

Automatizace zpracování obrazových a 3D dat pomocí hlubokého učení

Souhrnná zpráva o řešení projektu smluvního výzkumu za rok 2024

Číslo smlouvy: 000928/2024/00

Období řešení: 1. 1. 2024 - 31. 12. 2024

Předmět smluvního výzkumu

Předmětem spolupráce je analýza současných trendů v moderních metodách hlubokého učení pro porozumění a automatickou analýzu obrazových i povrchových 3D dat. Tvorbě analýz vhodnosti využití nových metod pro potřeby a úlohy definované Partnerem a experimentálním ověření vlastností vybraných metod a konzultacích již existujících řešení Partnera a technické pomoci při jejich inovaci.

Předpokládané výstupy z realizace Předmětu spolupráce jsou zejména

- Vypracované rešerše, analýzy a diskuse výsledků provedených experimentů ve formě stručných technických zpráv, prezentací či konzultací.
- Datové sady připravené pro provedení experimentů.
- Natrénované modely neuronových sítí.
- Software vytvořený Zhotovitelem na základě této smlouvy (skripty pro trénování, testování a porovnání metod, apod.).

Popis řešení v roce 2024

Po dohodě s Partnerem se realizace projektu v roce 2024 zaměřila na dvě klíčové oblasti:

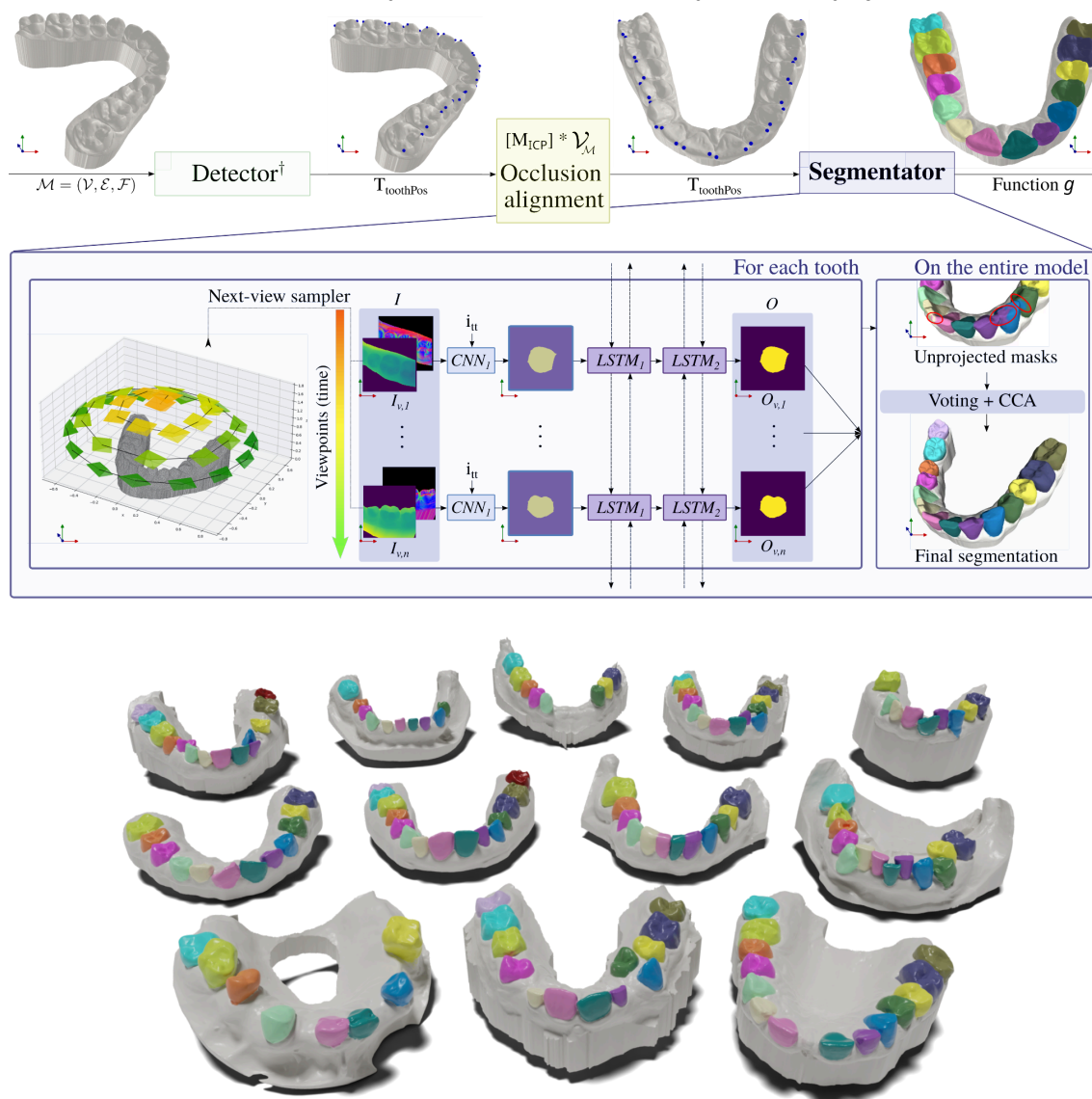
- I. Strojové učení pro analýzu 3D tvarů v digitálním zubním lékařství, kde konkrétní úlohou byly metody pro segmentaci zubů v dentálních 3D povrchových skenech a experimenty s vhodnými reprezentacemi 3D tvaru pro účely efektivního trénování modelů hlubokého učení.
- II. Sešívání 2D obrázků z elektronové mikroskopie pomocí neuronových sítí pro detekci významných bodů a následné globální optimalizace vzájemné pozice obrázků.

I. Strojové učenie pre analýzu 3D tvarov v digitálnom zubnom lekárstve

(Tibor Kubík)

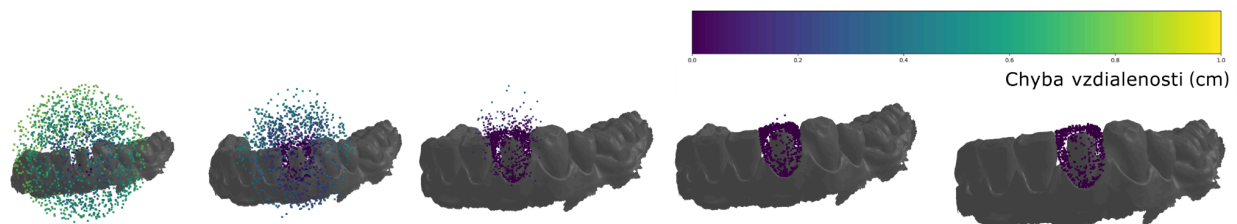
- Automatizácia segmentácií zubov v 3D povrchových skenoch čelustí:

- Finalizácia experimentov metódy využívajúcej viacpohľadové 2D projekcie ako reprezentáciu na učenie segmentačnej metódy zubov v povrchových 3D datach. Metóda a ukážky výstupov viz. Obrázek 1.
- Príprava tréovacích a testovacích skriptov využívaných pre modelovanie, tréovanie a vyhodnotenie navrhnujetej siete.
- Komparatívna analýza pripravenej segmentačnej metódy so súčasným riešením v jednom z produktov Partnera. Súčasťou komparatívnej analýzy bola i príprava testovacích prípadov so zameraním na problémové dáta v aktuálnej metóde.
- Prezentácia výsledkov komparatívnej analýzy Partnerovi. Na základe predstavených výsledkov bolo schválené zaintegrovanie metódy vzniknutej v rámci zmluvného výskumu do softvéru, ktorý Partner vyvíja.



Obrázek 1: Schéma segmentačnej metódy zubov v 3D povrchových skenoch čelustí (hore) a ukážkové výstupy tejto metódy (dole).

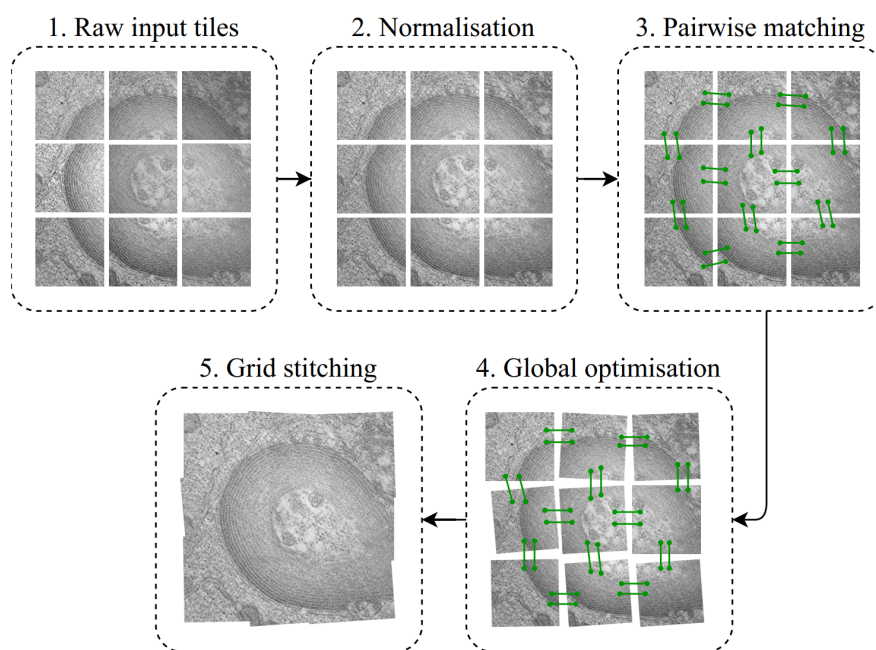
- Analýza reprezentácie 3D tvarov ako *Distance fields* pre účely efektívneho tréningu modelov hlbokého učenia
 - Analýza súčasného poznania v odvetví tzv. *Self-supervised pretrainingu*. Hlavná myšlienka je príprava robustnejšieho modelu hlbokého učenia bez využitia anotácií. Bežnou technikou je kontrolované maskovanie častí vstupnej geometrie so snahou naučiť sieť generovať chýbajúcu časť. Takto natrénovaný model je možné dotrénovať na konkrétne úlohy definované Partnerom so zvýšenou presnosťou a tréningovou fázou zaberajúcou nižší čas.
 - Na základe analýzy súčasného stavu poznania bol ďalej analyzovaný nový typ 3D reprezentácie, tzv. *Neural distance fields*. Umožňuje trénovať kompaktné neuronové siete s nízkym výpočtovým časom pri inferencii.
 - Bol vykonaný prieskum verejne dostupných povrchových 3D datasetov ako hlavný zdroj na tréningovanie self-supervised siete. Prieskum bol zameraný na datasey všeobecných 3D tvarov (ShapeNet, ModelNet, Objaverse) a taktiež na medicínske dáta (MedShapeNet, Teeth3DS).
 - Vznikli skripty na predspracovanie dát obsahujúce konverziu z mesh štruktúry na rôzne typy distance fields (zmamienkové/neznamienkové).
 - Vznikli nové tréningové skripty vhodné na tento typ 3D reprezentácie. Prvotné experimenty sa zameriavajú na využitie distance field reprezentácie v úlohe automatickom generovaní 3D korunky na základe kontextu definovanom okolitými anatomickými štruktúrami. Ukážka generovania korunky rezáku pomocou novej iteratívnej metódy založenej na neural distance fields je vyzobrazený na Obrázku 2.
 - Návrh vylepšenia: zapojenie predtréningovania a analýza efektivity predtréningovania v úlohe automatického generovania koruniek reprezentovaných ako neural distance fields.



Obrázek 2: Ukážka procesu iteratívnej metódy na generovanie korunky rezáku (mračno bodov zakódovaný do farebnej mapy podľa vzdialenostnej chyby) na základe anatomického kontextu (šedá geometria) pomocou neural distance fields.

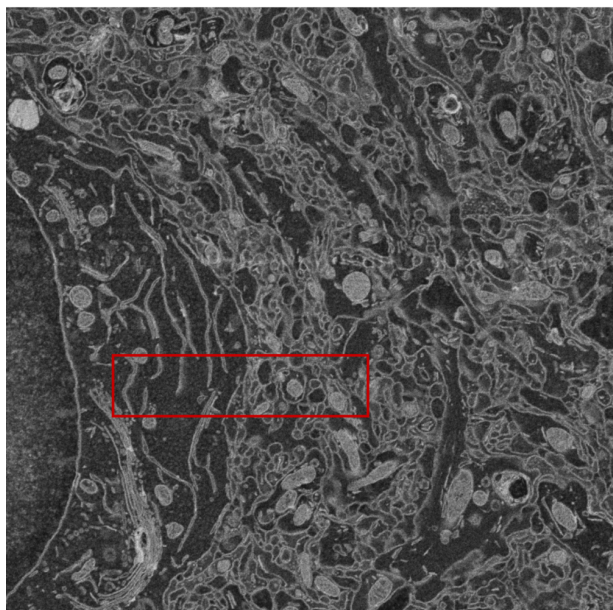
II. Sešívání obrázků z elektronové mikroskopie pomocí neuronových sítí (Petr Šilling)

- Analýza možností zlepšení aktuálních metod sešívání mřížek snímků z elektronových mikroskopů pomocí neuronových sítí. Dosavadní metody zatím používají výhradně tradiční přístupy. To často vede na problémy u složitějších snímků s nekvalitní texturou a složitějšími vzory.
- Analýza vhodných architektur sítí pro řešení problému (vybrán LoFTR).
- Příprava syntetického datasetu pro trénování a vyhodnocení. Hlavním zdrojem byly veřejně dostupné snímky z elektronové mikroskopie, ze kterých se generovaly mřížky snímků typické pro standardní snímání.
- Návrh procesu sešívání. Prvně se hledají shody mezi sousedními snímky pomocí LoFTRu učeném na vytvořeném datasetu. Následuje zpřesnění pomocí globální optimalizace. Proces byl pojmenován Deep Electron Microscopy Image Stitching (DEMIS) a je ilustrován na Obrázku 3.
- Příprava skriptů pro předzpracování vstupních dat, učení LoFTRu a konfigurovatelné sešívání snímků podle navrženého postupu. Natrénovaný model je k dispozici a lze jej použít pro sešívání.
- Provedení experimentů na syntetických datech i problematických reálných datech získaných z TESCAN GROUP. Experimenty zaměřeny na vyhodnocení kvality výstupu a využívají primárně nově navrženou metriku inspirovanou související literaturou.
- Vyhodnocení přesnosti. Použití LoFTRu místo tradičních metod vedlo na 31% zlepšení oproti tradičním metodám (SIFT, ORB). DEMIS byl také o 1408 % přesnější než jedna z hlavních konkurenčních metod z literatury (MIST). Porovnání výstupů je na Obrázku 4.
- Návrh vylepšení: otestování sítí navazujících na LoFTR, vyhodnocení zaměřené na různé úrovně překryvu a různé druhy transformací v nasnímaných datech.

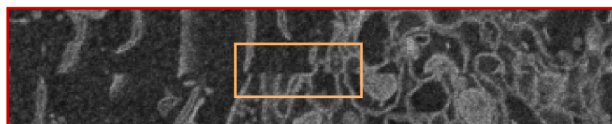
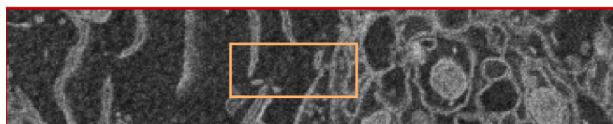
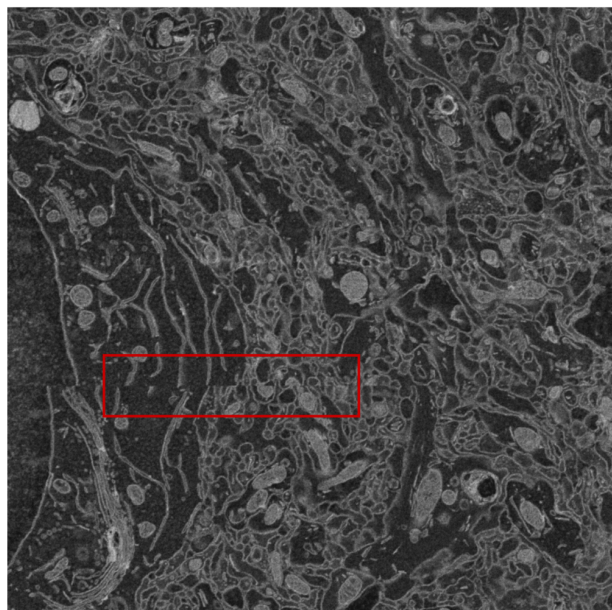


Obrázek 3: Princip navržené metody sešívání na vstupní mřížce o velikosti 3×3 snímků.

DEMIS



MIST



Obrázek 4: Porovnání výstupu mezi navrženým řešením DEMIS a konkurenční standardně užívanou metodou MIST na snímcích z TESCAN GROUP. Ve výstupech MIST jsou artefakty a duplicitní struktury, což je výrazně eliminováno v metodě DEMIS.

Nehmotné výstupy

- Pomocné skripty (software) pre automatickú segmentáciu zubov v 3D skenoch čelustí pomocou neuronových sietí.
- Pomocné skripty (software) pre experimenty s neural distance field 3D reprezentáciou pre obecné predtrénovacie techniky a pre dotrénovanie na generovanie chýbajúcich koruniek na základe anatomického kontextu.
- Model pre segmentovanie zubov v 3D povrchových skenoch čelustí.
- Syntetická datová sada snímok z elektronové mikroskopie navrhovaná pro sešívání.
- Pomocné skripty (software) pro sešívání snímků z elektronové mikroskopie pomocí neuronových sítí.
- Model pro sešívání snímků z elektronové mikroskopie natrénovaný na vytvořené syntetické datové sadě.
- Prezentace výsledků navržených metod Partnerovi.

- Diskuze výsledků navržených řešení z hlediska jejich praktické implementace s Partnerem.
- Publikace dílčích výstupů související s tématem smluvního výzkumu:
 - KUBÍK Tibor and ŠPANĚL Michal. *LMVSegRNN and Poseidon3D: Addressing Challenging Teeth Segmentation Cases in 3D Dental Surface Orthodontic Scans*. *Bioengineering*, vol. 11, no. 10, 2024, pp. 1-18. ISSN 2306-5354.
 - ŠILLING Petr and ŠPANĚL Michal. *DEMIS: Electron Microscopy Image Stitching using Deep Learning Features and Global Optimisation*, accepted to: 12th International Conference on Bioimaging, BIOIMAGING 2025 - Part of 18th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies, BIOIMAGING 2025.

V Brně dne 31. 12. 2024

Tibor Kubík (FIT VUT v Brně):

Petr Šilling (FIT VUT v Brně):