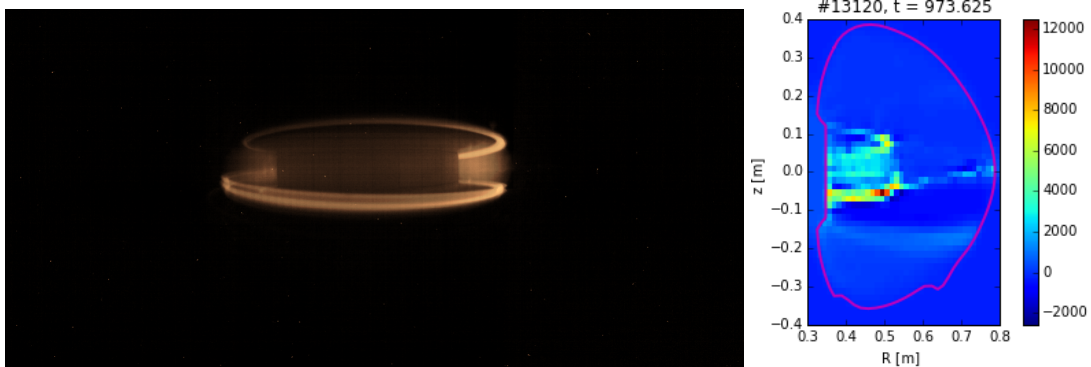
Obr. 12: Srovnání výsledků tomografie při využití geometrické matice vypočítané původní metodou, nebo pomocí metody svislých rovin



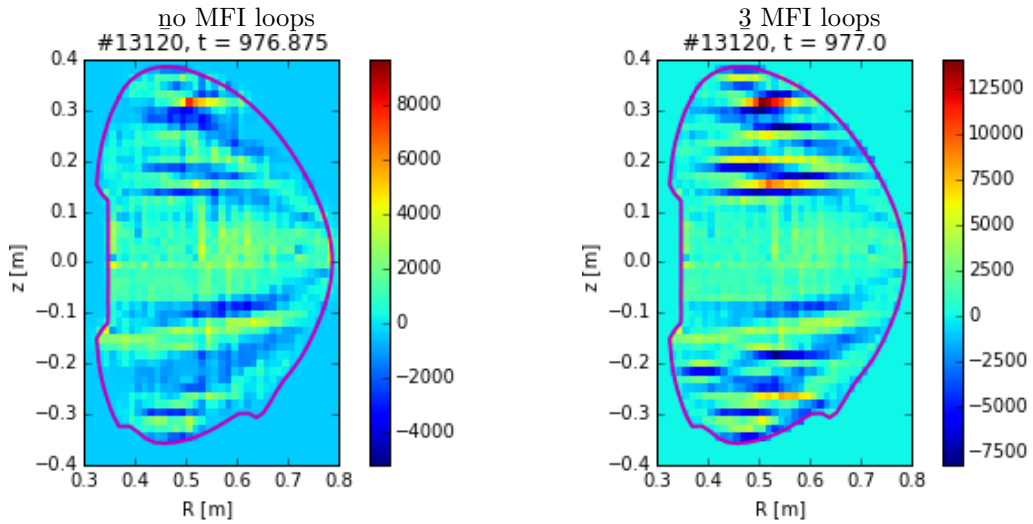
Obr. 13: Srovnání výsledků tomografické inverze při různém nastavení minimalizace fisherovy informace



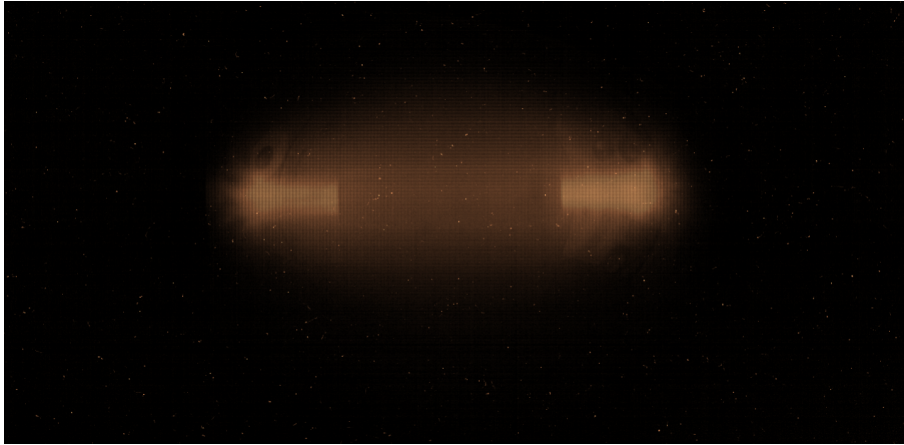
Obr. 14: Data z shotu 13120 z RIS kamery v čase 976,375ms, rekonstrukce těchto dat jsou na obr. 13. Barevné schéma není původní.



Obr. 15: Vlevo data z shotu 13120 z RIS kamery v čase 973,625 ms zachycující ubíhající svazek, rekonstrukce těchto dat je na obr. 15. Barevné schéma není původní. Vpravo tomografická rekonstrukce.



Obr. 16: Srovnání výsledků tomografické inverze při různém nastavení minimalizace fisherovy informace



Obr. 17: Data z shotu 13120 z RIS kamery v čase 977 ms zachycující obraz s odrazy, který byl použit pro rekonstrukce na obr. 16. Barevné schéma není původní.

6.3 Započítání odrazů

Nepodařilo se získat smysluplnou rekonstrukci po započítání odrazů. Bylo vyzkoušeno několik nastavení počtu regularizačních cyklů, tak jako u matice bez odrazů, ale nepodařilo se nalézt konfiguraci, která by umožnila dosáhnout lepších výsledků.

Reference

- [1] G. HOMMEN ET AL., *Real-time optical plasma boundary reconstruction for plasma position control at the TCV tokamak*, Nuclear Fusion, 54 (2014), p. 073018.
- [2] M. ODSTRČIL ET AL., *Plasma tomographic reconstruction from tangentially viewing camera with background subtraction*, Review of Scientific Instruments, 85 (2014), p. 013509.
- [3] A. WINGEN ET AL., *Regularization of soft-X-ray imaging in the DIII-D tokamak*, Journal of Computational Physics, 289 (2015), p. 83:95.