

Nové trendy v analýze obrazových a 3D dat

Souhrnná zpráva o řešení projektu smluvního výzkumu v roce 2025

Číslo smlouvy: 001774/2025/00

Období řešení: 1. 2. 2025 - 30. 6. 2025

Předmět smluvního výzkumu

Předmětem spolupráce je analýza nových trendů v hlubokém učení pro rozpoznávání a automatizovanou analýzu 3D geometrických dat se zaměřením na různé typy reprezentací 3D tvaru a provedení experimentů pro ověření jejich vhodnosti pro specifické typy úloh jako je tvarování detailů 3D povrchu či generování syntetických tvarů pro augmentaci trénovacích sad. Předpokládáme také pokračování spolupráce na experimentech s metodami hlubokého učení pro automatizaci zpracování obrazových dat pořízených elektronovou mikroskopií na úlohách jako sešívání obrazů, segmentace obrazu či detekce objektů.

Spolupráce spočívá zejména ve:

- Vypracování rešerší nových trendů v oblasti rozpoznávání 3D geometrických dat pro modelování a rozpoznávání 3D tvaru.
- Návrhu experimentů pro analýzy vhodnosti různých reprezentací 3D dat (mračna bodů, polygonální modely, spektrální reprezentace) a architektur konvolučních a grafových neuronových sítí pro potřeby a úlohy definované Objednatelem.
- Pokračování experimentů s metodami pro robustní sešívání 2D obrazů ("dlaždic") vhodných pro obrazy s vysokým rozlišením.
- Přípravě datových sad dodaných Objednatelem, nebo veřejně dostupných datových sad, pro provedení experimentů s vybranými metodami. Předzpracování dat pro trénování modelů, ruční anotace trénovací datové sady, atd.
- Experimentální implementace a ověření vlastností vybraných architektur sítí.
- Vyhodnocení výsledků a jejich prezentace Objednateli.

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 období 2. - 6. 2025

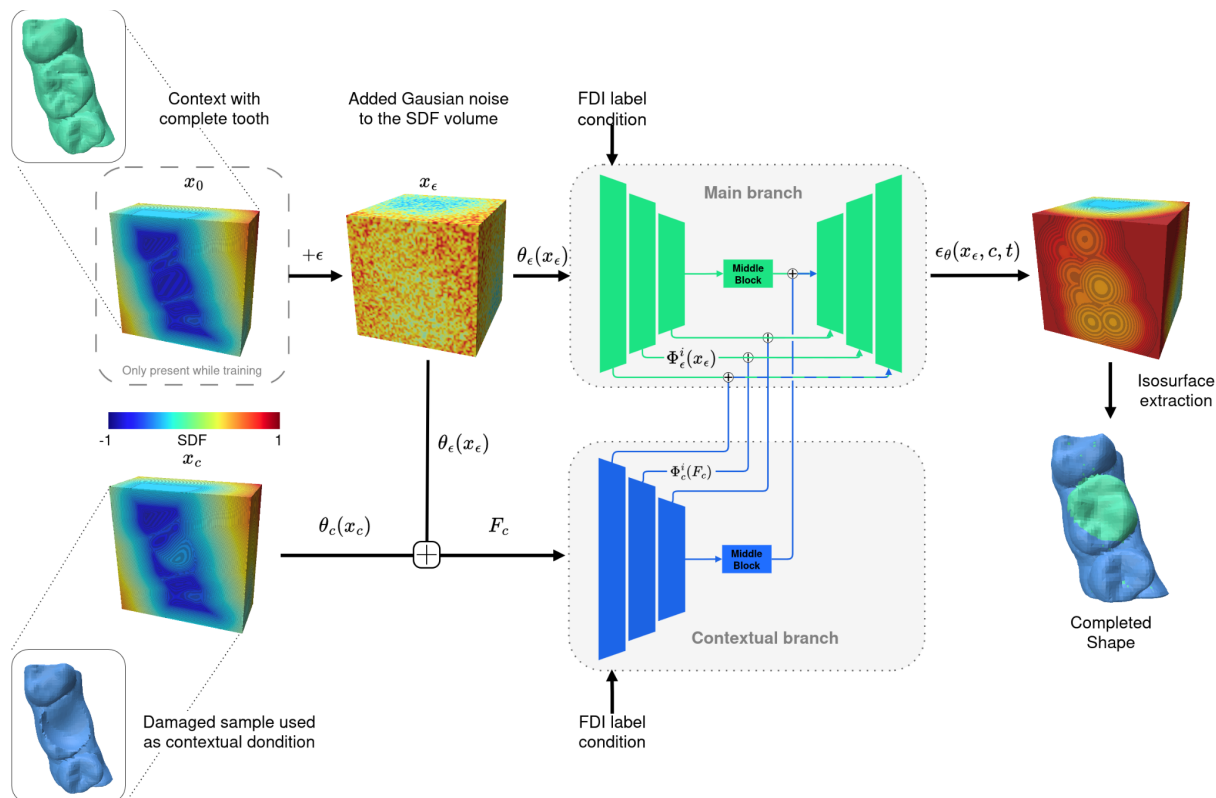
Realizace projektu se v roce 2025 zaměřila na dvě klíčové oblasti:

- I. Strojové učení pro doplnění 3D tvarů v digitálním zubním lékařství, kde konkrétní úlohou byly metody pro návrh tvaru zubních korunek s využitím difúzních modelů SDF (Signed Distance Field reprezentace).
- II. Zpřesnění sešívání 2D obrázků z elektronové mikroskopie - vylepšení globální optimalizace vzájemné pozice obrázků po hrubém sešití pomocí neuronových sítí pro detekci významných bodů.

I. Strojové učení pro doplnění 3D tvarů v digitálním zubním lékařství

(Dávid Pukanec, Tibor Kubík)

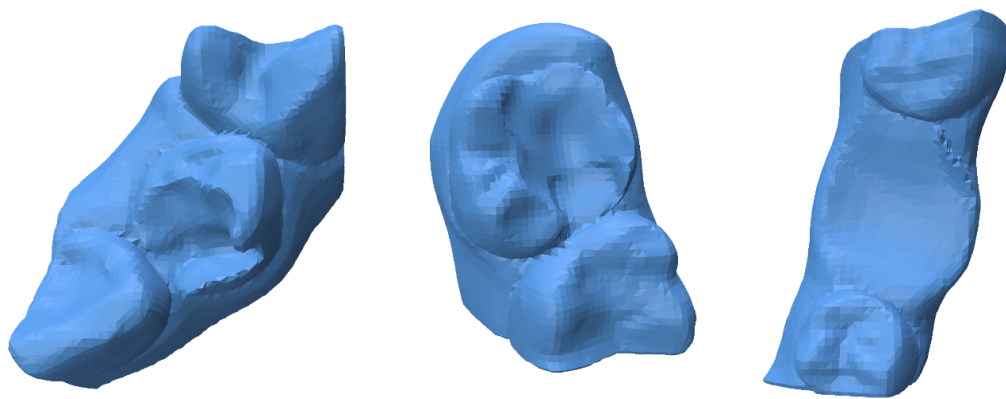
Výskum spočíva v aplikácii difúzných neurónových sietí na doplnenie koruniek zubov, ktoré sú reprezentované ako Signed Distance Field (SDF). Pre túto úlohu sme navrhli nasledujúcu architektúru:



Obrázok 1: Architektúra difúzne neurónovej siete. Ide o U-Net architektúru, ktorá počas tréningu dostáva na vstup kompletný zub s okolitým kontextom, ako aj nekompletný kontext, podľa ktorého sa učí odšumiť Gaussovský šum na doplnený zub. Pri inferencii už stačí zadať iba nekompletný kontext.

Príprava dát

Pracujeme s dvoma voľne dostupnými datasetmi — **Teeth3DS**¹ (1800 zubných oblúkov) a **Orthodontic Dental Dataset**² (1180 zubných oblúkov), ktoré sú reprezentované ako 3D mesh. Nad týmito datasetmi sme vytvorili augmentačnú pipeline na generovanie trénovacej dátovej sady nekompletných zubov. Zuby najskôr poškodzujeme pomocou boolovských operácií s jednoduchými tvarmi a pridaním simplexového šumu. Boolovské operácie realizujeme v SDF reprezentácii, v ktorej sú reprezentované aj vstupné dáta.



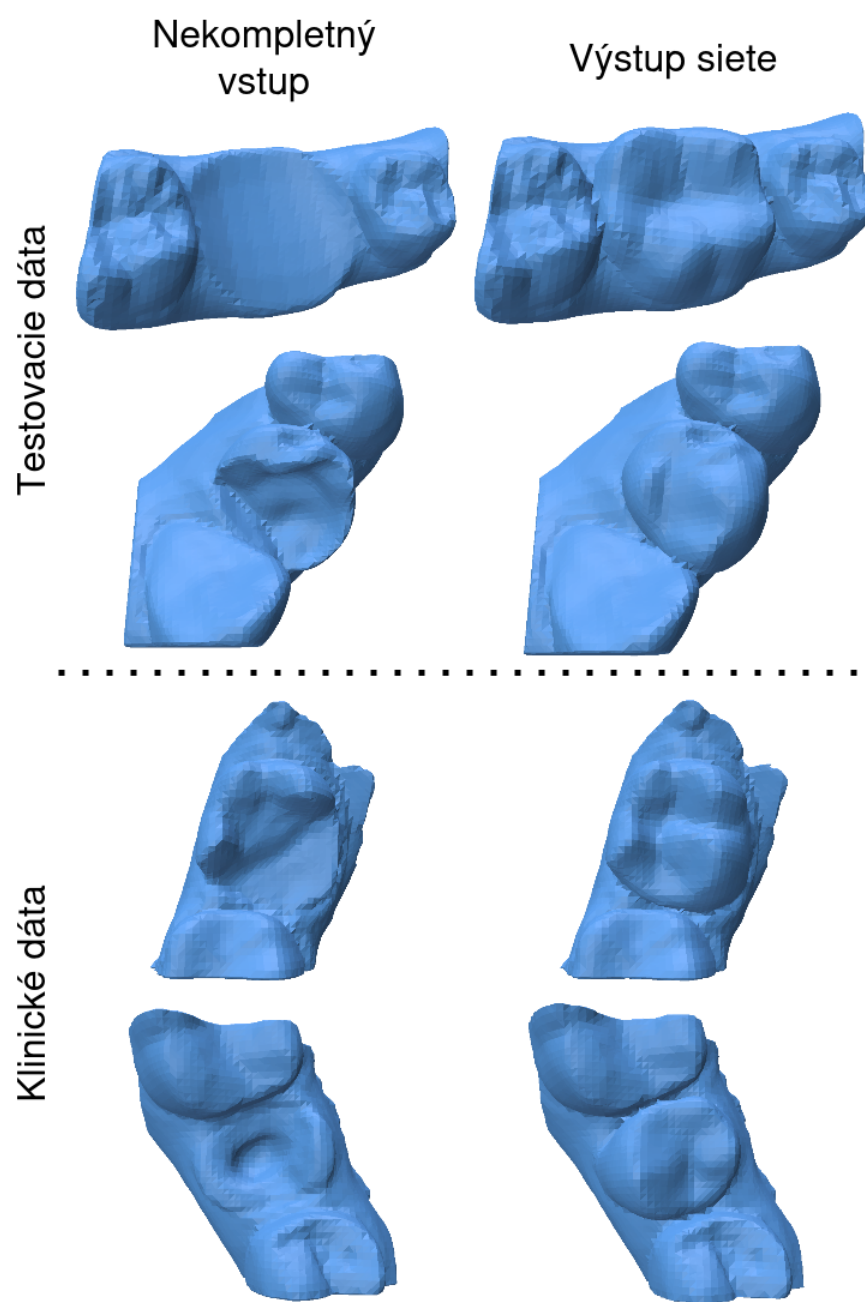
Obrázok 2: Príklad vstupných dát. Na účely vizualizácie boli z SDF reprezentácie vyextrahované povrchy.

Výsledky

Detailní vyhodnocení výsledků aktuálně probíhá a je plánována jejich publikace v konferenčním článku. Vizualní ukázka současných výstupů je na obrázku 3.

¹ <https://crns-smartvision.github.io/teeth3ds/>

² <https://zenodo.org/records/11392406>



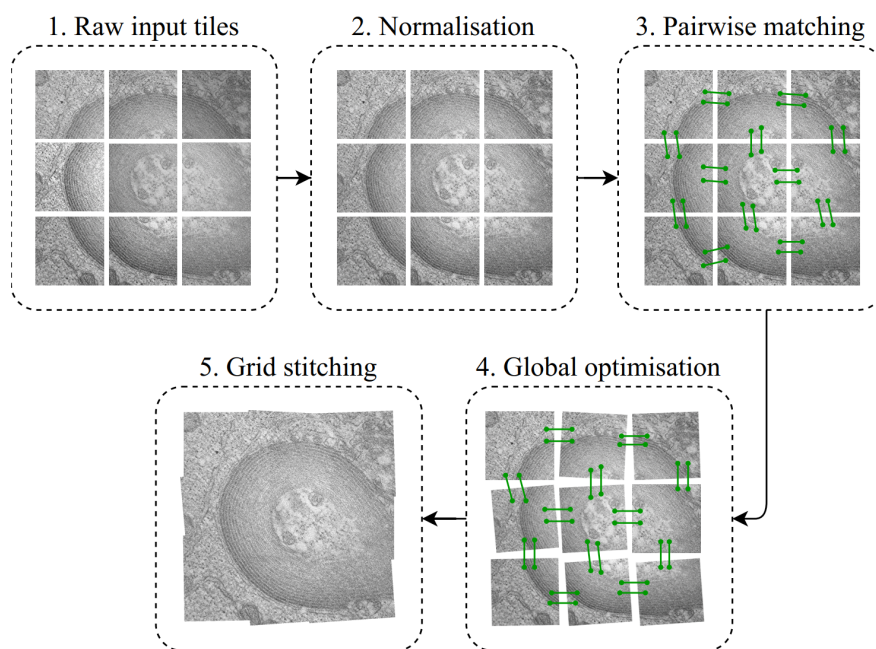
Obrázok 3: Príklad výstupov doplnených zubov.

II. Sešívání obrázků z elektronové mikroskopie pomocí neuronových sítí

(Petr Šilling)

Výzkum přímo navazoval na předchozí spolupráci při vývoji metody a open source balíčku DEMIS pro sešívání silně deformovaných dlaždic v 2D elektronové mikroskopii. Základ architektury, která je vyobrazena na obrázku 3, zůstává stejný.

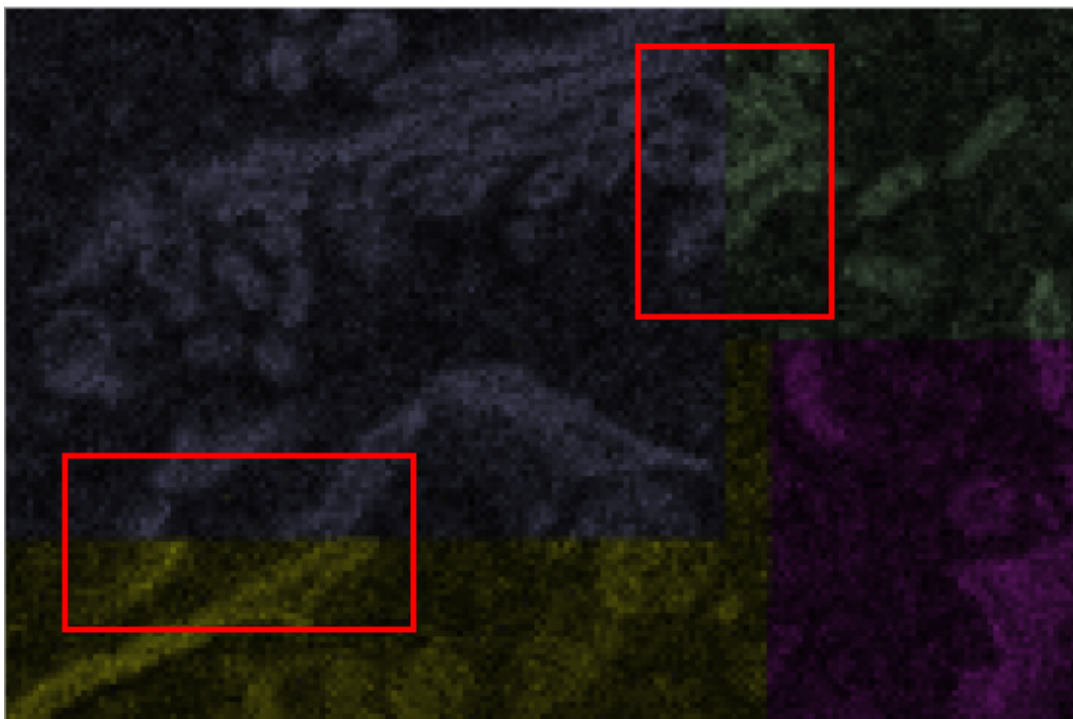
Nová verze metody ovšem umožňuje vyobrazený postup opakovat dvakrát, poprvé v méně přesném “coarse” režimu (beze změny oproti původní verzi), podruhé pak ve zpřesňujícím “fine” režimu. Základem zpřesnění je využití optického toku v překrývajících se regionech. Na jeho základě jsou poté ustaveny nové shody klíčových bodů mezi dílčími dlaždicemi, které vedou při opakovaném spuštění optimalizace na zmenšení průměrné chyby sešití. Pozn.: dvě fáze sešívání jsou v nové verzi potřeba, neboť optický tok nelze úspěšně spočítat bez předchozího hrubého sešití dlaždic. Optický tok je odhadován pomocí předtrénované sítě RAFT.



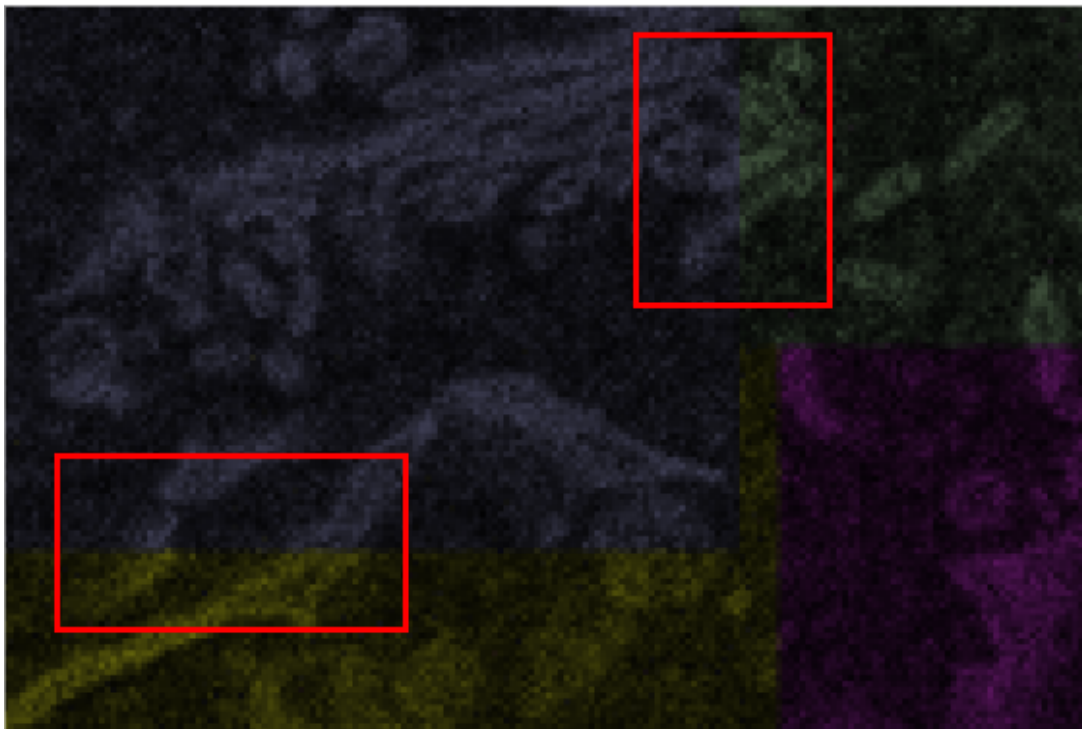
Obrázek 3: Princip navržené metody sešívání na vstupní mřížce o velikosti 3×3 snímků.

Při porovnání předchozí a nové verze na dříve navržené metrice EMSIQA dosahuje předchozí verze hodnoty 2,43 a nová hodnoty 1,23. Jedná se tedy o zmenšení průměrné chyby sešití o více než jeden pixel, tedy oproti předchozí verzi přibližně na polovinu (50,6% zlepšení). Vizuální porovnání je na obrázku 4.

Původní verze



Nová verze



Obrázek 4: Vizuální porovnání výsledků sešívání před a po zpřesnění pomocí optického toku (detail na prostor s překryvem čtyř pro vizualizaci obarvených dlaždic).

- Výsledky aktualizované metody je v plánu publikovat formou vědeckého článku a v nové verzi open source balíčku DEMIS.
- Případná navazující práce by se mohla zaměřit na odhady parametrů složitějších (např. radiálních) deformací dílčích dlaždic, neboť aktuální výsledky naznačují, že dalšího zlepšení by při současném odhadování pouze translace a rotace dlaždic bylo obtížné.

Nehmotné výstupy

- Architektúra neurónovej siete na kompletizáciu zubov. Natrénované modely, ktoré dokážu spracovať vstupy z reálneho prostredia. Skript na vytváranie a augmentáciu dát z verejne dostupných datasetov pre natrénovanie metódy dopĺňania chýbajúcich častí zubov.
- V prípravě je nová verze open source software DEMIS³ pro sešívání snímků z elektronové mikroskopie pomocí neuronových sítí, která při jemnější optimalizaci přímo využívá optický tok.
- Presentace výsledků navržených metod Partnerovi. Diskuze výsledků navržených řešení z hlediska jejich praktické implementace s Partnerem.
- Publikace dílčích výstupů související s tématem smluvního výzkumu:
 - ŠILLING Petr a ŠPANĚL Michal. DEMIS: Electron Microscopy Image Stitching using Deep Learning Features and Global Optimisation. In: Proceedings of the 18th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies - BIOIMAGING. Porto: Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication, 2025, s. 255-256. ISBN 978-989-758-731-3.

V Brně dne 18. 7. 2025

Tibor Kubík (FIT VUT v Brně):

Petr Šilling (FIT VUT v Brně):

Dávid Pukanec (FIT VUT v Brně):

³ <https://github.com/PSilling/demis>