

Projekt VaV MK ČR DG18P02OVV069

Bezpečné snímání historických objektů bezpilotními helikoptéry
– asistivní technologie, metodika a využití v památkové praxi

Certifikovaná metodika – Nmet

Metodika užití technologie bezpilotních helikoptér pro dokumentaci interiérů a exteriérů historických objektů

Předkladatel výsledku:

Národní památkový ústav, Valdštejnské náměstí 162/3, 118 01 Praha 1

České vysoké učení technické v Praze, Jugoslávských partyzánů 1580/3, 160 00 Praha 6 – Dejvice

Řešitelé:

Mgr. Milan Škobrtal (NPÚ), Ing. Vít Krátký (ČVUT), Ing. Tomáš Meiser (ČVUT), Mgr. Aneta Škobrtal
Zlámalová (NPÚ), Ing. Pavel Petráček (ČVUT), Ing. Dalibor Buršík (NPÚ), Mgr. Michaela Čadilová (NPÚ)



Sál předků, státní zámek Vranov nad Dyjí.

Tento výzkumný projekt *Bezpečné snímání historických objektů bezpilotními helikoptéry – asistivní technologie, metodika a využití v památkové praxi* je realizován v rámci Programu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI II) Ministerstva kultury České republiky. Splňuje požadavky specifických cílů programu – č. 2.1 Výzkum a jeho uplatnění – kulturní dědictví a území s historickými hodnotami, č. 2.2 Technologie a postupy pro ochranu kulturního dědictví.

Předkládaný výstup, certifikovaná metodika (Nmet), byl zpracován v rámci řešení II. etapy projektu, jejímž cílem je dokumentace pro archivní účely, pro účely přípravných prací památkových obnov, pro přípravu audiovizuálních výstupů, 3D modelů a map s odborným obsahem; dále pak trvalé uložení a archivace informací a vizuálních dat do IISPP a na sdílené webové stránky.

6	I. Úvodní slovo o projektu
7	II. Uživatelé metodiky
7	III. Základní informace o metodice
7	III. 1. Cíle metodiky
7	III. 2. Možnosti uplatnění metodiky
8	IV. Základní pojmy
8	IV. 1. Definice dronu
8	IV. 1. 1. Dělení dronů
8	IV. 1. 2. Řízení dronů
10	IV. 2. Slovník vybraných pojmů a zkratk
11	V. Legislativní požadavky pro snímání vnějších plášťů objektů bezpilotními prostředky
16	VI. Potřeba dokumentace a digitalizace historických památek – využití dronů při této činnosti
19	VI. 1. Svět
24	VI. 2. Česká republika
26	VII. Metodika snímání vnějších plášťů budov
26	VII. 1. Postup práce
26	VII. 1. 1. Pořízení vstupních fotografických snímků
29	VII. 1. 2. Plánování letu pro snímání vstupních fotografií
33	VII. 1. 3. Realizace letu
35	VII. 1. 4. Zpracování vstupních fotografických snímků
36	VII. 1. 5. Uložení a prezentace zpracovaných dat ze vstupních snímků
38	VII. 1. 6. Shrnutí
40	VII. 2. Případové studie
41	VII. 2. 1. Kostel sv. Mořice v Olomouci
44	VII. 2. 2. Zámek Plumlov
46	VII. 2. 3. Mauzoleum rodu Kleinů v Sobotíně
48	VIII. Metodika snímání interiéru
48	VIII. 1. Postup práce
48	VIII. 1. 1. Skenování interiéru
50	VIII. 1. 2. Sestavení 3D modelu
51	VIII. 1. 3. Naplánování autonomní mise
53	VIII. 1. 4. Dokumentování vybraných prvků za pomoci autonomního letu bezpilotní helikoptéry
61	VIII. 1. 5. Výstupy
62	VIII. 2. Případové studie
63	VIII. 2. 1. Kostel sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě u Města Libavá
66	VIII. 2. 2. Kostel sv. Mořice v Olomouci
69	VIII. 2. 3. Mauzoleum rodu Kleinů v Sobotíně
70	VIII. 2. 4. Sál předků na hradu a zámku Vranov nad Dyjí
72	VIII. 2. 5. Sněmovní sál Arcibiskupského zámku v Kroměříži
74	IX. Přínos projektu – autonomní létání a dokumentace v interiérech historických objektů
76	X. Seznam zdrojů a literatury
76	X. 1. Internetové zdroje
79	X. 2. Prameny
79	X. 3. Literatura



Detail vitraje Nalezení těla sv. Jana Napomuckého, kostel sv. Mořice
v Olomouci, snímek z projektové oktokopty.

I. Úvodní slovo o projektu

Výzkumný projekt NAKI II *Bezpečné snímání historických objektů bezpilotními helikoptéry – asistivní technologie, metodika a využití v památkové praxi* vznikl zejména z potřeby usnadnit restaurátorům a pracovníkům památkové péče přístup k těžce dosažitelným partiím interiérů kulturních statků.

Primárním záměrem bylo vytvořit spolehlivou technologii a pracovní postup, které by nahradily finančně, časově i bezpečnostně náročné budování pomocných konstrukcí (lešení) a použití techniky (vysokozdvížné plošiny) při dokumentaci v rozměrných prostorách, jako jsou chrámové lodi a zámecké sály.

Kupříkladu na stěnách pod klenbou se často nacházejí hodnotné prvky malířské a štukové výzdoby, jež není možné z běžně přístupných úrovní dokumentovat bez nežádoucího zkreslení, díky němuž se ztrácí mnoho informací o jejich technickém stavu. Z tohoto důvodu vzniká potřeba přiblížit se k těmto prvkům kvůli přesnějšímu zjištění míry jejich dochování, ať už se jedná o běžnou kontrolu, nebo o restaurátorský průzkum před odborným zásahem, kdy se pozornost věnuje i nastínění chemicko-technologického složení díla či umělecké a řemeslné technice autora.

Výsledky projektu jsou společným dílem konsorciálního týmu složeného z odborníků ze skupiny Multi-robot Systems Group, FEL ČVUT a z Národního památkového ústavu, ú. o. p. v Olomouci.

II. Uživatelé metodiky

Metodika je určena orgánům státní památkové péče, restaurátorům, vlastníkům nemovitých kulturních památek, Ministerstvu kultury ČR, správcům historických objektů a kastelánům, dále vysokým školám uměnovědného i technického zaměření zabývajícím se ochranou kulturního dědictví a odborné veřejnosti.

III. Základní informace o metodice

III. 1. Cíle metodiky

Cílem předmětné certifikované metodiky je především popsat specifické postupy pro získání co nej kvalitnějších poznatků při užití technologie bezpilotních helikoptér pro dokumentaci interiérů i exteriérů historických objektů v památkové praxi. Tyto postupy doplňují případové studie, které shrnují práci konsorciálního týmu na vybraných objektech historické a kulturní hodnoty.

III. 2. Možnosti uplatnění metodiky

Tuto certifikovanou metodiku lze využít při dokumentaci kulturních památek i dalších hodnotných objektů rozličného charakteru. Týká se problematiky využití bezpilotních helikoptér při snímání exteriérů a zejména interiérů historických objektů a jejich vybraných prvků v těžce dostupných partiích.

IV. Základní pojmy

IV. 1. Definice dronu

Pojem dron představuje vžitě označení pro termín **bezpilotní letadlo** či přesněji **dálkově ovládaný letecký systém**.

Původně slangový výraz, převzatý z anglického výrazu drone, se vžil natolik, že jej dnes už můžeme považovat za jedno z oficiálních pojmenování těchto robotických vzdušných jednotek. V odborné literatuře se můžeme často potkat s dalšími termíny vyjadřujícími totéž – nejčastěji **UAV** (Unmanned Aerial Vehicle), pak **MAV** (Micro Aerial Vehicle), **RPAS** (Remotely Piloted Aircraft System), **UAS** (Unmanned Aerial System). Poslední dva jmenované termíny v sobě zahrnují vedle vlastních leteckých strojů i ovládací jednotku umístěnou nejčastěji na zemi. Osoba, která ze země dron ovládá, se nazývá operátor nebo též pilot.

IV. 1. 1. Dělení dronů

Drony je možné dělit do různých kategorií podle konstrukce, váhy, účelu využití, způsobu ovládání aj. S ohledem na zaměření metodiky jsme vybrali pouze některé z nich.

Podle konstrukce můžeme bezpilotní letadla v zásadě rozdělit na **letouny** (s křídly) a **helikoptéry** (s vrtulemi). Výhodou letounů je, že díky vztlaku, které křídlo vytváří, mohou vydržet na jedno nabití ve vzduchu i několik hodin a zvládnou tak obletět velký kus prostoru. Jejich nevýhodou je obtížná manévrovatelnost. Ta je naopak obrovskou výhodou helikoptér, u nichž však výkon vrtulí (minimálně tři, častěji však 4 a více) zvyšuje nárok na pohonnou jednotku a výrazně tak snižuje délku letu, která se zpravidla pohybuje od 8 do 25 minut.

IV. 1. 2. Řízení dronů

Oba modely využívají pro svou navigaci a řízení dronu technologie **GNSS** (Global Navigation Satellite System), jako je například americký systém **GPS** (Global Positioning System). Tento způsob řízení a navigace však funguje spolehlivě pouze u létání v exteriéru staveb.

Pro další kapitoly této metodiky je důležité zmínit, že drony můžeme dělit na autonomní a manuálně dálkově ovládané. Všechny drony dostupné na komerčním trhu jsou prozatím manuálně dálkově ovládané s různými stupni **automatizace** některých úkonů. Při **plném manuálním** ovládání letadla je veškerá kontrola letu na pilotovi. V dalších stupních automatizace je dron schopen řídit svůj vzlet a přistání, udržovat výšku, rychlost či pozici, nebo pomáhat pilotovi s navigací. Ve stupni **podmíněné automatizace** je dron schopný letět sám podle naprogramované trasy za předpokladu určitých podmínek.¹

¹ <http://droneweb.cz/co-je-dron>, vyhledáno 21. 4. 2021. – Jakub Karas, *Drony. Sbírka nejužitečnějších postupů a řešení*, Brno 2017, s. 13-44.



3D model objektu kostela sv. Jakuba Většího a sv. Anny ve Staré Vodě.

IV. 2. Slovník vybraných pojmů a zkratek

Fotogrammetrie – je měřická metoda, která se zabývá rekonstrukcí tvaru, velikosti a polohy předmětů z jejich fotografických snímků. Zabývá se měřickými vlastnostmi snímků s cílem přesných měření polohy bodů a získáváním map nebo digitálních modelů terénu z těchto snímků. Umožňuje modelování v 3D prostoru s využitím 2D snímků

FoV – Field of View – záběr fotoaparátu či kamery

FPV – first-person view – “pohled z první osoby” – termín označující obraz přenášený z palubní kamery umístěné na dronu, který je často využíván piloty k řízení dronu

Georeferencování – proces určení vztahu mezi polohou dat v přístrojovém souřadnicovém systému a geografickou, resp. mapovou polohou²

Georeferencování rastrových dat – zasazení obrazových (i vektorových) dat do mapových souřadnic

MTOM – maximum take off mass – maximální vzletová hmotnost

Oktokoptéra – vícerotorová helikoptéra s osmi rotory

RAW – formát fotografií “raw” – z anglického raw, což je surový, nezpracovaný – soubor obsahující data přímo ze snímače digitálního fotoaparátu, bez dalších úprav. Nejčastější formáty “raw” jsou soubory “.nef”, “.crw”, “.cr2”, “.mr2”, “.raw”. Takové soubory je zpravidla nutné pro další použití ještě dále zpracovávat

Stereometrie – prostorová geometrie

UAV – Unmanned Aerial Vehicle – nejčastěji používané odborné označení pro bezpilotní letadlo či helikoptéru, ekvivalent zobecněného pojmu dron

UAVA³ – Aliance pro bezpilotní letecký průmysl – sdružuje subjekty zabývající se bezpilotními prostředky, technologiemi a legislativou v rámci celé České republiky

ÚCL – Úřad pro civilní letectví – český státní úřad dohlížející mmj. na provoz dronů a na legislativu s tím spojenou

Vlícovací body – body sloužící pro geometrickou transformaci nejčastěji obrazových dat do jiného (např. referenčního) souřadnicového systému

VLOS – visual line of sight – létání za přímého dohledu pilota dronu, což je podmínkou jeho provozu v ČR a ve většině zemí světa. Tak jako jsou bezpilotní prostředky a jejich provoz stále poměrně novým aspektem naší doby, tak i legislativa v tomto odvětví se poměrně živelně vyvíjí. Z tohoto důvodu jsou v této kapitole uvedeny pouze některé základní aspekty legálního provozu bezpilotních prostředků s ohledem na specifika pro snímání vnějších částí objektů zájmu. Kromě těchto hrubých zásad poskytneme v rámci metodiky především odkazy na relevantní zdroje, které, jak doufáme, budou na stejném místě vždy reflektovat aktuální legislativní rámec provozu bezpilotních prostředků.

² Jiří Šíma, *Terminologický výkladový slovník pro potřeby realizace Akčního plánu Strategie rozvoje infrastruktury pro prostorové informace v České republice do roku 2020 verze 4 (01. 12. 2016)*, elektronicky: <https://adoc.pub/verze-4-.html>, vyhledáno 23. 10. 2021.

³ Webové stránky: <https://uavalliance.cz/>, vyhledáno 4. 8. 2021.

V. Legislativní požadavky pro snímání vnějších plášťů objektů bezpilotními prostředky

Složkou státní správy, která je obecně za letecký provoz v rámci vzdušného prostoru ČR zodpovědná je *Úřad pro civilní letectví*.⁴ V rámci aktuální legislativy je pro regulaci provozu bezpilotních prostředků využíván rámec *Leteckého zákona*,⁵ v jehož mantinelech vydává úřad vyhlášky regulující provoz bezpilotních prostředků. Od počátku roku 2021 je aplikováno také evropské právo, které je těmito vyhláškami implementováno. Evropské právní normy pro provoz bezpilotních prostředků pak cílí především na harmonizaci zásad bezpečného létání napříč EU a v budoucnu tak umožní provozovatelům a pilotům bezpilotních prostředků využívat jednoho panevropského osvědčení ke stejnému typu provozu kdekoli na území unie. Zde je třeba podotknout, že konvergence národních legislativních omezení v každé zemi EU je v současnosti na různé úrovni, a proto je stále nutné bedlivě studovat a posuzovat aplikovatelnost, respektive rozdílnost místních norem jednotlivých států Evropské unie.⁶

Základním rozcestníkem pro získání relevantních informací je specializovaná webová stránka *Úřadu pro civilní letectví*,⁷ potažmo registrační systém tzv. *Miniweb*.⁸ Zde se uživatel, tedy pilot nebo provozovatel, dozví veškerá základní omezení provozu bezpilotních prostředků a případně získá odkazy dále na specifické vyhlášky nebo podrobné specifikace.

Než se dostaneme ke konkrétnímu případu, na kterém vysvětlíme postup pro legální snímání pláště budovy bezpilotním prostředkem, uvedeme si některé termíny a základní zásady, které zřejmě zůstanou po delší dobu neměnné a vycházejí z aktuálního nastavení směru unijního práva.

Pro provoz bezpilotního prostředku zákon rozeznává dva subjekty, provozovatele a pilota bezpilotního prostředku. Provozovatelem je typicky majitel, tedy pokud takový bezpilotní prostředek nakoupí a do svého majetku zařadí organizace jako je například NPÚ, stává se automaticky provozovatelem. U organizace takové velikosti je pak vhodné doporučit úpravu vnitřního členění odpovědnosti a vyčlenit konkrétního pracovníka, který je zodpovědný za správu všech legislativních náležitostí pro provoz bezpilotních prostředků tak, aby se každý úkon nemusel směřovat na ředitele, nebo jiného statutárního zástupce. Takovému pracovníkovi řekněme například koordinátor provozu bezpilotních prostředků. Zodpovědností tohoto pracovníka je pak především udržování všech legislativně závazných

4 Web Úřadu pro civilní letectví: www.caa.cz.

5 Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví: [https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Letecka-doprava/Pravni-predpisy/Konsolidovane-zneni-zakona-c-49-1997-Sb.](https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Letecka-doprava/Pravni-predpisy/Konsolidovane-zneni-zakona-c-49-1997-Sb.-Přehled-právních-předpisů) – Přehled právních předpisů: <https://www.caa.cz/dokumenty/predpisy/prehled-pravnich-predpisu/>.

6 Např. zde: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/drones-information-notice>, vyhledáno 23. 11. 2021.

7 Rozcestník ÚCL: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/>.

8 Miniweb: <https://dron.caa.cz/>.

aspektů. Pilotem bezpilotního prostředku (jakkoliv to zní kontradikčně) je osoba zodpovědná za provádění letu a dodržení bezpečnosti. Pilot je podle typu provozu podroben minimálně online školení a testu, případně pak také praktické zkoušky pilotních dovedností, která je nezbytnou podmínkou pro více rizikový provoz. Zodpovědností pilota s ohledem na bezpečnost provozu je pak především nedopustit let, který by jakkoliv ohrožoval zdraví lidí a újmu na majetku v případě dysfunkce nebo přímo havárie bezpilotního prostředku. Ať už koordinátor provozu nařídí libovolný let, je pilot vždy ten, kdo musí odmítnout jeho realizaci, pokud má sebemenší pochybnosti o jeho bezpečném provedení. Bezpečnost je vždy na prvním místě.

Po pořízení prvního bezpilotního prostředku organizací je vždy nutné provést registraci provozovatele⁹ a pojištění takového stroje. Pojištění není v zásadě nikdy ochranou samotného bezpilotního prostředku, ale jakýmsi povinným ručením, tedy pojištěním škod způsobeným provozem bezpilotního prostředku. Registrace je nutná pouze pro nového provozovatele. Při rozšíření letky bezpilotních prostředků o další stroj je pak pouze potřeba označit tento stroj identifikačním číslem provozovatele, potažmo majitele. V případě, že je provozovatelem organizace, je na místě vypracovat také tzv. provozní příručku, která jasně specifikuje bezpečné použití bezpilotního prostředku pro pilota, který tento prostředek využívá v rámci pracovního poměru. Jedná se ve své podstatě o dokument z kategorie BOZP, který chrání provozovatele od zodpovědnosti za nesprávné použití pracovní pomůcky. Je to asi stejné jako u jakéhokoliv stroje provozovaného zaměstnancem v pracovní době v rámci jeho pracovních povinností.

Pilot, pověřený prováděním letů bezpilotního prostředku, se musí registrovat ve stejném systému jako provozovatel a následně absolvovat online kurz teorie a legislativního rámce provozu bezpilotních prostředků. Tento test má za úkol prověřit pouze teoretické povědomí o legislativních omezeních kladených na provádění letů bezpilotního prostředku. Veškeré učební zdroje jsou dostupné online¹⁰ a vřele doporučujeme projít si jejich znění velmi podrobně a zodpovědně, protože případné následky plynoucí z jejich porušení jdou vždy na vrub pilota. Pilot je poslední instance, která je zodpovědná za každý let, který provádí, a nijak se nemůže vymanit ze zodpovědnosti za škody na majetku a zdraví, přestože byl například pověřen daným letem zástupcem provozovatele, svého nadřízeného a podobně. Pilot má vždy možnost odmítnout provedení letu, pokud má pochybnosti o splnění všech zákonných a bezpečnostních aspektů.

V dnešním legislativním rámci se provoz bezpilotních prostředků dělí do tří základních kategorií, z nichž pouze dvě jsou dosažitelné (kategorie CERTIFIED není dosažitelná, protože na trhu zatím nejsou pro civilní použití dostupné bezpilotní prostředky, které by tuto kategorii splňovaly), tedy OPEN a SPECIFIC. Přičemž kategorie OPEN vždy kombinuje vlastnosti bezpilotního prostředku a místa použití pro stanovení omezení a kategorie SPECIFIC je pak použití

9 Zde: <https://dron.caa.cz/>.

10 Zde: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/online-skoleni-a-informace-k-vyuziti/>.

daného bezpilotního prostředku na daném místě omezená na základě specifického povolení od Úřadu pro civilní letectví na základě žádosti provozovatele.

Ze zkušeností z reálného provozu je možné vyvodit, že pro efektivní skenování plášťů budov (za efektivní zde označujeme takové skenování, pro něž byl použit kvalitní snímací senzor na úrovni profesionálního fotoaparátu) je teoreticky aplikovatelná pouze podkategorie A3, kde je možné provozovat bezpilotní prostředky těžší než 2 kg (resp. 4kg s výrobcem specifikovanou třídou letadla C2, které ovšem aktuálně na trhu nejsou), a to mimo obydlené oblasti (tedy v minimální vzdálenosti 150 m od obytných, obchodních, průmyslových nebo rekreačních oblastí a s předpokladem, že v dosahu bezpilotního letadla, s nímž se létá v průběhu úkolu, nebudou ohroženy žádné osoby nezapojené do provozu). Takovýto provoz pro účely vnějšího snímání objektů je možné předpokládat pouze u solitérních památek, které nejsou součástí urbanistického celku. Příkladem budiž *Mauzoleum rodu Kleinů*¹¹ v Sobotíně na Šumpersku.

Podkategorii A1 a A2 kategorie OPEN zde nerozvádíme do detailů z jednoduchého důvodu. Tyto provozy kladou požadavek na maximální vzletovou hmotnost bezpilotního prostředku v zásadě na 2 kg, přičemž v těchto hmotnostních kategoriích není předpoklad existence bezpilotního prostředku s natolik kvalitním snímačem, aby byl relevantní pro seriózní provádění snímání památek, respektive aby získaná data byla vhodná pro další zpracování například metodami fotogrammetrie a tvorbu trojrozměrných modelů. Samozřejmě je možné, vzhledem k technickému vývoji, že takové bezpilotní prostředky na trh přijdou, ale pro účely této metodiky necháváme na laskavém čtenáři, aby si specifika použití takového bezpilotního prostředku ve výše zmíněných kategoriích nastudoval a aplikoval na základě uvedených zdrojů.

Pravděpodobně nejčastěji využívanou kategorií provozu pro snímání památek pak bude kategorie SPECIFIC.¹² Ta klade jisté základní požadavky, které jsou v zásadě splněny, pokud je provozovatel a pilot oprávněn pro kategorii OPEN. Nad rámec těchto požadavků je pak provozovatel povinen podat žádost o provedení konkrétního letu, konkrétním bezpilotním prostředkem, které nespádají do žádného rámce kategorie OPEN a doložit identifikaci rizik spojených s takovým provozem a jejich řešení (respektive maximální omezení možnosti, že dojde k ohrožení života, zdraví a majetku). Přestože se změnila formuláře a postup, je tato kategorie velice blízká dříve užívanému systému žádostí o povolení k letu nad rámec standardních udělených oprávnění k provozu bezpilotních prostředků (tzv. HOP).

Pro lepší názornost použijeme příklad, který dokumentuje provedení let bezpilotního prostředku v poměrně problematickém prostředí. Snímání jižní fasády *chrámu sv. Mořice v Olomouci*¹³ bylo prováděno právě na základě specifického povolení nad rámec standardních oprávnění k provozu. Takovou žádost je nutné doručit Úřadu pro civilní letectví s dostatečným časovým předstihem před

11 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/mauzoleum-rodiny-kleinu-535402>.

12 Kategorie SPECIFIC: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/specificka-kategorie-specific/>.

13 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/kostel-sv-morice-12628015>.

předpokládaným provedením samotného snímání. V rámci kategorie SPECIFIC má taková žádost již unifikovaný formulář, ale v zásadě obsahuje základní informace o tom, jaké manévry, jakým bezpilotním prostředkem a na jakém místě jsou plánovány. Autor takové žádosti pak provede analýzu rizika a navrhne opatření pro jejich minimalizaci. Úřad pro civilní letectví pak zváží především to, jestli byla identifikována všechna rizika a jestli jsou přijatá opatření dostatečná. Následně buďto vyzve žadatele k doplnění chybějících rizik a jejich řešení, nebo přímo vydá rozhodnutí o schválení provozu, přičemž v rámci takového rozhodnutí mohou být specifikována další omezení na provoz, které je provozovatel, potažmo pilot nucen dodržet.

Abychom se tedy skutečně dostali ke konkrétnímu případu, tak pro snímání chrámu sv. Mořice byla zvolena pouze jeho jižní fasáda, a to z jednoduchého důvodu. V rámci snímání ostatních stěn bylo identifikováno příliš mnoho rizik, která by bylo těžké, ne-li nemožné vyřešit. Při pohledu na mapu je zřejmé, že provoz tramvaje na severním okraji je v zásadě neprolomitelnou bariérou. Zastavit dodávky elektrické energie do trolejí a omezit tak provoz části městské dopravy včetně totálního záboru a zneprůchodnění rušné ulice 8. května je nepředstavitelné. Zde je jasně patrné, že provoz bezpilotního prostředku je v rámci běžně akceptovatelných omezení v rámci měst silně limitovaný.

Ani jižní fasáda chrámu sv. Mořice nebyla z pohledu legislativy jednoduchým úkolem. Vzhledem k tomu, že výška hlavní lodi tohoto chrámu je zhruba 23 m, bylo nutné, i v případě plánovaného provozu v režimu kolmých vzletů bez horizontální rychlosti bezpilotního prostředku, brát v potaz velikost tzv. dopadové zóny (tedy prostoru kam bezpilotní prostředek může při poruše dopadnout) podle pravidla 1:1 (tedy tak velká horizontální vzdálenost jaká je maximální dosažená výška bezpilotního prostředku) v zásadě celý prostor mezi chrámem a protilehlými budovami, včetně budov samotných. Navržená opatření v rámci žádosti o povolení k provedení letu byla vcelku jednoduchá. Zabránění přístupu osob a majetku do daného prostoru jeho zábořem a ohraničením. Využitím zúčastněných osob, jiných než operátor bezpilotního prostředku, k zamezení vstupu nezúčastněných osob po dobu provádění letu a získáním souhlasu od majitelů přilehlých nemovitostí se zapojením jejich staveb do provozu. Poslední jmenované opatření v podstatě implikuje to, že jsou majitelé budov v dopadové zóně seznámeni s riziky, která provoz bezpilotního prostředku přináší a jsou ochotni je strpět.

Samozřejmostí, která zde ani nebyla specificky probírána je fakt, že se pilot seznámí s omezeními vzdušného prostoru v místě provádění letů, ideálně na interaktivních mapách¹⁴ a bude respektovat omezení vyplývající z aktuální a budoucí předpovědi meteorologické situace.

Krátce ještě zmiňme, že provoz dronů v interiérech budov naopak neupravuje žádný právní rámec, nicméně je nutné dodržovat alespoň platná pravidla BOZP.

Na závěr této kapitoly je nutné říct, že informace zde obsažené nejsou ani zdaleka vyčerpávající a nejpodstatnějšími částmi jsou pak

14 Interaktivní mapy s omezením vzdušného prostoru: <https://dronview.rlp.cz/>.

odkazy na webové stránky regulátora, přičemž čtenář této metodiky je vybízen k jejich důkladnému prostudování a dodržování. Jak známe z jiných aspektů našich životů, legislativa nikdy nemůže být napřed a vždy bude jistým způsobem se zpožděním reflektovat až následky využití děr a skulinek. V případě použití bezpilotních prostředků je vždy základním rámcem zdravý rozum a důraz na bezpečnost. Jak věříme, všichni bychom si rádi do budoucna usnadnili nebo rozšířili naše možnosti s použitím bezpilotních prostředků, a proto by měl být primární zájem nás všech, abychom se chovali maximálně zodpovědně a bezpečně. S takovým předsevzetím prosím přistupujte ke všem svým letům.

VI. Potřeba dokumentace a digitalizace historických památek – využití dronů při této činnosti

Pohnutek vedoucích k dokumentaci a digitalizaci hmotných kulturních statků je přirozeně více. Kvalitní dokumentace každé kulturní památky je jedním z pilířů památkové péče, proto existuje potřeba zachycení jejich technického stavu, a to buď s dlouhodobou perspektivou, nebo kvůli vytvoření aktuálního podkladu pro plán památkové obnovy či restaurování – eventuelně za souběžného srovnání s původní autorskou či archivní dokumentací, návrhem, nebo s historickými snímky. Jak fotografie tak i digitální prostorová dokumentace poskytuje v případě snímání stavebních památek, jež jsou prioritní oblastí našeho výzkumu, informace o poškození povrchů omítek, štukové a malířské výzdoby, stejně jako o statických poruchách zdiva či degradaci kamene.¹⁵

Digitální prostorový sken vedle definice polohy snímaného objektu navíc přináší jeho přesné hmotové zaměření, čímž mimo jiné umožňuje precizně spočítat omítkové plochy určené k památkové obnově či restaurování.¹⁶ Tím se může úspěšně předejít problému vzniku víceprací, které příležitostně vyvstávají příčinou nedokonalého výpočtu předmětných ploch, například z důvodu jejich zakřivení. Digitální 3D sken však se svojí precizností poskytuje cennou dokumentaci památek i pro případy živelných katastrof či válečných konfliktů, kdy dochází k rozsáhlým škodám i fatálním ztrátám na kulturním a památkovém dědictví ve světě i v naší zemi.¹⁷

V rámci digitalizace a dokumentace se v oblasti architektury rapidně rozvíjejí možnosti využití bezpilotních leteckých prostředků (UAV), jejichž potenciál je vysoký a lze je aplikovat v různých přírodních podmínkách pro mapování či letecký monitoring. Jedním z nejčastějších výstupů jsou letecké fotografie a videa, které se mimo jiné používají pro zasazení architektonické studie do kontextu celkové zástavby, dále pak pro dokumentaci stavu budovy v určité časové periodě nebo zhodnocení aktuální situace plošných a liniových objektů. Nezanedbatelný je také letecký monitoring, kdy drony postupně nahrazují inspekce prováděné z letadel, helikoptér nebo horolezci, a kontrola výškových či územně rozsáhlých objektů se tedy stává mnohem jednodušší, rychlejší, efektivnější a bezpečnější. Jednou z významných výhod UAV je možnost jejich téměř okamžitého nasazení pro monitoring aktuálně vzniklé situace (havárie, přírodní události) a zmapování rozsahu škod ihned po jejich vzniku, což je v případě stavby lešení nemyslitelné. Drony lze využít k nízkonákladovému mapování areálů a vytvoření celkového geoinformačního systému, kdy vznikne souřadnicově umístěná ortofotomapa s detailními

¹⁵ Elektronicky zde: <https://www.npu.cz/publikace/metodika-digitalizace-3d-dokumentace-a-3d-vizualizace-jednotlivych-typu-pamatek.pdf>, s. 9. Vyhledáno 17. 5. 2021.

¹⁶ Idem. – Petr Gláser, *Stanovení ekonomické náročnosti restaurátorského zásahu*, 2016, elektronicky: <https://invenio.nusl.cz/record/261493/files/content.csg.pdf>, vyhledáno 23. 11. 2021.

¹⁷ <https://whc.unesco.org/en/158/>, vyhledáno 22. 7. 2021. – https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_destroyed_heritage, vyhledáno 22. 7. 2021.

fotografiemi a kupříkladu databázovými údaji o jednotlivých objektech v daném areálu (využití např. při pasportizaci hřbitovů či dokumentaci archeologických nálezů).¹⁸

V oblasti památkové péče může platforma UAV posloužit k dokumentaci staveb, včetně vytváření jejich 3D modelů. Průzkum pomocí dronů se, vedle snímání prostřednictvím pozemních skenerů, stává velmi podstatným nástrojem k poznání a získání základních informací o daném objektu pro následné restaurování, konzervování či památkovou rekonstrukci. S nástupem různých inovativních systémů zahrnujících UAV s digitálním fotoaparátem, terestrickým laserovým skenováním, totální stanicí a navigací GNSS je 3D rekonstrukce snazší než dřív, a tak se 3D modely dokumentující objekty kulturního dědictví stávají běžnou praxí. Díky UAV je možné historické památky změřit, provést analýzu jejich stavu, a to vše během kratšího času, novou perspektivou a za nižšího rizika finanční zátěže.

Používání UAV v případě exteriérů je již zcela běžné, naproti tomu nasazení dronů v interiérech historických objektů je zřídkavé a jedná se o náročný úkol kvůli absenci globálního navigačního satelitního systému (GNSS), nepříznivým světelným podmínkám a mnoha dalším překážkám, které se v těchto objektech nacházejí (pohyb UAV blízko zdí, sloupů, oltářů balkonů, svítidel a dalších konstrukcí).¹⁹

Vytváření 3D modelů historických objektů může mít vedle samotné dokumentační hodnoty i popularizační funkci. Umožňují se tak virtuální prohlídky zájemcům z řad handicapovaných osob či skupin obyvatelstva z oblastí vzdálených od daného objektu, eventuelně z důvodu ochrany mikroklimatu v památkových objektech, kdy může být návštěvníkům vstup zakázán. Tento přístup se v současnosti institucím obecně osvědčil při pandemických vlnách Covidu-19, který do značné míry paralyzoval globální dění, včetně kulturního života světové populace. Díky virtuálním prohlídkám je možné z každého koutu světa a nezávisle na protiepidemických opatřeních podniknout například prohlídku florentského dómu Santa Maria del Fiore.²⁰ Pokud jsou 3D vizualizace opatřeny odborným či populárně-naučným textem, mohou posloužit k badatelským, vzdělávacím či popularizačním účelům, jako v případě neolitické hrobky Janas di S'Incantu v nekropoli na hoře Siseri na Sardinii.²¹ V rámci našeho výzkumného projektu vznikl interaktivní 3D model interiéru chrámu sv. Mořice v Olomouci,²² v němž si uživatel může ve čtyřiceti anotacích a třech jazykových

18 Jakub Karas – Tomáš Tichý, *Drony*, Brno 2016, s. 40–61. Na drony je možné upevnit různé senzory, čímž roste variabilita možností využití UAV. Multikoptéry mohou nést kupříkladu termovizní kameru k zachycení tepelných úniků nebo zjištění skrytých podpovrchových poškození staveb. Dále multispektrální kameru pořizující záznam v různých světelných spektrech, laserový skener k přesnému zaměření objektu i zhotovení 3D modelu, a jiná čidla měřící znečištění ovzduší, teplotu, vlhkost, radiaci apod. Speciálních senzorů existuje celá řada, a tak se do budoucna otevírá celá škála možností jejich využití, záleží jen na jejich přispůsobení se velikosti dronu a způsobu napájení. V neposlední řadě lze UAV využít k transportu, kdy jsou již v dnešní době využívány k přepravě zboží, ale také různých záchranných zařízení v krizových situacích.

19 <https://fly4future.com/realizations/naki/>, web kolegů z ČVUT, vyhledáno 23. 11. 2021.

20 <https://uomo.firenze.it/it/634/virtual-tour>, vyhledáno 23. 7. 2021.

21 <http://www.3d-virtualmuseum.it/opere/sardegna-sassari-putifigari-necropoli-mon-te-siseri-domus-de-janas-di-sincantu>, vyhledáno 23. 7. 2021.

22 Specializovaná mapa s odborným obsahem (Nmap): http://mrs.felk.cvut.cz/3d-model-viewer/player/player.html?moric_inside.

mutacích přečíst odborné texty týkající se budovy kostela a jeho výzdoby, zejména vitrají ve vysokých gotických oknech. Na závěr je vhodné zmínit, že při popularizaci památek široké veřejnosti je nezanedbatelná funkce 3D modelů při sbírání finančních prostředků (fundraising) na opravy prezentované kulturní památky.

Níže uvádíme několik dalších příkladů relevantních projektů digitalizace a dokumentace hmotných kulturních statků ze světa i z domoviny. Nejedná se o jejich kompletní výčet, který kvůli dynamickému vývoji v oblasti nových technologií i bezpilotních leteckých prostředků vlastně ani není možné sestavit, a především není účelem této metodiky takový vyčerpávající soupis podávat.

VI. 1. Svět

Organizací, zabývající se od roku 1968 dokumentací kulturních statků v globálním měřítku, je CIPA (*Comité International de la Photogrammétrie Architecturale*),²³ jejíž působnost se od fotogrammetrického zachycování architektury rozvinula v digitální zaznamenávání celých krajinných celků, nebo naopak mincí a šperků. CIPA je jedním z nejstarších výborů ICOMOS,²⁴ hlavního poradního orgánu UNESCO.²⁵ Letní školy CIPA, jejichž nedílnou součástí je setkávání odborníků z celého světa a dokumentace místních památek, se uskutečnily v lokalitách jako je italské Paestum, španělská Valencie či jihokorejské Kjongdžu, mezi jehož partnerská města patří francouzské Versailles či italské Pompeje.

Itálie patří díky odkazu antického Říma, jeho znovuzrození v podobě renesance a transformace do dramatických křivek baroka, mezi kulturní a památkové velmoci, přičemž se zároveň drží na světové špici v oblasti památkové obnovy a restaurování. V této souvislosti musíme jmenovat florentské *Opificio delle Pietre Dure*,²⁶ které se od 16. století, kdy fungovalo jako uměleckořemeslná dílna na výrobu nábytku inkrustovaného drahými kameny a perletí, přetavilo v soudobý elitní restaurátorský institut. Vedle italských odborníků však v zemi působí i řada vynikajících zahraničních pracovníků z oblasti památkové péče a výzkumu kulturního dědictví, například v rámci *The British School at Rome*²⁷ či *The American Academy in Rome*.²⁸

Jednou ze světově nejvýznamnějších památkových a archeologických lokalit jsou výše zmíněné starořímské Pompeje, které spolu s Herculaneem a širokým okolím zasypala erupce vulkánu Vesuv v roce 79 n. l.²⁹ Již po více než 270 let jsou zmíněné oblasti znovu odkrývány a prezentovány veřejnosti.³⁰ Znovuodhalení Pompejí však s sebou přináší i problémy spojené s působením lidstva a přírodních elementů. Po devastujícím zemětřesení v roce 1980, jež zasáhlo značnou část jižní Itálie, se v Pompejích sešel mezinárodní výzkumný tým kvůli pomoci zdokumentovat aktuální stav naleziště. V rámci tohoto mezinárodního úsilí vznikl v roce 2000 z iniciativy *The Swedish Institute in Rome* program podrobně zkoumající a dokumentující Pompeje, konkrétně zdejší městský blok *Insula V 1*. Po deseti letech se projekt přesunul pod vedení *Katedry archeologie a antické historie Univerzity*

23 <https://www.cipaheritagedocumentation.org/about/whatiscipa/>, vyhledáno 23. 7. 2021.

24 <https://www.icomos.cz/index.php/en/o-nas>, vyhledáno 24. 7. 2021.

25 <https://whc.unesco.org/> – Pro ČR: <https://www.npu.cz/pamatky-unesco> – <https://www.npu.cz/cs/npu-a-pamatkova-pece/pamatky-a-pamatkova-pece/pravni-pred-pisy-a-mezinarodni-dokumenty/mezinarodni-dokumenty> – <https://www.mkcr.cz/pamatky-unesco-263.html>, vše vyhledáno 24. 7. 2021.

26 <http://www.opificiodellepietredure.it/>, vyhledáno 22. 7. 2021.

27 <https://www.bsr.ac.uk/about>, vyhledáno 22. 7. 2021.

28 <https://www.aarome.org/about>, vyhledáno 22. 7. 2021.

29 <https://whc.unesco.org/en/list/829/>, vyhledáno 22. 7. 2021.

30 <http://pompeisites.org/en/>, vyhledáno 22. 7. 2021.

v Lundu, pod níž spadá doposud. Nedlouho poté se ve spolupráci s *Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo"* v Pise jejich pole působnosti rozšířilo o pokročilé technologie, zahrnující digitální prostorové skenování, 3D vizualizace a rekonstrukce objektů v jejich předpokládané, vědecky podložené podobě.³¹

V této souvislosti musíme rovněž uvést *The Volterra-Detroit Foundation*,³² americko-italskou nadaci, zabývající se v průběhu posledních osmi let digitální dokumentací historického jádra toskánského města Volterra, jehož kořeny sahají přes bohatý středověk až do časů Etrusků. Nadace byla založena Fakultou architektury *University of Detroit Mercy* a jejími absolventy za účelem financování renovace a adaptace budovy bývalé Umělecké školy ve Volteře. Od května 2013 probíhají stáže studentů na *Volterra International Residential College*, poskytující jim příležitost ponořit se do historie, kultury a architektury Toskánska, Itálie a Evropy. V roce 2016 pořádali *International reality capture Workshop*, jehož hlavním cílem bylo využít inovativní technologie zachycování skutečnosti a vytvořit trojrozměrné počítačové modely citadely města Volterra, jeho archeologických nalezišť a některých cenných uměleckých děl. Workshop vedený specialisty ze společností *Autodesk*,³³ *Leica Geosystems*³⁴ a *Case Technologies*³⁵ účastníkům poskytl praktické zkušenosti s použitím dronů a další techniky k zachycení města a uměleckých děl, stejně jako s následným přetavením získaných dat do digitálních modelů pomocí fotogrammetrických technologií. Mimo jiné byla pomocí technologií laserového skenování zachycena budova *Volterra Residential College* a vznikl tak její vysoce detailní informační model.³⁶ V roce 2019 jsme v rámci našeho výzkumu navázali s touto nadací spolupráci, avšak pandemie Covidu-19 ji přerušila, stejně jako vlastní aktivity *The Volterra-Detroit Foundation*.

Krátce můžeme zmínit projekt *Turin 1911: The World's Fair in Italy*, což byl první digitální projekt věnovaný jediné světové výstavě pořádané v Itálii, realizovaný *Divizí umění a humanitních věd, Iniciativy inženýrství kulturního dědictví na Institutu Qualcomm a Polytechnickou univerzitou v Turíně*. V rámci něj výzkumníci z *Kalifornské univerzity v San Diegu* navštívili Turín, aby digitálně zmapovali část města s historickou architekturou, rozsáhlými nástěnnými malbami a uměleckými díly.³⁷

31 <https://www.pompejiprojektet.se/index.php#>, vyhledáno 22. 7. 2021. – <https://www.lunduniversity.lu.se/article/researchers-reconstruct-house-ancient-pompeii-using-3d-technology>, vyhledáno 22. 7. 2021. – <https://www.isti.cnr.it/en/about>, vyhledáno 22. 7. 2021. – Emanuel Demetrescu – Daniele Ferdani – Nicoló Dell'Unto – Anne-Marie Leander Touati – Stefan Lindgren, Reconstructing the original splendour of House of Caecilius Iucundus. A complete methodology for virtual archaeology aimed at digital exhibition, SCIRES it, č. 1, 2016, s. 51-66. Elektronicky zde: <http://www.sciresit.it/article/viewFile/12009/11022>, vyhledáno 22. 7. 2021. – <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/take-virtual-tour-these-newly-excavated-pompeian-homes-180974654/>, vyhledáno 23. 7. 2021.

32 <https://volterra-detroit.org/2015/05/21/volterra-detroit-foundation/>, vyhledáno 23. 7. 2021.

33 <https://www.autodesk.com/>, vyhledáno 16. 9. 2021.

34 <https://leica-geosystems.com/>, vyhledáno 4. 8. 2021.

35 <https://www.casotech.com/>, vyhledáno 4. 8. 2021.

36 <https://volterra-detroit.org/2017/11/30/reality-capture-workshop-receives-american-institute-of-architects-2017-innovation-award-and-is-the-2017-peoples-choice-recipient/>, vyhledáno 24. 7. 2021.

37 <https://italyworldsfairs.org/xml-datapages/basic/99> a <https://www.youtube.com/>

Cultural Heritage Engineering Initiative (CHEI) se zaměřuje na „inženýrství budoucnosti pro minulost“, vytváří nový, interdisciplinární, výzkumný, vzdělávací a školící program na podporu kultury, zkoumání a objevování s technologickými inovacemi s cílem pokročit ve vývoji diagnostických metodologií, modelů, nástrojů a systémů pro použití při dokumentaci, analýze a konzervaci historických artefaktů.³⁸ Realizovali kupříkladu model florentského baptisteria sv. Jana Křtitele a jeho základů spočívajících na římských stavbách z 3. století.³⁹

Pro rozličné použití, všeobecnou popularizaci a zejména pro restaurátorské využití se zabývají dokumentací malířských děl ve vysokém rozlišení, v gigapixelovém formátu projekty *Haltadefinizione*⁴⁰ v Itálii či *Bosch Project*⁴¹ v Nizozemí.

Technologie z 21. století využili také němečtí experti z *University Bauhaus* ve Výmaru a organizace pro ochranu památek *Kulturstiftung Sachsen-Anhalt*. Pro získání dat z halberstadtské katedrály v Sasku-Anhaltsku využili dron Intel Falcon 8+ a pomocí série interiérových a exteriérových autonomních i manuálních letů nashromáždili podklady pro plán restaurátorských prací.⁴² Tato technologie pomohla odborníkům dostat se na dříve nedostupná místa, jako jsou třeba věže katedrály. Jedná se o finančně efektivní způsob, jak získat vizuální kontrolu nad těžko dostupnými, a hlavně křehkými prvky objektu, a to bez rizika jejich potenciálního poškození tradičními metodami zahrnujícími žebříky nebo lešení. V případě této památky se jednalo například o několik poškozených kamenných soch, vysokých 26-50 stop, s křehkou, od kamene se oddělující polychromií.⁴³

Potenciálem využití UAV se zabývají také rumunští kolegové v případové studii na panském sídle rodu Hatfaludy z 19. století, nacházejícího se v transylvánské župě Sălaj. K získání dat použili dron DJI Mavic Pro vybavený 4K fotoaparátem a vytvořili přesný 3D model, digitální výškopisné a povrchové modely, fotorealistické výstupy pro digitální rekonstrukci k vizuálním prohlídkám, analýzu poškození konstrukcí a prostorové analýzy objektu.⁴⁴

V květnu roku 2020 skončil projekt *Resting in Peace* zaměřující se na nalezení a zajištění židovských pohřebišť ztracených ve východoevropských oblastech, a to pomocí dronů. Cílem mise bylo

[watch?v=FK07LRay-MI](#), vyhledáno 24.7.2021.

38 <http://chei.ucsd.edu/about/>, vyhledáno 24. 7. 2021.

39 <http://chei.ucsd.edu/baptistry-di-san-giovanni/>, vyhledáno 24. 7. 2021.

40 <https://www.haltadefinizione.com/en/image-bank/>, vyhledáno 28. 1. 2021.

41 <http://boschproject.org/#/>, vyhledáno 21. 2. 2021.

42 http://pano.erlebnisland.de/player/?pano_dir=halberstadt/dom&startscene=scene_dom_zu_halberstadt&iframe=true&width=90%25&height=90%25, vyhledáno 15. 9. 2021.

43 Norman Hallermann – Guido Morghenthal, *Vision-based monitoring of heritage monuments – Unmanned Aerial Systems (UAS) for detailed inspection and high-accurate survey of structures*, Conference: Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture – STREMAH 2015, At: A Coruna, 2015, elektronicky https://www.researchgate.net/publication/281460456_Vision-based_monitoring_of_heritage_monuments_-_Unmanned_Aerial_Systems_UAS_for_detailed_inspection_and_high-accurate_survey_of_structures, vyhledáno 6. 10. 2021. – <https://insideunmannedsystems.com/intel-falcon-8-drone-used-in-inspection-15th-century-german-cathedral-artwork/>, vyhledáno 6. 10. 2021.

44 Paul Sestras – Sanda Roșca – Ștefan Bilașco – Sanda Naș – Ștefan M Buru – Leontina Kovacs – Velibor Spalević – Adriana F Sestras, *Feasibility Assessments Using Unmanned Aerial Vehicle Technology in Heritage Buildings: Rehabilitation-Restoration, Spatial Analysis and Tourism Potential Analysis*, in: *Sensors* 20, no. 7: 2054. (<https://doi.org/10.3390/s20072054>), elektronicky: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7180607/>, vyhledáno 20. 8. 2021.

lokalizovat na 1500 oblastí a vytvořit na 700 architektonických plánů areálů pro jejich ochranu.⁴⁵

Na ochraně Velké čínské zdi spolupracuje s *Čínskou nadací pro ochranu kulturního dědictví (CFCHC)* společnost Intel, která poskytla drony Intel Falcon 8+ komerční třídy pro průzkum jednoho z nejslavnějších úseků Jiankou, který je pro tradiční kontroly příliš nebezpečný a nákladný kvůli strmému a divokému terénu. Tato dvanáctimílová část se rychle rozpadá a tradičně prováděné průzkumy ručně s pomocí svinovacího metru a vizuální kontroly byla pro tým nebezpečná a nashromážděná data nepřesná. Nyní však prostřednictvím tohoto partnerství prohledávají zed' drony Intel Falcon 8+ komerční třídy a pořizují více než 10 000 leteckých snímků ve vysokém rozlišení, ze kterých je vytvořen 3D model, pomocí něhož mohou ochranné týmy vytvořit efektivnější plán oprav během několika dní.⁴⁶

V kanadském městě St. John's dokumentuje *Basilica Heritage Foundation* chrám sv. Jana Křtitele, přilehlé kláštery a kolej. Věřící, že plánová dokumentace a fotografie vzniklé tímto průzkumem napomohou při obnově objektů nyní i v budoucnu, přičemž řada výstupů navíc bude zpřístupněna online veřejnosti.⁴⁷ Mimo celek kostela se aktuálně zaměřili na okna baziliky, která vykazují známky poškození a díky přístupu dronů a laserového skenování je možné zjistit jejich stav. Prostřednictvím těchto technologií získají data, která by „starým“ způsobem měření nikdy nezískali. Vlastníci památky jsou tímto projektem nadšení a líbí se jim využití high-tech produktů k dokumentaci historických objektů a věří, že je to cesta pro další restaurátorské projekty do budoucna.⁴⁸

Na závěr se však vraťme k našim u sousedům, tentokrát na Slovensko, kde *Studio 727* včele s Ladislavem Dedíkem pod vládním projektem *Digital Monuments Fund (DMF)* dostalo za úkol digitalizovat skoro 2 000 slovenských objektů kulturního dědictví. *Studio 727* vzniklo v roce 1997 jako postprodukční studio a bylo vybráno, aby vedlo DMF projekt, který byl dítětem *Operačního programu informatizácie spoločnosti (OPIS)* a přirozeným klientem se stal *Pamiatkový úrad Slovenskej republiky*. Cílem projektu bylo digitalizovat vybraný počet národních kulturních památek a historických objektů, aby v budoucnu napomohly v rámci restaurování uchránit tyto objekty pro příští generace. K dosažení požadované kvality použilo studio pozemní skener Leica P20 v kombinaci s digitální fotogrammetrií za použití autonomní hexakoptéry Aibot X6 Version 2 (V2), jejichž výstupy propojili v softwaru RealityCapture.⁴⁹

45 <https://insideunmannedsystems.com/resting-in-peace/>, vyhledáno 6. 10. 2021.

46 <https://insideunmannedsystems.com/intel-drones-helping-to-preserve-the-great-wall-of-china/>, vyhledáno 6. 10. 2021.

47 Suma ve výši 200 tisíc dolarů jim tedy přijde jako dobrá investice, která vytváří určitou hodnotu, šetřící vynaložené finance do budoucna.

48 <https://thebasilica.church/>, vyhledáno 6. 10. 2021. <https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/basilica-drone-laser-images-1.4128989>, vyhledáno 6. 10. 2021.

49 <https://insideunmannedsystems.com/picturesque-using-drones-preserve-historical-sites/>, vyhledáno 20. 9. 2021. – Peter Brunčák – Jana Haličková – Anna Sučíková – Ivica Kravjanská a kol., *Digitálny pamiatkový fond Slovenskej republiky*, 2015, elektronicky https://itlib.cvtisr.sk/wp-content/uploads/docs/30_digitalny.pdf, vyhledáno 20. 9. 2021. – <https://www.slovakiana.sk/virtualna-exkurzia/pamiatky>, vyhledáno 15. 9. 2021. – <http://www.pamiat->

V současné době již ve světě nalezneme řadu příkladů využití dronů pro dokumentaci a digitalizaci památek, ať již v podobě výstupů specifických projektů zabývajících se ochranou kulturního dědictví⁵⁰ nebo profesionálních týmů využívajících moderní technologie pro širší spektrum výstupů.⁵¹

ky.sk/sk/page/digitalny-pamiatkovy-fond, vyhledáno 20. 9. 2021.

50 Thomas Luhmann – Maria Chizhova – Denys Gorkovchuk, Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia, *Drones* 2020, 4, 53; doi:10.3390/drones4030053, in: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/3/53>, vyhledáno 24. 7. 2021. – Mauro Lo Brutto – Alessandra Garraffa – Paola Meli, UAV Platforms for Cultural Heritage Survey: First Results, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. II-5, 2014. 10.5194/isprsannals-II-5-227-2014, in: https://www.researchgate.net/publication/263409166_UAV_Platforms_for_Cultural_Heritage_Survey_First_Results, vyhledáno 24. 7. 2021.

51 AEROMAPPER (www.aeromapper.com), nabízí digitalizaci různých oblastí pro záchranu historie našich civilizací v době různých přírodních katastrof, ozbrojených konfliktů, urbanizace atp. Technologie mapuje a vytváří digitální klony pozůstatků dědictví, aby byla zachována jejich historie a bylo umožněno je v budoucnu studovat. Vyhledáno 4. 8. 2021. Dále pak kupříkladu <http://heritagestudios.co.uk/>, tým profesionálních fotografů, videografů a pilotů dronů z Hertfordshiru v Anglii specializující se na fotografie z ptáčích perspektiv (z dronů), dokumentaci architektury a 3D virtuální prohlídky či Google Street View. Vyhledáno 4. 8. 2021.

VI. 2. Česká republika

V kulturně historickém prostředí našly UAV (bezpilotní letecké prostředky) využití nejspíše v oblasti archeologie, kde se plynule navázalo na dlouhou tradici využívání nedestruktivní průzkumové metody letecké archeologie.⁵² Období světových válek vývoji této metody výrazně pomohlo. V souvislosti s rozmachem vojenského letectví znamenala tato doba startovací impuls pro bouřlivý rozvoj vojenského leteckého mapování a průzkumu.⁵³ Poválečná státní politika ovšem zavedla na letecké práce přísná omezení a na území Československa mohly letecké snímkování dlouho provádět pouze státem určené a přísně kontrolované organizace. Přesto nebo právě proto se u nás brzy po zrodu technologie bezpilotních letadel přesunul zájem na vývoj a využití rádiově řízených letadel (RC, radio controlled). Významně se na úloze podílel *Geografický ústav Československé akademie věd*, který od druhé poloviny 60. let tyto stroje prosazoval s cílem pořizování operativních snímků malých ploch, které bylo potřeba zmapovat či monitorovat. První snímkování pomocí rádiově řízeného modelu u nás proběhlo v roce 1967 a můžeme jej považovat za počátek leteckého snímkování z malých výšek v Československu.⁵⁴ Přibližně od druhé poloviny 70. let 20. století umožnilo zmírnění zákona o utajovaných skutečnostech na neměřické snímkování pro civilní účely provádět takové snímkování i dalšími organizacemi především výzkumného a projekčního charakteru.⁵⁵ Mezi ně patřil i *Archeologický ústav Praha*, který využil spolupráci s *Geografickým ústavem* a v 80. letech tyto rádiově řízené stroje poprvé použil k mapování archeologických lokalit (Závist, Makotřasy, Budeč, Ostrov u Davle).⁵⁶ Radikální uvolnění leteckého provozu po listopadu 1989 a nasazení malých pilotovaných letadel i pro drobné snímkovací práce nakrátko odsunulo rádiově řízené stroje do pozadí. Významně k tomu přispěl i fakt, že na začátku 90. let byl *Geografický ústav ČSAV* zrušen a výzkum už nepokračoval.⁵⁷ Oživení doznala tato technologie znovu až v posledních letech ve spojení rozmachu informačních a navigačních technologií a moderních bezpilotních létajících prostředků UAV (bezpilotních helikoptér). Poznání oblasti nebo areálu z ptačí perspektivy pomocí bezpilotních helikoptér nezůstává pouze

52 Jaroslav Böhm, *Letecká fotografie ve službách archeologie*, *Zprávy památkové péče*, III, 1939, s. 63-65.

53 Marcel Brejcha – Vladimír Brůna – Zdeněk Marek – Bára Větrovská, *Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek*, Ústí nad Labem 2015, s. 36.

54 Ibidem, s. 3.

55 Ladislav Plánka, *Počátky snímkování RC-modely letadel v Československu*. In: *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství*, Brno 2014, s. 1, online: <https://docplayer.cz/9480175-Pocátky-snimkovani-rc-modely-letadel-v-ceskoslovensku-uvod.html>, vyhledáno 14. 4. 2021.

56 Martin Gajda, *Metodologie archeologické prospekce a exkavace: workshop I – prospekce. Letecká archeologie*, studijní materiály FF AEA, MUNI Brno 2015, elektronicky: https://is.muni.cz/el/phil/podzim2015/AEA_73/um/Letecka_archeologie.pdf, vyhledáno 14. 4. 2021.

57 Viz Plánka (pozn. 55), s. 1. – Markéta Lacinová, *Bezpilotní létající prostředky při činnosti IZS a legislativní rámec pro jejich použití (diplomová práce)*, Fakulta biomedicínského inženýrství Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva, ČVUT v Praze 2016, s. 15.

doménou archeologie, ale dnes je hojně využívána také při mapování a památkovém vyhodnocení urbanistických komplexů, průmyslových areálů či historické zeleně.⁵⁸

Eskalující vývoj moderních technologií našel své uplatnění v mnoha oblastech lidského konání. Využití v oboru stavebnictví rychle propsalo své výhody i do monitoringu kulturně historických objektů. Tyto aktivity zahrnují například vizuální kontrolu vnějšího pláště budov včetně střech a komínů, termovizní diagnostiku nebo vytváření 3D reprezentací objektů (čili 3D modelů) pomocí fotogrammetrie. A ačkoliv odborně prováděné práce tohoto charakteru stále zůstávají ve větší míře v rukou komerčních subjektů, postupně si tuto techniku osvojují i odborné kruhy památkové péče a přidružených oborů.⁵⁹ V roce 2015 vznikla zastřešující Aliance pro bezpilotní letecký průmysl (UAVA), která si klade za cíl rozvíjet bezpilotní technologie, vytvářet předpoklady a optimální podmínky pro výzkum, vývoj, výrobu a obchod. Aliance proto sdružuje zejména komerční subjekty, ale i vědecké pracovníky a instituce, nevládní a neziskové organizace a všechny příznivce podporující bezpilotní letecký průmysl.⁶⁰ Vytváří se tak užitečná platforma zaštiťující oblast uživatelů bezpilotních helikoptér v soukromém, veřejném i vědeckém sektoru.

Celkové i detailní záběry z neobvyklých úhlů jsou velmi atraktivní, ale aby našly své plnohodnotné uplatnění a jejich potenciál mohl být zcela vytěžen, je potřeba umět je správně interpretovat a zasadit do kontextu již získaných informací o objektu. Kvůli poutavosti pořizovaných záběrů se využívá bezpilotních helikoptér pro popularizaci kulturních památek, oživení zájmu o jejich výzkum a ochranu, k čemuž se kupříkladu přikročilo na státním hradu a zámku v Bečově nad Teplou.⁶¹ Bezpečné využití bezpilotních helikoptér pro dokumentaci interiérů současný stav technologie umožňuje pouze velmi omezeně, s nízkou výpovědní hodnotou v případě detailů. Snímání dronem slouží spíše jako doplňující metoda k tradičně používaným způsobům dokumentace, navíc za omezených podmínek a v rukách zkušeného pilota.

58 Karel Kuča – Věra Kučová, *Metodika klasifikace staveb podle památkové hodnoty*, Praha 2015, s. 168.

59 V současné době jsou podobné akce dílem individuálních aktivit a projevem osobního nadšení pro danou technologii a její výsledky, chybí proto zatím příklady publikované v odborných periodikách. Zmínky v odborných publikacích se zatím přidržují obecných charakteristik, např.: viz Böhm (pozn. 52), s. 36 – Jan Veselý, *Měřická dokumentace historických staveb pro průzkum v památkové péči*, Praha 2014, s. 15-16. V roce 2018 bylo NPÚ ÚOP v Ústí nad Labem jmenováno jako zkušební pracoviště pro uplatnění bezpilotních helikoptér v praxi památkové péče a generální ředitelství poskytlo finanční podporu pro nákup bezpilotních leteckých prostředků a absolvování školícího pilotovacího kurzu třem pracovníkům. Případně jsou zmínky v publikacích památkové péče autorstvím přidružených oborů – Marek Novotný, *Monitoring stavebních památek pomocí dronu*, in: *Torzální architektura. Technologie konzervování, památková obnova*, Praha 2017, s. 59-61.

60 Základní informace o UAV Alianci jsou dostupné online: <https://uavaliance.cz/>, vyhledáno 31. 8. 2021.

61 Popularizace hradozámeckého areálu Bečov, online: <https://www.npu.cz/cs/npu-a-pamatkova-pece/npu-jako-institute/zpravy/27028-hrad-a-zamek-z-ptaci-perspektivy-be-cov-ma-nove-video-z-dronu>, vyhledáno 15. 4. 2021. Představení bezpilotní letecké techniky jako součást prezentace pracoviště NPÚ, ÚOP v Telči a vědecko-výzkumného projektu *Archeologie z nebe*, online: <https://www.npu.cz/cs/uop-telc/pro-media/44132-telc-na-mu-ni-100>, vyhledáno 15. 4. 2021, Výroční zpráva NPÚ za rok 2019.

VII. Metodika snímání vnějších plášťů budov

VII. 1. Postup práce

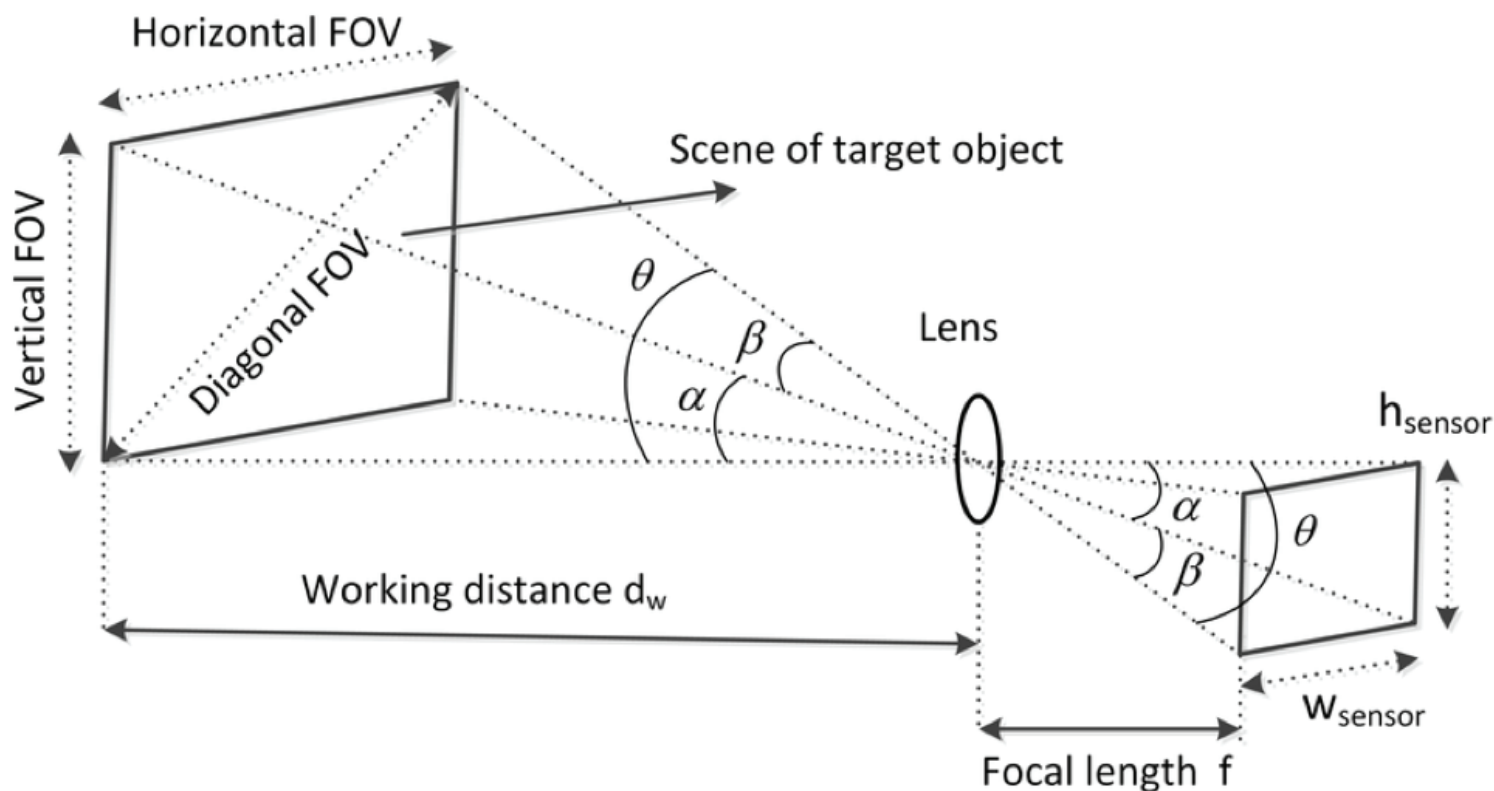
Metodika snímání vnějších plášťů budov sestává především ze dvou hlavních témat, kterými je nutné se při realizaci snímání zabývat.

VII. 1. 1. Pořízení vstupních fotografických snímků

V první řadě je to vstup v podobě požadované kvality výstupů. Kvalita výstupů (ať už se jedná o texturovaný 3D model, ortogonální pohledy nebo hloubkové mapy) je vždy odvozena od kvality vstupních dat. Pokud považujeme za vstupní data obrazový materiál, tedy fotografie, je nutné se zabývat jejich rozlišením a kvalitou z pohledu ostroty. Obecně pak platí, že finální výstupy mají 2x až 4x nižší kvalitu s ohledem na ostrot a rozlišení. Tento fakt je způsoben poklesem kvality v důsledku zpracování metodami počítačové stereometrie, respektive fotogrammetrie.

Pro stanovení rozlišení získaných snímků je potřeba znát vlastnosti snímáče (respektive zvolit správný snímáč s ohledem na požadovanou kvalitu, pokud je možné snímáč na bezpilotním prostředku ovlivnit). Mezi základní vlastnosti snímáče pak patří rozlišení v pixelech, ohnisková vzdálenost optiky a velikost snímacího čipu. Všechny tyto vlastnosti pak vstupují do výpočtu s použitím základních optických rovnic.

V zásadě jde o jednoduchý výpočet, který nám řekne, v jaké vzdálenosti od objektu zájmu musí nejméně kamera být, abychom dosáhli požadovaného rozlišení v milimetrech na pixel. Pokud například chceme viditelně rozpoznat objekt o velikosti 1 cm² je



Obrázek 001: Ilustrace záběru (FoV) objektivu ve vztahu k velikosti snímáče.⁶²

potřeba abychom dosáhli rozlišení alespoň 1 mm/px. Pak se takový objekt na fotografiích projeví jako shluk barevných čtverců o velikosti 10x10 čtverců. Pokud takovýto objekt chceme dále zkoumat ve větším detailu, je potřeba rozlišení zvětšit. Zásada je stejná ať už snímáme artefakt v ateliéru nebo fasádu s výzdobou, ovšem při použití bezpilotního prostředku nám tato informace dává jasné restriky pro provedení let.

Pokud známe požadované rozlišení a optika našeho snímáče je neměnná, máme jasně definovanou vzdálenost od objektu, pod kterou se musíme pohybovat. Pokud je tato vzdálenost menší než 5 metrů, měli bychom se zamyslet nad použitím jiného snímáče, respektive jiné optické aparatury (objektivu), pokud je možné ho měnit. Sama vzdálenost 5 metrů od fasády se může zdát bezpečná, ale je nutné si uvědomit, že budova vrhá stín, a to především

radiový, tedy bezpilotní prostředek bude mít značné problémy držet stabilně polohu (oproti situacím, kdy letí na volném prostranství), protože GNSS (laicky GPS) přijímač bude mít výhled pouze na polovinu oblohy (v lepším případě) a tudíž jen na polovinu družic. Zde bychom zacházeli do zbytečných detailů, ale kvalita určení polohy pomocí systémů GNSS je silně závislá na tom, jaký výsek oblohy máte nezakrytý pevnými předměty. Pokud budu mít zakrytý výhled na oblohu vlevo a vpravo, například když prolétám tzv. městským kaňonem (dlouhou rovnou ulicí s vysokými domy na obou stranách) je bezpilotní prostředek schopen poměrně dobře určit polohu ve směru tohoto kaňonu, ale o poloze v kolmém směru není schopný říct téměř nic. To je ovšem kritické, protože právě tato informace nám má pomoci v tom, abychom nenarazili do budov vlevo nebo vpravo.

62 Viz: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-camera-lenss-field-of-view-FoV_fig4_335011596, vyhledáno 1. 11. 2021.

Druhým optickým jevem, který je nutné zvážit je tzv. hloubka ostrosti, tedy nastavení snímacího zařízení tak, aby v požadované vzdálenosti byly ostré všechny části snímaného objektu, kterou jsou na každém pořízeném snímku. Tento problém se projeví především u velmi hloubkově členitých objektů. Představme si, že objektem zájmu je výrazně profilovaná fasáda. Utopená okna oproti vystouplým sloupům, nebo balkonu, mohou tvořit v hloubce například 1 m. Potřebujeme zajistit, aby na snímku, kde je jak okenní rám tak hrana balkonu, bylo vše ostré. Tohoto se docílí nastavením tzv. clony. Čím vyšší clonové číslo, tím větší hloubka ostrosti, avšak zároveň tmavší obraz. Zvýšení jasu můžeme naopak docílit prodloužením expozičního času, což nám však ovlivní rozmazání obrazu při rychlém pohybu bezpilotního prostředku (nebo nestabilní uchycení snímacího zařízení). Tento vzájemně propojený kruh je asi to nejtěžší na správném nastavení snímacího zařízení a vyžaduje jistou zkušenost s běžnou fotografií. Zde jsou zřejmě nasnadě dvě rady. Zaprvé, vybrat si pro snímání správné počasí. Ideální je difuzní světlo (zataženo vysokou celistvou oblačností, tzv. olověné nebe). Zadruhé cvičný let a následná analýza pořízených snímků. Bohužel toto nastavení není možné provést ze země a je potřeba zkušenosti ke stanovení nových parametrů nastavení clony a závěrky ze cvičných snímků.

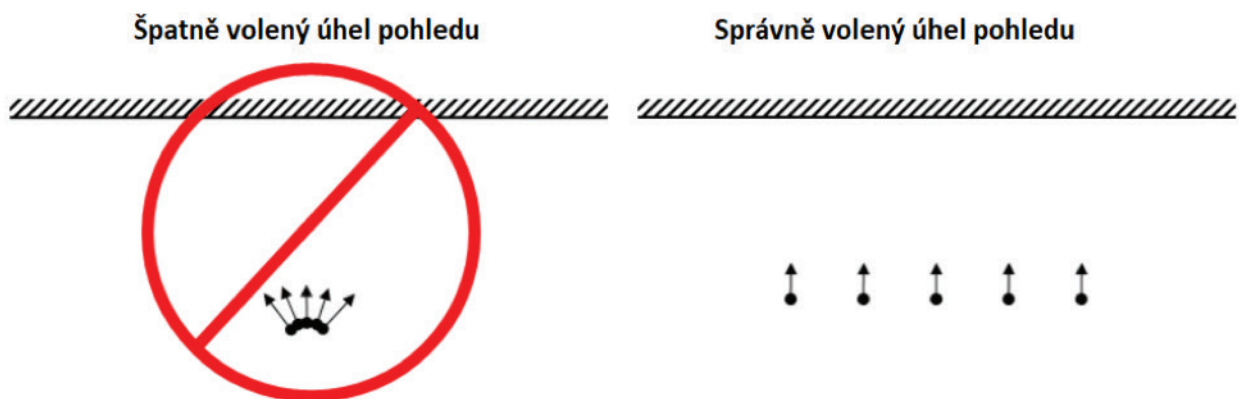
Z výše popsaného tedy vyplývá první zásada, a to stanovit si požadované rozlišení, provést dobrou analýzu hloubkové členitosti objektu zájmu a jemu pak přizpůsobit použité snímací zařízení, jeho nastavení a bezpilotní prostředek tak, aby bylo dosaženo maximální bezpečnosti, tedy zabránění havárie (a případnému poškození objektu zájmu, zdraví osob a újme na majetku) a ideálně ostrých snímků v požadovaném rozlišení. Pokud není možné dosáhnout požadovaného rozlišení za těchto podmínek, nezbývá než zvážit snížení nároků.

VII. 1. 2. Plánování letu pro snímání vstupních fotografií

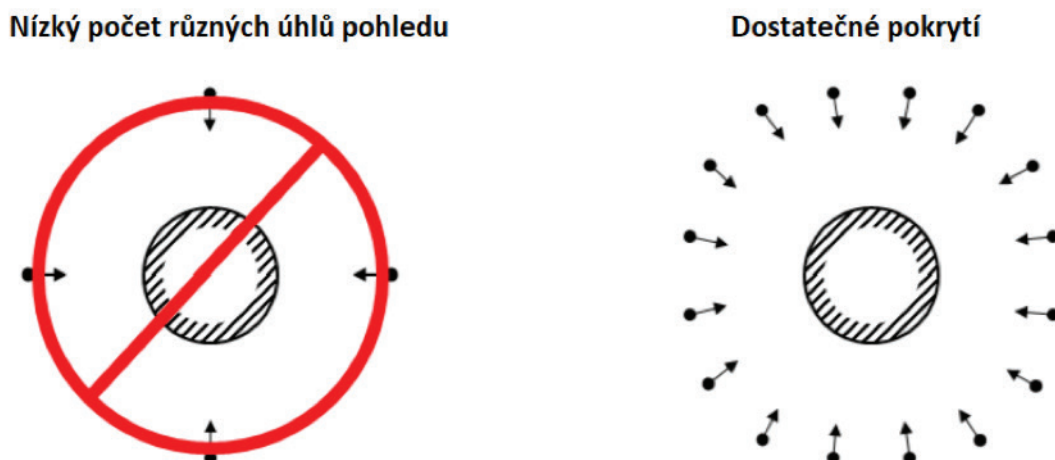
Druhým tématem je pak plánování a následné provedení samotného sběru dat pomocí bezpilotního prostředku a s tím související aspekty bezpečnosti a přesnosti. S ohledem na kvalitu je potřeba správně plánovat sběr v definované vzdálenosti od objektu zájmu a dostatečné překrytí jednotlivých sběrových trajektorií tak, aby došlo k maximálnímu vícenásobnému snímání každého místa na objektu zájmu. Zde je nutné mít na paměti, že především prostorová informace, tedy 3D plasticita objektu zájmu je získávána z redundantní informace obsažené v různých úhlech pohledu na stejné

místo. Kromě letu samotného je potřeba provést při snímání další úkony, které zajistí dodatečnou informaci použitou při tvorbě výstupů. Především se jedná o zaměření reálných vzdáleností mezi signifikantními prvky objektu zájmu a v případě požadavku na přesnou georeferenci (tedy geografické zaměření objektu zájmu) je potřeba provést instalaci a zaměření vlíčovacích bodů.

Úhel pohledu na objekt zájmu je prvním důležitým aspektem. U objektů planárních, jakým jsou například fasády, volíme především kolmé pohledy. U solitérních objektů, jakými



Obrázek 002: Kolmý úhel pohledu v různých místech je pro planární objekt lepší volbou než více pohledů z jednoho místa.



Obrázek 003: U solitérního objektu zájmu je nutné volit co nejvíce různých pozic se středem objektu na středu snímku.



Obrázek 004: Dokumentace severní fasády zámku Plumlov.

jsou sochy, volně stojící sloupy a podobně pak volíme pohledy směrem na střed. Samozřejmě je nutné u komplikovanějších objektů ideálně volit kombinaci těchto přístupů s ohledem na členitost. Tento vzor je pak replikován po vrstvách, tedy opakuje se ideálně ve stejných výškových rozstupech. Vzhledem k legislativním omezením a s ohledem na bezpečnost provozu je pak typicky prováděn tzv. kolmý vzlet. Tedy bezpilotní prostředek je v nízké výšce (nejnižší hladina snímání) nastaven do požadované polohy vůči objektu zájmu a následně je proveden let vzhůru a následně dolů. Aby bylo dosaženo maximálně bohaté datové sady je typicky využit let směrem dolů k snímání pod úhlem. Tedy snímač je pro let dolů sklopen pod úhlem 30-45 stupňů směrem dolů. Příkladem výše zmíněné kombinace pohledů na strukturovaný objekt

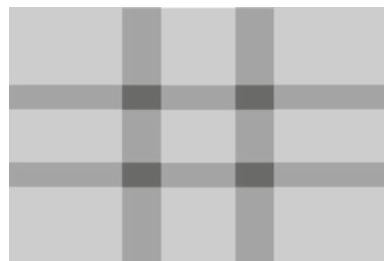
pak může být například roh budovy, kde kromě kolmých pohledů na obě stěny, je dobré pořídit také sadu fotografií v ose rohu, tedy s pohledem na obě stěny. Pokud je potřeba, může se kromě pohledu v ose přidat ještě pohled na roh z dalších úhlů. Stejný princip je pak aplikovatelný u solitérních objektů, které jsou silně excentrické, tedy jejich rozměry v jednom směru jsou podstatně větší než v druhém. Typickým příkladem může být například jezdecká socha, kde na přední a zadní stranu aplikujeme úhly pohledu pro solitérní objekt, ale na boky pak přístup kolmých pohledů stejně jako u fasády.

Otázka překryvu fotografií je zásadní pro kvalitu výsledného plastického modelu. Zde je však nutné poznamenat, že ne vždy je perfektní plastický model nutný. Například u fasády s představenými sloupy, jako na zámku *Plumlov*,⁶³ je

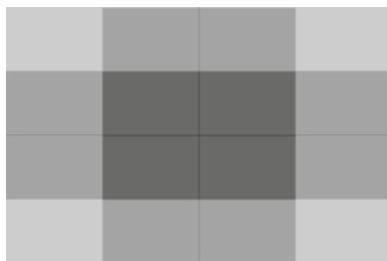
evidentní, že plastická informace je dostačující na přední straně sloupu, avšak potřeba perfektně vymodelovaného sloupu ze všech stran je irelevantní vzhledem k informaci, která je obsažena v textuře, tedy obrázku, kterým je plastický model potáhnout.

Vraťme se ovšem k požadavkům na překrytí pro získání kvalitní prostorové informace (plasticity objektu zájmu). Teorie stereometrie, potažmo fotogrammetrie, praví, že každý bod by pro jeho kvalitní prostorové začlenění měl být obsažen alespoň v pěti snímcích s diametrálně odlišným úhlem snímání. Představme si to jako černou tečku na cihlové stěně. Pokud máme fotografie přímo proti tečce, nad, pod, vlevo a vpravo od tečky, pak jsme schopni říct relevantní informaci o 3D poloze této tečky vůči cihlové zdi. Je pravda, že

63 Památkový katalog:
<https://pamatkovykatalog.cz/zamek-se-zriceninou-hradu-538698>.



005



006



007

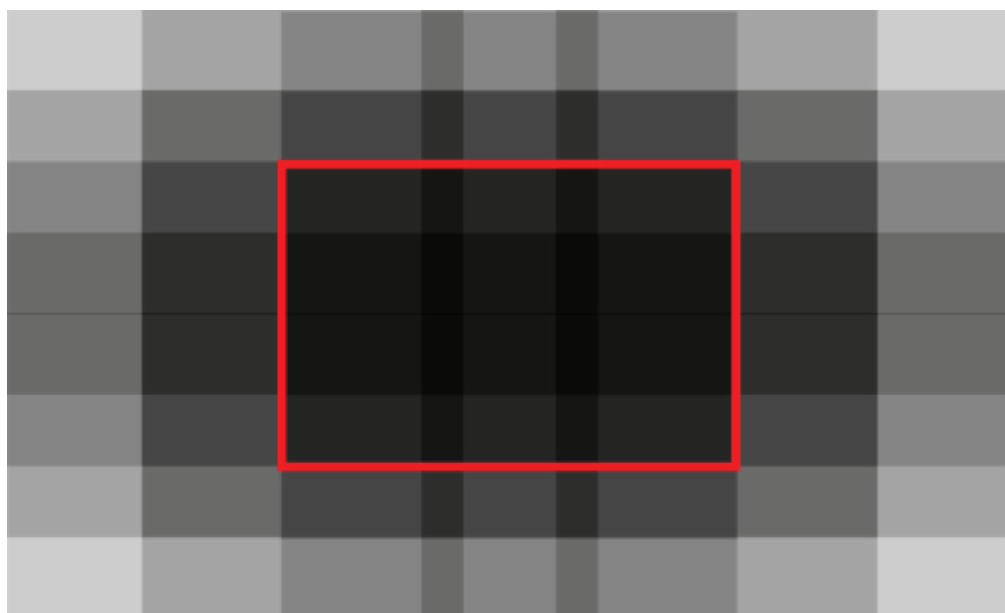
Obrázek 005, 006, 007: Srovnání pokrytí objektu zájmu vícenásobnými pohledy při zvolené velikosti překryvu.

lidskému mozku stačí pouze dva záběry, tedy z levého a pravého oka, ale až když se vůči tečce pohnete (a dostanete další pohledy) jste schopní podat ucelenou informaci. Z toho vyplývá, že je ideální, pokud každé místo snímaného objektu naleznete alespoň na pěti zdrojových fotografiích, a to ideálně z různých míst. Prakticky nám spíše vychází devět snímků k tomu, aby výpočet počítačové fotogrammetrie byl schopen díky nadbytečné informaci efektivně snížit chybu odhadu geometrické struktury objektu zapříčiněnou dalšími faktory, které nejsme schopní efektivně ovlivnit. Především se jedná o geometrické zkreslení optické aparatury snímače, které je většinou patrné na okrajích fotografií. Dále pak typicky šum nebo nedokonalé zaostření vlivem proměnlivé vzdálenosti a nedostatečné hloubky ostroty.

Na obrázku je patrné, že při překrytí pouze 25% (pro jednoduchost stejné překrytí horizontálně i vertikálně) získáme pouze malé regiony, kde je stejný prvek viděn alespoň ze čtyř pohledů.

Navíc jsou to oblasti nejvíce zatížené distorzemi. Při limitním překryvu 50% je pak situace lepší, ale nikoliv uspokojivá. Je zřejmé, že v zásadě každý prvek na fotografii je viděn právě ze čtyř pohledů (nepočítám samozřejmě přesné hrany fotografií, které jsou pro výpočet nepoužitelné. Na posledním obrázku pak vidíme, že překryv 75% a větší nám splní stanovenou podmínku na devět různých pohledů na stejný prvek objektu zájmu. Z obrázku se zdá, že je takto pokryt pouze střed centrálního snímku, ale pokud úvahu rozvineme o následující řady snímků, které při tomto pokrytí také svým obsahem zasáhnou do centrálního snímku, vidíme, že podmínka minimálního počtu pohledů se nám rozšíří na celý centrální snímek. Opakováním této úvahy pak dospějeme k tomu, že pro překrytí 75% a větší bude ve vysoké míře dostatečně pokryt celý objekt zájmu.

Je evidentní, že minimální překryv 25% je sice v mnoha ohledech dostatečný k celkovému slícování fotek (a nabízí tak možnost



Obrázek 008: Překrytí 75% a vliv na četnost pohledů na objekt zájmu vzhledem k centrální fotografii

vytvoření panoramatické fotografie, lépe řečeno ortogonální mozaiky snímků), ale naprosto nedostatečný pro kvalitní výpočet plasticity v celém snímku. Je zřejmé, že je potřeba vždy volit větší překryv. Na tomto místě je nutné podotknout, že se prakticky držíme překryvu 75%, respektive 80%, který je schopný kompenzovat nepřesnosti v pozici bezpilotního prostředku pro jednotlivé snímací pozice.

Zvolená hodnota překryvu v každé ose pak přináší několik omezení pro provádění letu. Pokud budeme předpokládat snímání fasády nejbezpečnější metodou bez horizontálního pohybu (tedy bezpilotní prostředek letí vzhůru a dolů, následuje horizontální posun u země a opakování vzletu), pak horizontální překryv ovlivňuje maximální velikost horizontálního posunu, a tedy množství výstupů a sestupů bezpilotního prostředku, implicitně pak tedy dobu trvání snímání a množství potřebných baterií pro výměnu. Vertikální překryv pak ovlivňuje zásadně rychlost, jakou smí bezpilotní prostředek stoupat a klesat, a to především ve vztahu k rychlosti závěrky snímáče (s ohledem na zajištění ostrosti snímku pořízeného bez zastavení bezpilotního prostředku) a následně ke schopnosti snímáče kontinuálně snímat a ukládat data na paměťové médium. Toto bývá velmi důležitý aspekt, protože především profesionální snímáče se honosí možností pořizování ve vysoké frekvenci, ale bohužel se již uživatel nedozví, že takové vypětí zvládnou jen po určitou velmi omezenou dobu. Následně přestanou snímat a snaží se snímky postupně dostat na paměťové médium. Je proto nutné si uvědomit, že maximální rychlost snímání po delší časový úsek bude vždy pouze zlomkem maximální rychlosti pořizování snímků deklarované výrobcem snímáče.

VII. 1. 3. Realizace letu

Posledním krokem, kterým by měla tato metodika přispět ke kvalitnímu snímání exteriérů památek, je samotné provedení letu. Bohužel většina aktuálně dostupných bezpilotních prostředků nepodporuje nativně snímání plášťů budov v automatickém nebo semi-automatickém asistivním režimu. Je to z části dáno nedostatečností technologií na palubě většiny komerčně dostupných bezpilotních prostředků a z části také komplexitou takového snímání a technologickými překážkami především na straně nejčastějších lokalizačních metod založených na GNSS přijímačích aplikovaných v hluboké zástavbě, jak bylo popsáno výše. Jedním z hlavních problémů pro automatické snímání fasád budov je požadavek na poměrně blízké přiblížení k objektu zájmu a především množství překážek. Ať už se jedná o protějščí stavby nebo další nebezpečné objekty v okolí snímání, jako může být vegetace nebo elektrické vedení.

Především specifikum přiblížení k objektu zájmu je hlavním problémem pro standardní lokalizační metody, protože je nutné si uvědomit, že běžná GPS (tedy jeden ze systému GNSS) má u běžně používaných přijímačů rozptyl až několik metrů v přesné geodetické poloze. Běžný uživatel bezpilotního prostředku toto nevnímá, protože bezpilotní prostředek při řízení rozhodně nevykazuje odchylky v poloze v řádu metrů. Takového chování je ale dosaženo dalšími palubními systémy založenými na inerciálním (tedy laicky řečeno prostorově svébytném) systému stabilizace polohy. Jinými slovy, bezpilotní prostředek je schopen velmi stabilně držet svou polohu, ale realita této polohy vůči geografickému systému (tedy to čemu říkáme GPS poloha) je typicky o několik metrů odlišná od reality, kterou by svým přesným měřením naměřil geodet.

Z výše uvedeného vyplývá, že i pokud budu mít perfektně geodeticky zaměřenou fasádu objektu zájmu, a na základě těchto měření stanovím přesnou trajektorii letu pro bezpilotní prostředek, pak poloha bezpilotního prostředku vůči objektu zájmu bude vždy zatížena chybou, která vyplývá z chyby měření přesné polohy bezpilotního prostředku v době aktivace. Tato chyba se statisticky bude pohybovat v řádech metrů a proto i vzájemná poloha bezpilotního prostředku vůči objektu zájmu bude o tuto chybu rozdílná od stanovené trajektorie letu. Tento fakt je potřeba mít na vědomí a nepokoušet se létat v automatickém režimu ve vzdálenosti několika metrů od budov, protože v lepším případě se bezpilotní letoun bude během letu vzdalovat a přibližovat k objektu zájmu, což postihne ostrost získaných snímků, v horším případě dojde ke kolizi.

Pokud tedy není možné provozovat let v automatickém režimu, je nutné zvolit let manuální s použitím tzv. pozičního režimu. Tedy bezpilotní prostředek mění svou vertikální a horizontální polohu na základě zásahu operátora do řízení. V takovémto režimu se využívá především letových dovedností operátora, který se při plnění mise může opírat o další asistivní systémy. Nejdůležitějším asistivním systémem je právě držení pozice a orientace bezpilotního prostředku.

Zde je nutné mít na paměti, že jak systém GNSS pro držení polohy je především v tzv. městských kaňonech náchylný na nekvalitní odhad polohy, tak také systém stanovení orientace v horizontální rovině je především v městských prostředích postižen chybou. Tento systém je totiž přednostně závislý na elektronickém kompasu. Elektronický, stejně jako mechanický kompas je postižený chybou vyvolanou elektromagnetickým rušením. Především v blízkosti feromagnetických kovů nebo zdroje elektromagnetického rušení. Městská zástavba je pak silnou směsicí obojího. I zde, stejně jako u systému stanovení pozice jako je GNSS přijímač, jsou na palubě inerciální senzory, které chyby primárního senzoru, jako je kompas, kompenzují. Druhým, dnes už celkem běžným asistivním systémem je senzor odhadu vzdálenosti od překážky. Tento systém je běžně využíván především k upozornění operátora na blížící se překážku, případně k automatickému zabránění kolize s takovou překážkou, ale v případě skenování vertikálních objektů je možné takový systém s výhodou využít také k udržování konstantní vzdálenosti od objektu zájmu a tím také ideální ostřicí vzdálenosti snímacího senzoru.

Systémy inerciální stabilizace a kompenzace ovšem fungují pouze pro stabilizaci rychlých odchylek, nikoliv však pro kompenzaci stabilního rušení. Lidskými slovy to znamená, že bezpilotní prostředek na základě rušení nezačne zběsile poletovat, ale postupně bude měnit svou polohu a horizontální orientaci. Od toho je tu zkušený operátor, aby během celého snímání prováděl takové zásahy, které podobné chování kompenzují a zachovávají stanovenou pozici a orientaci vůči objektu zájmu. Samozřejmě pomůckou pro takového operátora jsou ideálně vztažné body na zemi a dobrá orientace v náhledovém videu ze senzoru, které má k dispozici. Přestože je každý vzlet a přistání energeticky velmi neefektivní a přináší se sebou větší spotřebu baterií, je dobré provádět mezi sériemi kolmých vzletů pravidelná přistání a úpravu pozice bezpilotního prostředku ručně, abychom kompenzovali chyby lokalizačního systému, které se v rámci letu sčítají.

Kromě letu samotného je dobrým zvykem mít také naplánovaná pravidelná přerušení letu sloužící ke zkopírování získaných dat na perzistentní úložiště, jakým je například přenosný počítač a pokud to podmínky dovolí také zběžná vizuální analýza získaných dat. Obecně je lepší zjistit, že máme chybu v datech získaných během půl hodinového letu, než ad-post u dat z celého letového dne o nějaký čas později během zpracování. Pokud to hardware přenosného počítače dovolí, není vůbec od věci nechat tento počítač provést alespoň základní fotogrammetrické lícování snímků tak, abychom měli představu, jestli je pokrytí objektu zájmu dostatečné a případně, jestli nám některé snímky chybí k tomu, aby byl program schopen správně určit jejich vzájemnou souvislost.

VII. 1. 4. Zpracování vstupních fotografických snímků

S předchozím odstavcem silně souvisí metodika zpracování dat. Zpracování dat v mnoha ohledech začíná ještě před samotným sběrem dat pomocí bezpilotního prostředku. Je dobrým zvykem stanovit si podrobný itinerář sběru dat s detaily. Takovým itinerářem jsou kromě posloupnosti sběru jednotlivých částí objektu zájmu také činnosti předcházející a následující po provádění letů samotných. Například instalace a zaměření RTK GNSS báze stanice pro přesné georeferencování pohybu bezpilotního prostředku je činnost, která se snadno zapomene v hektickém procesu sběru samotného a zpětně již nejde vynahradiť. Další činností související s itinerářem sběru dat je pak vytvoření adresářové struktury v přenosném počítači, kam budou průběžně ukládána data získaná z jednotlivých letů. Dobře navržená datová struktura nám umožní lepší orientaci v získaných datech v časovém odstupu a zároveň funguje jako kontrolní mechanismus ke zjištění chybějících dat.

Kromě předem stanoveného plánu sběru dat je podstatnou částí procedur samotného sběru také vedení podrobného záznamu reálně provedených letů a dokumentace získaných dat. Zde je naprosto nezbytné dodržovat okamžitý zápis po skončení každého letu, a to s časovými kótami. Tedy zápis času začátku letu, ukončení letu a popis provedeného snímání s případnými poznámkami. Takové poznámky mohou být i meteorologického charakteru, jako je změna osvětlení během letu vlivem přechodu mraku přes slunce. Tyto poznámky jsou klíčové během dalšího zpracování získaných dat, protože dávají vodítko, jak s danými daty dále zacházet. Nezřídka je rozdílnou osobou ta, která data pořídila a která pak data dále zpracovává. I v případě, že data zpracovává stejný člověk, který je zároveň pořídil, časový odstup mezi snímáním a zpracováním může být natolik velký, že jsou podrobné poznámky naprosto nezbytné. Pokud poznámky chybí, dochází k problematickému zpracování a minimálně je nutné provádět dlouhé vizuální analýzy a třídění materiálu, které například u homogenních nebo opakujících se vzorů může hraničit s nemožností.

VII. 1. 5. Uložení a prezentace zpracovaných dat ze vstupních snímků

Samotný způsob zpracování získaného materiálu je plně odvislý od potřeb konečného uživatele. Zde se kruh uzavírá a vracíme se na začátek této kapitoly, protože právě konečný uživatel dat je ten, kdo musí specifikovat rozlišení a výstupní formát. Je pochopitelné, že konečný uživatel dat se vzděláním a profesním zaměřením nedokáže specifikovat taxativně požadované parametry, ale právě zde je potřeba propojit znalosti konečného uživatele a operátora bezpilotního prostředku a diskutovat se k těmto parametrům dostat. Výstupem takové diskuse je pak, kromě požadavků na rozlišení a podobně, také formát výstupních dat. Pro konečného uživatele dat může být dostatečný samotný obrazový materiál bez potřeby dalšího zpracování. Případně může požadovat obrazový formát jako tzv. ortografickou mozaiku, což je v podstatě jeden obrázek ve vysokém rozlišení vytvořený kombinací ortogonálních pohledů na rovinu fasády. Nakonec může být požadavkem konečného uživatele 3D model s plasticitou a texturou. Ale i v tomto zadání můžeme nacházet varianty spočívající v konkrétním formátu výstupních dat. Například může být požadavek na 3D model v konkrétním rozlišení geometrické sítě a textury, anebo může být požadavek na tzv. dělený model (tiled model), který nabízí různé formy podrobnosti v závislosti na vzdálenosti od modelu.

Pokud je znám požadovaný výstup pro konečného uživatele, je potřeba mu přizpůsobit sběr dat a pak také nástroj pro zpracování surového materiálu. Softwarových nástrojů pro zpracování různých výstupů je prakticky nepřeborné množství. Zde nezbývá než provést aktuální rešerši na existující nástroje s ohledem na požadované výstupy a následně odpovídající software pořídit a obsluhu náležitě seznámit s jejím praktickým používáním. Ideální jsou v tomto ohledu školení přímo od výrobce takového software.

Když je požadovaný výstup vytvořen, zbývá už jen zvolit správnou metodiku pro jeho uložení a prezentaci. Uchování výstupu je pak od triviálního uložení na pevném disku konečného uživatele, přes alespoň základní zálohování v síťovém úložišti, až po sofistikované propojení daného výsledku s ostatními daty v rámci informačního systému organizace. Zde především pro poslední bod neexistuje žádné řešení, které by bylo možné doporučit. Vždy záleží na specifických potřebách organizace a většinou také na vytvoření software modulu v rámci existujícího informačního systému, který je schopný data správně uložit a propojit s dalšími údaji. Příkladem takového propojení budiž anotace 3D modelu pomocí odkazů na zdrojové obrazové materiály a další přidružené dokumenty. Například prasklina ve zdi fasády v rámci 3D modelu může být anotována posudkem památkové péče, statika a podrobnými snímky daného místa. Takový software je potřeba navrhnout a zakázkově nechat vyrobit. Je prakticky nemožné, aby takový software již existoval a umožnil propojení s ostatními systémy.

Prezentace je pak formou, v jaké může konečný uživatel data procházet a používat. I pro tak sofistikovaná data, jako jsou 3D modely

s texturou již dnes existují možnosti prezentace přes webové rozhraní. Dalšími možnostmi jsou pak specializované aplikace pro stolní počítač. Typicky výrobci software pro tvorbu 3D modelu umožňují bezplatné použití vlastního software pro prohlížení vytvořených výsledků. Ale stejně jako v předchozím odstavci, záleží především na potřebách konečných uživatelů a samotné instituce, která daná data skladuje a spravuje. Možnost prohlížet 3D model nezavdává žádnou možnost model anotovat a případně propojovat s dalšími daty, což je zpravidla pro efektivní využití takových dat nezbytné a žádoucí. Zde je nakonec opět nasnadě vytvoření vlastního software pro prezentaci takových dat, který plně reflektuje potřeby koncových uživatelů a instituce samotné.

VII. 1. 6. Shrnutí

Následuje taxativní výčet činností pro snímání s ohledem na aspekty plánování snímání a samotného letu, splnění zákonných náležitostí pro provedení letu, příprava a provedení letu samotného a následné vyhodnocení a zpracování získaného materiálu.

Kvalita pořízeného materiálu

- Požadované rozlišení v mm/pixel
- Vlastnosti snímáče (fotoaparátu)
 - o Rozlišení
 - o Field of view (zorný úhel) použité optiky
 - fixní vs. variabilní
 - o Možnost nastavení rychlosti závěrky
 - Rychlost letu pro snímání bez zastavení (rozmazání)
 - o Možnost nastavení clony
 - Hloubka ostrosti a nastavení ostření
 - Potřebné světelné podmínky
 - o Rychlost kontinuálního focení
 - Omezení média (paměťové karty) na rychlost zápisu
- Stanovení požadavků na letovou trajektorii
 - o Vzdálenost od objektu
 - Výsledné rozlišení
 - Bezpečnost s ohledem na vítr
 - Bezpečnost s ohledem na zákryt signálu GNSS
 - o Rychlost letu
 - Kvalita pořízených fotografií
 - Rychlost snímání senzoru
 - Bezpečnost s ohledem na manévrování
 - Vertikální překrytí fotek
 - o Překryv rovnoběžných linií
 - Horizontální překrytí fotek
 - Hustota snímání a letová doba
 - o Přehledové snímání
 - Snímání z větší než požadované vzdálenosti pro získání globálního pohledu
 - Mapové snímání shora

Pořízení materiálu

- Příprava k provedení letu
 - o Kontrola požadavků letového prostoru
 - Zakázané zóny
 - Hustě obydlené oblasti
 - Infrastruktura (silnice, železnice, elektrické vedení, ochranná pásma vodních zdrojů, CHKO a NP)
 - Koordinace s pilotovaným provozem (oblast letišť)
 - AIS View
 - o Získání povolení pro let mimo oblasti bez nutnosti povolení
 - Stanovení dopadových ploch a omezení letu
 - Příklad omezení letů na vertikální bez horizontálního pohybu
 - Další bezpečnostní opatření (zábor, zastavení provozu, koordinace s PČR)
 - Získání povolení vlastníků dotčených staveb
 - o Plánování letu
 - Meteorologická situace
 - Světelné podmínky
 - Provedení letu
 - o Předletová příprava
 - Umístění a zaměření georeferencovaných vlícovacích bodů
 - Umístění dalších vlícovacích bodů pro zaměření skutečných rozměrů
 - Zaměření signifikantních prvků
 - Plánování jednotlivých letů s ohledem na aktuální podmínky v místě
 - o Provedení letu
 - Automatický let
 - Manuální let
 - o Poletové úkony
 - Kontrola získaných dat
 - Zálohování získaných dat
 - Doplnění chybějících nebo poškozených dat
 - Provedení dalšího pozemního snímání pomocí kvalitnějšího senzoru
 - Úklid a balení (checklist)

Zpracování materiálu

Prezentace výsledků a jejich uložení

VII. 2. Případové studie

Naše exteriérové dokumentační práce pomocí UAV byly prováděny s cílem zaznamenat souvislé plochy vnějšího pláště historických objektů, a to za účelem komplexnějšího zkoumání a vyhodnocení jejich stavu. Vždy se nám rovněž jednalo o sestavení 3D modelu celé památky, nebo její části. V rámci prezentovaných případových studií nebyla prováděna cílená dokumentace jednotlivých prvků, jelikož z pohledu použité technologie je navádění na konkrétní předdefinované místo součástí řešeného problému zaznamenávání souvislého celku. Z pohledu metodologie se tedy nejedná o specifický problém.



Obrázek 009: Snímání jižní fasády kostela sv. Mořice v Olomouci.

VII. 2. 1. Kostel sv. Mořice v Olomouci

Chrám sv. Mořice v Olomouci⁶⁴ jsme se rozhodli zdokumentovat proto, že patří mezi nejvýznamnější pozdně gotické stavby naší země, jde o národní kulturní památku a zároveň se jedná o jeden z dvojice stěžejních objektů našeho projektu. Svatomořický kostel, budovaný v rozpětí let 1412-1540, je trojlodní orientovaná stavba s asymetrickým dvouvěžovým západním průčelím a trojitým polygonálním presbytářem na východě.

64 Prohlášen od 15. 11. 1995 Národní kulturní památkou Nařízením vlády č. 262/1995 Sb. Rejst. č. 224 – Kostel sv. Mořice v Olomouci. Zapsán jako kulturní památka dne 3. 5. 1958, rejst. č. 13663/8-3660. Odkaz do Památkového katalogu: <https://pamatkovykatalog.cz/kostel-sv-morice-12628015>.



Obrázek 010: Chrám sv. Mořice v Olomouci.

Naším cílem bylo zdokumentovat aktuální stav chrámu před nadcházející rozsáhlou památkovou obnovou. V rámci exteriéru jsme zvolili jižní fasádu z toho důvodu, že kvůli legislativním a provozním podmínkám nebylo možné nasnímat jiné části vnějšího pláště.

Zároveň však tato partie nesla signifikantní prvky poškození a degradace omítkových vrstev i kamene, tudíž lokální míru poškození bylo možné s menší odchylkou vztáhnout i na stavbu celou. Z podrobné dokumentace fasády pomocí UAV, sahající od boku jižní věže až po zalomené stěny polygonálního kněžiště, byl prostřednictvím metody fotogrammetrie vytvořen 3D model, ve kterém je možné si v plné plasticitě prohlédnout architektonické a tektonické členění stavby, včetně jejího vnějšího opěrného systému a výzdobných prvků.⁶⁵ Zároveň byla jižní fasáda nasnímana ve vysokém rozlišení, což přineslo cenné informace restaurátorům před odborným zásahem.

Pomocí dronu jsme provedli inspekci stavu vrcholových partií kamenné architektonické výzdoby (kytky, krabi, římsy, okenní kružby), abychom v případě zjištění jejich havarijního stavu – tzn. nesoudržnosti s povrchem (například z důvodu koroze čepu) – mohli dát podnět k částečnému snesení inkriminovaných prvků.

Realizace dokumentačních prací na jižní fasádě chrámu sv. Mořice pomocí bezpilotní helikoptéry obnášela administraci povolení Úřadu pro civilní letectví pro pohyb dronu nad obydlenou oblastí, která byla vymezena na konkrétní časový a územní rozsah. S tím souviselo získání písemného souhlasu s létáním dronu od vlastníků parcel a objektů sousedících s dotčeným pozemkem. V neposlední řadě pak bylo nezbytné vyřídit zábor lokality na stavebním odboru Magistrátu města Olomouce a následně na Městské policii Olomouc.

65 3D model jižní fasády kostela sv. Mořice v Olomouci: <http://mrs.felk.cvut.cz/3d-model-viewer/player/player.html?moric>.

011



012



Obrázek 011, 012: Z dronu pořízené záběry poškozené novogotické kytky na opěrném pilíři jižní fasády kostela sv. Mořice v Olomouci.



Obrázek 013: Chrám sv. Mořice v Olomouci, jižní věž.

VII. 2. 2. Zámek Plumlov

Obdobné byly naše cíle v případě snímání exteriéru barokního zámku Plumlov,⁶⁶ jenž je druhým hlavním projektovým objektem.⁶⁷ Původně královský hrad z druhé půle 13. století, který se vypínal na skalisku nad rovněž starobylým Podhradským rybníkem, postupně přešel do rukou pánů z Kravař, Pernštejnů a následně Liechtensteinů, z nichž kníže Karel Eusebius, velký milovník architektury, zde v roce 1680 započal stavbu nikdy nedokončeného monumentálního sídla.⁶⁸

Dekádu budovaný tzv. *Vysoký zámek* na Plumlově, postavený na prostém obdélném půdorysu a završený sedlovou střechou, působí na návštěvníka svojí polohou a především severním dvorním průčelím, příznačným bohatou štukovou výzdobou a zejména vysokým sloupovým řádem. Mezi sloupy nalezneme třináct okenních os, kde se pravidelně střídají malá okna třech pater pro služebnictvo a zázemí s rozměrnými okny trojice reprezentativních podlaží. Totéž rozvržení se opakuje i na straně jižní, avšak fasádu člení pouze lizény a okenní ostění.

Přestože mnohde po staletí rozpracované interiéry plumlovského zámku jsou nesmírně zajímavým tématem, v rámci výzkumu využití bezpilotních helikoptér v oblasti památkové péče se naše pozornost věnovala vnějšímu plášti budovy, a to pro jeho obtížnou dostupnost, postupující degradaci omítkových vrstev i štukové výzdoby a kvůli finanční náročnosti péče o tento historický objekt, která leží na bedrech městečka Plumlov. Po podrobném nasnímání všech čtyř fasád zámku se přikročilo k vytvoření jeho 3D reprezentace pomocí fotogrammetrie. Tento prostorový model se dále rozpracuje do podoby, která bude zobrazovat historický vývoj barevnosti zámku a reflektovat chemicko-technologické složení jeho omítek na základě odebraných vzorků.⁶⁹

66 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/zamek-se-zriceninou-hradu-538698>.

67 Projektový web s videem: <https://dronument.cz/zaznam/19>.

68 Jan Khündel – Jaroslav Mathon, *Plumlovský zámek a jeho knížecí architekt*, Prostějov 1937. – Alena Prudká, Příspěvek ke stavebnímu vývoji hradu Plumlova (okr. Prostějov). *Vlastivědný věstník moravský* 48, č. 2, 1996, s. 155-161.

69 Tento 3D model, ve formě výsledku Nmap – specializovaná mapa s odborným obsahem, bude hotový v polovině roku 2022.



Obrázek 014: Jižní průčelí zámku Plumlov – tzv. Vysoký zámek; zamýšlené jižní křídlo původně plánované čtyřkřídle dispozice

VII. 2. 3. Mauzoleum rodu Kleinů v Sobotíně

K nasnímání exteriéru mauzolea rodu Kleinů v Sobotíně⁷⁰ na Šumpersku se přikročilo z toho důvodu, že se jedná o cennou novorenesanční architekturu, stavební památku na místní podnikatelskou rodinu a její ocelářské impérium.⁷¹

Mauzoleum bylo postaveno v letech 1881-1887 dle návrhu vídeňského architekta Wenzela S. Baumheyera. Masivní, žulou opláštěná podesta čtvercového půdorysu, jež v sobě skrývá samotnou hrobku sobotínské větve Kleinovského rodu, nese menší budovu neorenesanční kaple, která odkazuje k dílu italského renesančního architekta Andrey Palladia.⁷² Její kubická hmota, před kterou předstupují pravoúhlé rizality bočních kaplí, presbytáře a vstupní sloupový portikus, přechází ve válcový tambur završený kupolí s lucernou. Pískovcovou fasádu člení pilastry s korintskými hlavicemi, které opakují plastický dekor sloupů portiku. Společně pak vynášejí průběžné kladí s konzolovou římsou, nad níž se na rizalitech zvedají trojúhelné štítové nástavce.

Obec Sobotín dle svých možností zchátralé a vandalsky poškozené mauzoleum i s přilehlým parkem postupně obnovuje. Naše dokumentace pomocí UAV měla za úkol zachytit aktuální stav vnějšího pláště budovy a z tohoto fotografického materiálu vytvořit 3D model,⁷³ který by pomohl propagaci a sbírání finančních prostředků na záchranu této vynikající architektury.

70 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/mauzoleum-rodiny-kleinu-535402>.

71 Drahomír Polách, Palladiovské mauzoleum rodiny Kleinů v Sobotíně na Šumpersku, *Zprávy památkové péče*, roč. 63, č. 3, Praha 2003, s. 156-159. – Lukáš Beran – Vladislava Valchařová – Jan Zikmund, *Industriální topografie / Olomoucký kraj, průmyslová architektura a technické stavby*, Praha 2013, s. 63-64, 214-215, 225.

72 Pavel Zatloukal, Šumperská architektura let 1850-1950, *Severní Morava*, Svazek 50, Šumperk 1985, s. 17. Vedle Palladia, jeho Villy Capra a kostela Il Redentore, jež zmiňuje prof. Zatloukal, lze snad rovněž uvažovat nad možným vlivem Antonia da Sangallo st., konkrétně jeho architektury chrámu San Biagio v toskánském Montepulcianu.

73 3D model zde: <http://mrs.felk.cvut.cz/3d-model-viewer/player/player.html?sobotin>.



Obrázek 015: Mauzoleum rodiny Kleinů v Sobotíně
na Šumpersku.

VIII. Metodika snímání interiéru

VIII. 1. Postup práce

Postup dokumentace památkově a umělecky cenných interiérů pomocí autonomního letu bezpilotní helikoptéry byl naším týmem zpracován už v rámci projektového výstupu památkový postup (Npam), který se konkrétně věnoval našim pracím v poutním chrámu sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě u Města Libavá.⁷⁴ Tato podkapitola z uvedeného památkového postupu přímo vychází, jelikož předem definovaný autonomní let je nejbezpečnější a tudíž v rámci projektu finální metodou dokumentace interiérů historických objektů pomocí bezpilotních helikoptér.⁷⁵

Postup práce v rámci snímání interiérů lze rozdělit do třech základních fází — fáze získávání dat a plánování dokumentačních misí, samotná aplikace systému bezpilotních helikoptér v prostředí historických objektů a závěrečná fáze zpracování získaných dat a jejich zprostředkování zadavateli.

VIII. 1. 1. Skenování interiéru

První částí prací předcházející samotné dokumentaci interiéru pomocí bezpilotních helikoptér je získání 3D reprezentace prostředí, která je následně využita pro lokalizaci bezpilotní helikoptéry v prostředí i pro výběr snímaných prvků a plánování dokumentačních misí. Nezbytným vstupem využitých metod pro vytvoření 3D reprezentace prostředí jsou 3D skeny prostředí skládající se z mráčka bodů a panoramatických fotografií. Pro jejich pořízení je možné využít libovolný pozemní skener (například přístroj Leica BLK 360 viz. Obrázek 016) případně totální stanici, která disponuje funkcí pro skenování interiéru. Nevýhodou práce s totální stanicí je však výrazně vyšší časová náročnost celého procesu skenování. Alternativou k pozemním skenerům jsou mobilní skenery, které proces skenování zpravidla urychlují jelikož umožňují kontinuální skenování při pohybu skeneru prostředím, nicméně dosahují výrazně nižší přesnosti pořízených skenů.

Proces skenování interiéru vyžaduje souvislou práci jedné osoby, která přemísťuje skener v rámci objektu a spouští skenovací proces. Doba pořízení jednoho skenu je závislá na požadovaném rozlišení a kvalitě panoramatických snímků a liší se i v závislosti na použitém skeneru. V případě skeneru Leica BLK 360 trvá pořízení skenu s nejvyšším rozlišením a nejvyšší kvalitou fotografií 370 sekund. Výběr míst v prostředí, z kterých jsou jednotlivé skeny pořizovány je nutné realizovat tak, aby se sousedící skeny překrývaly a bylo je možné zarovnat za účelem vytvoření mráčka bodů reprezentující celý objekt. Aby byla výsledná reprezentace prostředí co nejvěrohodnější, je

⁷⁴ Michaela Čadilová – Milan Škobrtal – Vít Krátký – Pavel Petráček – Tomáš Vítek – Kamila Davidová, Památkový postup. *Průzkum umělecko-historicky hodnotných interiérů za pomoci autonomního letu bezpilotní helikoptéry*, 2021, pouze elektronicky: https://dronument.cz/sites/default/files/uploaded/npam_dronument.pdf.

⁷⁵ Recentně shrnuto v článku: Vít Krátký – Pavel Petráček – Tiago Nascimento – Michaela Čadilová – Milan Škobrtal – Pavel Stoudek – Martin Saska, Safe Documentation of Historical Monuments by an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle, *International Journal of Geo-Information*, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021, 10(11), 738, EISSN 2220-9964, elektronicky: [doi:10.3390/ijgi10110738](https://doi.org/10.3390/ijgi10110738).

potřeba dosáhnout co největšího pokrytí prostředí. Tedy aby každá část prostředí byla zachycena na minimálně jednom skenu. Vhodným výběrem umístění skeneru je možné minimalizovat počet skenů, které je nutné pořídit a tím i zkrátit celý proces skenování. K vhodnému výběru míst pracovníkům napomáhá představivost a zkušenosti s procesem skenování. Kromě těchto předpokladů lze v případě některých skenerů využít i aplikací (např. Field 360 od Leica), které umožňují zarovnávání pořízených skenů v průběhu skenování a zobrazení doposud naskenovaných částí interiéru. Tímto způsobem lze přesně lokalizovat dosud nepokrytá místa a zvolit ideální umístění skeneru pro další sken.

Pro potřeby autonomního letu bezpilotní helikoptéry je postačující sken s velmi nízkým rozlišením (20 mm na vzdálenost 10 m v případě Leica BLK 360) bez nutnosti pořizovat panoramatický snímek. Zhotovit takový sken trvá pouze několik desítek sekund. Nicméně vzhledem k tomu, že výsledný 3D model prostředí je používán i k výběru dokumentačních cílů, v jiných oblastech památkové

péče, restaurátorských průzkumech, případně i k popularizaci památek, je vhodné pořizovat skeny v maximálním možném rozlišení (5 mm na vzdálenost 10 metrů v případě Leica BLK 360) včetně pořízení panoramatických fotografií doplňující skeny o barevnou informaci, umožňující širší využití 3D dokumentace. Celková doba skenování jednoho objektu silně závisí na jeho rozlehlosti a komplexitě, která výrazně ovlivňuje požadovaný počet skenů k pokrytí celého objektu. Počet skenů se zpravidla pohybuje od 10 skenů pro malé objekty bez četných zákoutí a bohaté výzdoby až po 50 skenů pro rozsáhlé objekty s bohatou výzdobou a vysokou členitostí interiéru. Při uvažované době trvání jednoho skenu 370 sekund se celková doba skenování pohybuje přibližně od 2 do 8 hodin. Tento čas zahrnuje nejen samotné pořizování skenů, ale i přesouvání a umísťování skeneru na požadovaná místa a obsluhu skeneru zahrnující výměnu baterií a další nezbytné úkony.



Obrázek 016: Skener Leica BLK 360 využití pro skenování interiéru kostel sv. Mořice v Olomouci.

VIII. 1. 2. Sestavení 3D modelu

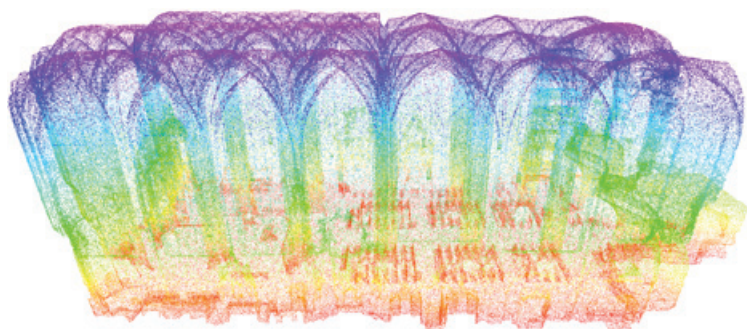
Druhým krokem úvodní fáze procesu skenování historických objektů je využití pořízených skenů k vytvoření reprezentace snímaného prostředí. Úvodním krokem tohoto procesu je import veškerých skenů do počítačového programu (např. Leica Cyclone Register pro skenery od firmy Leica), který umožňuje jejich vzájemné zarovnání a vytvoření kompletního mračna bodů reprezentujícího celé prostředí a odstranění všech nežádoucích bodů, které nejsou statickou součástí objektu (např. dočasné lešení, osoby apod.). Toto mračno je poté exportováno v různých formátech vhodných pro jednotlivé účely v popisovaném procesu.

První, jednodušší reprezentací prostředí, je samotné mračno bodů (Obrázek 017), které je v rámci autonomního letu využíváno pro počáteční určení pozice a orientace bezpilotní helikoptéry v souřadném systému objektu – dále kvůli apriorní znalosti překážek v prostředí, využívána v rámci bezpečnostních mechanismů helikoptéry – stejně jako pro naplánování vlastní bezkolizní cesty, která je sledována během autonomní dokumentační mise. Pro tyto účely je vhodné využít redukované mračno bodů s prostorovým rozlišením 10 cm, které je dostačující pro všechny

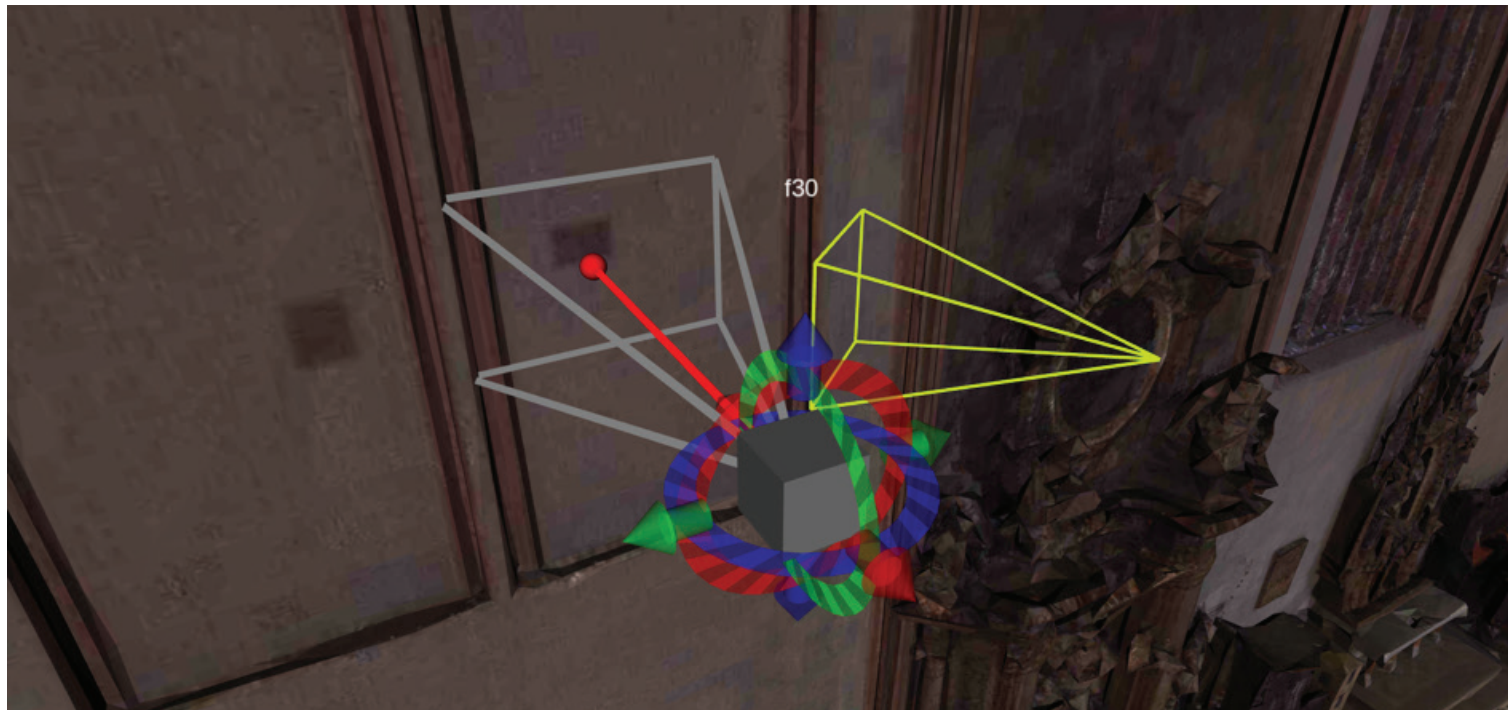
uvedené záměry a zároveň redukuje počet bodů a tím snižuje výpočetní náročnost všech metod, které s mračnem pracují. Tento fakt je podstatný především v případě metod, které jsou spuštěny během letu na palubním počítači s limitovaným výpočetním výkonem. Časová náročnost zjednodušení mračna bodů a jeho vygenerování závisí na použitém programu. V případě využití programu Leica Cyclone Register je časová náročnost tohoto procesu přibližně 10 minut.

Druhou reprezentací prostředí, kterou je pro realizaci celého procesu nutné vygenerovat je 3D model prostředí s barevnou texturou (Obrázek 017). Tento model je využíván primárně k definování pozic, ze kterých mají být pořízeny požadované snímky jednotlivých objektů zájmu ve snímaném prostředí. Samotný 3D model je tvořen množinou polygonů, které jsou opatřeny barevnou texturou vytvořenou z pořízených panoramatických fotografií. Vzhledem k tomu, že snímané prvky jsou často planární, není možné k tomuto účelu využít jednobarevný geometrický model, jelikož by dané prvky nebylo možné v takovém modelu přesně lokalizovat. Pro vytvoření 3D

modelu je možné využít celou řadu programů, které se liší množstvím funkcí, které nabízejí i pořizovací cenou. Jedním z vhodných programů, které poskytují potřebné funkce pro vytvoření modelu je program MeshLab, jehož využití není zpoplatněno. Vytváření modelu s texturou je časově náročný proces, který má vysoké nároky na použitou výpočetní techniku. Náročnost procesu závisí nejen na velikosti objektu, ale i na požadované kvalitě výsledného geometrického modelu i na požadovaném rozlišení barevné textury. Pro výběr a přesné určení pozice dokumentovaných prvků bylo dostatečné kvality dosaženo při velikosti geometrického modelu pohybující se v řádech statisíců polygonů a rozlišení textury přibližně 8000x8000 pixelů pro rozlehlejší objekty. Doba zpracování jednotlivých modelů se liší v závislosti na kvalitě pořízených skenů, rozlehlosti a členitosti objektu a pohybuje se přibližně od 4 do 20 hodin, z čehož zhruba polovina času je tvořena prací zkušeného grafika a druhá polovina výpočetním časem nutným ke zpracování modelu bez nutnosti zásahu grafika.



Obrázek 017: Ilustrace 3D reprezentací prostředí kostela sv. Mořice v Olomouci využívaných v rámci navržené metodiky - mračno bodů (vlevo) a 3D model s barevnou texturou (vpravo).



Obrázek 018: Záběr z programu využívaného pro specifikaci dokumentovaných prvků.

VIII. 1. 3. Naplánování autonomní mise

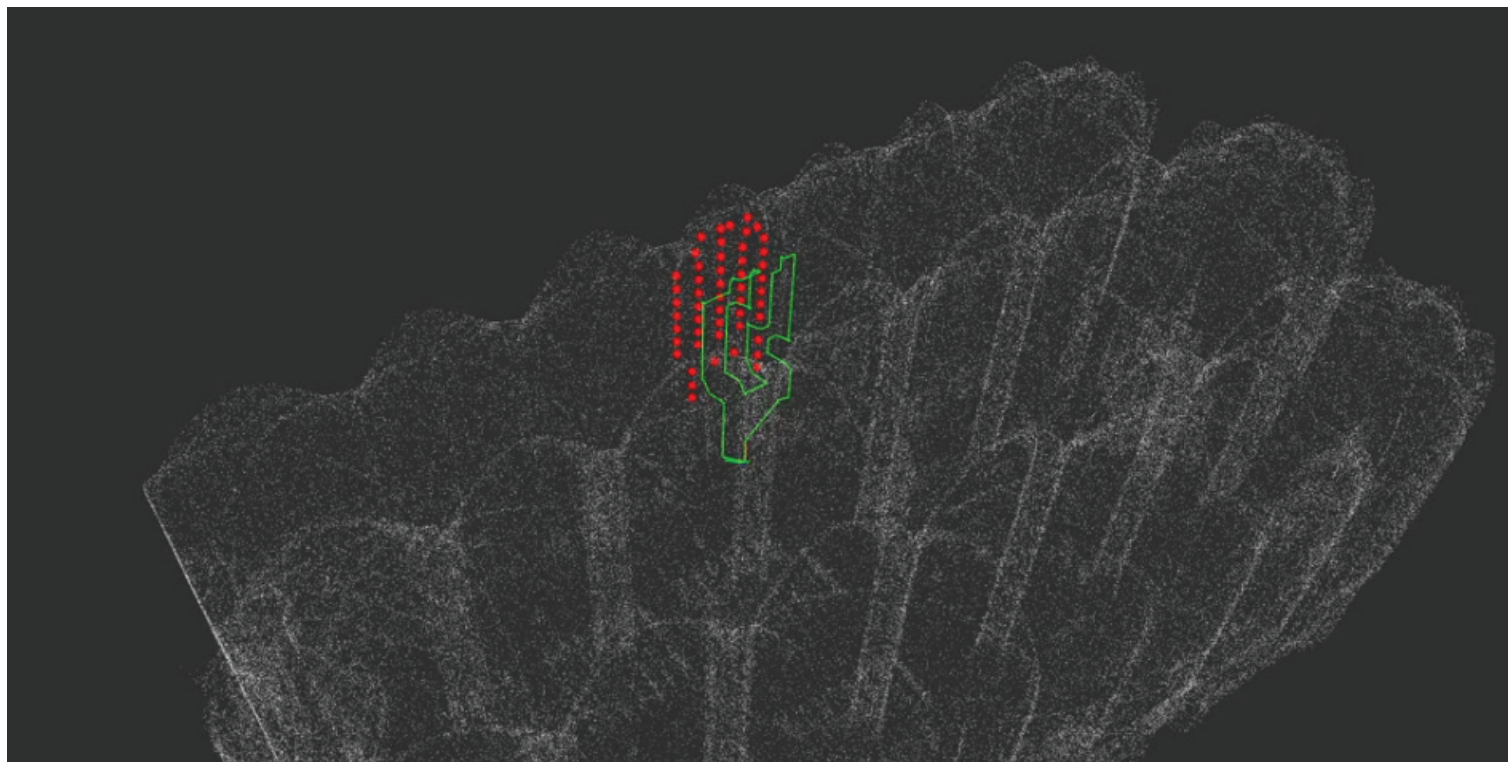
Poslední částí fáze předcházející samotnému nasazení systému v rámci historického objektu je výběr dokumentovaných prvků v rámci konkrétního objektu, výběr dokumentačních technik, které mají být realizovány a naplánování autonomních dokumentačních misí. Specifikace dokumentovaných prvků probíhá s využitím programu, vyvinutého v rámci našeho projektu, který umožňuje upravování pozice a orientace virtuálního modelu kamery ve zhotoveném 3D modelu prostředí a ukládání těchto pozic. Virtuálnímu modelu je možné nastavit parametry odpovídající kameře použité v rámci samotných dokumentačních misí. Vizualizace modelu v podobě zorného pole (FoV) poté přesně odpovídá reálné kameře, což umožňuje velmi přesné pozicování modelu tak, aby záběr odpovídal požadovanému snímku. Změnou orientace kamery je poté možné specifikovat i požadovaný záběr z nadhledu či podhledu. Nad rámec základních funkcí disponuje program i funkcionalitou pro interpolaci mezi dvojicí pozic a generování

množiny pozic pokrývajících záběry určitou část prostoru. Tyto funkce jsou užitečné především pro generování pozic za účelem snímání větších ploch a vytváření fotomap. Kromě specifikace pozic kamery program rovněž umožňuje přidávat k jednotlivým snímkům i požadované osvětlení definované úhlem vůči optické ose kamery a vzdáleností od snímávaného objektu (Obrázek 018).

Množina pozic vygenerovaná na základě požadovaných snímků definovaných odpovědnou osobou z řad restaurátorů, památkářů či vlastníků dokumentovaných objektů, je základním vstupem algoritmu pro plánování bezkolizních trajektorií. Vzhledem k omezenému letovému času bezpilotních helikoptér a zpravidla vysokému počtu požadovaných objektů, které mají být nasnímány, není možné realizovat nasnímání všech požadovaných fotografií v rámci jednoho letu. Z toho důvodu je proces generování plánů rozdělen do několika kroků. V prvním kroku je nalezena sekvence navštívených bodů minimalizující součet

Euklidovských vzdáleností mezi dvojicemi po sobě jdoucích pozic. Tento problém je řešen uplatněním Lin-Kernighan heuristiky původně navržené pro řešení problému obchodního cestujícího. V druhém kroku jsou poté naplánovány bezkolizní cesty modelem prostředí propojující optimální sekvenci pozic. Následně je tato cesta a s ní i sekvence pozic rozdělena na několik částí, které je možné jednotlivě navštívit během jednoho letu. Takto je vytvořena množina plánů, která zajišťuje navštívení všech požadovaných pozic a s tím související pořízení všech požadovaných snímků. Součástí vygenerovaných plánů je i zastavení v jednotlivých pozicích určených pro fotografování, čímž je možné dosáhnout předdefinované pozice s vyšší přesností než v případě pouhého průletu touto pozicí bez zastavení.

Naplánované cesty poté podléhají verifikaci, jejímž cílem je ověření jejich bezkoliznosti. V první fázi je cesta vizualizována ve vytvořeném 3D modelu a odborníci zhodnotí její bezkoliznost (Obrázek 018). Závěrečná verifikace poté probíhá v simulátoru, ve kterém je simulována celá mise v dříve vytvořeném modelu prostředí. V rámci využitého simulátoru jsou realisticky simulovány veškeré senzory a algoritmy (včetně chyb a nepřesností), které jsou nasazeny na reálné helikoptěře.



Obrázek 019: Verifikace plánu pomocí vizualizace v modelu 3D prostředí reprezentovaného mračnem bodů.

VIII. 1. 4. Dokumentování vybraných prvků za pomoci autonomního letu bezpilotní helikoptéry

Realizace samotného procesu dokumentace vybraných prvků v historických objektech závisí na konkrétních použitých dokumentačních technikách. V rámci projektu byly implementovány a otestovány následující techniky:

- 1) fotografování ve viditelném spektru
- 2) fotografování ve viditelném spektru s využitím přisvětlování
- 3) metoda Reflectance Transformation Imaging (RTI)
- 4) UV a IR fluorescenční reflektografie
- 5) metoda ostrého bočního světla

Tyto techniky je dále možné dělit dle počtu bezpilotních helikoptér, který je potřeba pro jejich realizaci. Přestože se realizace technik vyžadující více helikoptér mírně liší od technik uplatňující pouze jednu helikoptéru, většina prvků je společná pro obě skupiny. Z toho důvodu je v rámci této metodiky nejdříve popsán přístup k technikám realizovatelným s využitím jedné helikoptéry a následně jsou popsány odlišnosti související s nasazením více helikoptér.

V rámci návrhu a ověřování metodiky byla využívána bezpilotní vícerotorová helikoptéra, která byla vyvinuta v rámci projektu⁷⁶ (Obrázek 019). Obecně lze využít i jakoukoliv vícerotorovou helikoptéru splňující požadované vlastnosti a funkce. Využitá helikoptéra musí být schopna vlastní lokalizace v interiérech budov, bezpečné autonomní navigace v prostředí mezi jednotlivými cíli, musí být vybavena zařízením pro snímání požadovaných dat včetně možnosti ovládání zařízení prostřednictvím palubního počítače a musí být vybavena senzory a mechanismy pro detekci překážek a ochrany proti kolizím. V rámci zmíněných vlastností a funkcí je velmi důležitá rovněž kvalita vlastností a poskytovaných funkcí, jelikož nedostatečně kvalitní lokalizace či neschopnost přesně navigovat na požadovanou pozici může vést k nižší kvalitě získaných dat i k výraznému snížení bezpečnosti a spolehlivosti využitého systému.

Nejrozšířenější a nejvyužívanější technikou dokumentace historických objektů je fotografování ve viditelném spektru. Pro realizaci této techniky pomocí jedné bezpilotní helikoptéry jsou využity dříve naplánované a verifikované mise. Po přesunu bezpilotní helikoptéry do objektu určeného pro realizaci dokumentačních technik, je nutné provést sekvenci úkonů zajišťujících vyšší bezpečnost autonomního letu helikoptéry. Konkrétně se jedná o kalibraci senzorů obsažených v IMU jednotce základní řídicí jednotky Pixhawk, následné osazení helikoptéry vrtulemi a kontrola všech HW částí helikoptéry včetně kontroly připojení všech senzorů a dalších nezbytných prvků.

⁷⁶ Vít Krátký – Pavel Petráček – Pavel Stoudek – Martin Saska, *Systém senzoricky vybavené helikoptéry s mechanismem pro bezpečný let v úloze autonomní dokumentace interiérů historických budov*, Funkční vzorek, 2021, https://www.dronument.cz/sites/default/files/uploaded/technicka_dokumentace_dronument.pdf.



Obrázek 020: Bezpilotní vícerotorová helikoptéra navržena pro dokumentaci interiérů historických budov.

Následně je proveden krátký kontrolní manuální let ověřující správnost provedené kalibrace a upevnění všech částí helikoptéry. Dalším nezbytným úkonem před prvním autonomním letem je ověření, že v prostředí, které bylo dříve naskenováno pomocí pozemního 3D skeneru nedošlo z geometrického hlediska k výrazným změnám, které by mohly ovlivnit dokumentační bezkolizní plány vygenerované s využitím vytvořeného 3D modelu. Přestože je helikoptéra vybavena senzory pro detekci překážek a HW i SW mechanismy pro zabránění kolizím, vyhýbání se překážkám může negativně ovlivnit požadované výstupy, jelikož některé z vybraných pozic pro pořízení fotografií nemusí být helikoptérou v pozměněném prostředí dosažitelné. Z toho důvodu je vhodné předdefinovat dotčené pozice tak, aby byly dosažitelné, případně upravit prostředí tak, aby odpovídalo stavu v době skenování. Ačkoliv tento krok by obecně mohl být náročný, mezi nejčastější změny v prostředí historických budov patří vytažení či spuštění závěsných lustrů nebo změna pozice snadno přemístitelných objektů jako jsou obrazy na stojanech. Úprava prostředí je tedy v těchto případech smysluplným požadavkem. Poslední úkon předcházející vlastnímu nasazení bezpilotní helikoptéry, rovněž související s interakcí s prostředím, spočívá v zajištění všech lehkých předmětů, které by mohly být ohroženy vzdušným proudem generovaným při letu helikoptéry (např. ubrusy, lehké koberce, květinová výzdoba apod.).

Po vykonání všech uvedených činností je možné přistoupit k fázi autonomního dokumentačního letu. Ten začíná výběrem jednoho z dokumentačních plánů určeného k realizaci v daném objektu. Následně je prostřednictvím vizualizace s tímto plánem seznámen bezpečnostní pilot helikoptéry, který monitoruje let helikoptéry

a může v případě neočekávaného chování zastavit vykonávání mise, případně zcela převzít řízení helikoptéry. Na základě této vizualizace je rovněž v objektu vybráno místo, které není příliš daleko od počáteční pozice plánu a umožňuje bezpečný vzlet helikoptéry. Toto místo musí splňovat požadavek na dostatečnou vzdálenost od překážek ve všech směrech a zároveň se musí jednat o plochu s nulovým či velmi malým sklonem. Přestože je možné vzletět i na výrazně menší ploše, za zcela bezpečnou plochu lze považovat kruh o poloměru 1,2 metru. V případě menších ploch bezpečnost vzletu výrazně záleží na charakteru okolních překážek. Následně jsou na základě vybrané mise nastaveny požadované parametry focení na palubní kameře, helikoptéra je vybavena nabitými bateriemi a umístěna na vybrané místo startu.

Po zapojení baterií, zapnutí palubního počítače, palubní kamery a příslušného stabilizačního zařízení je helikoptéra připravena k provedení dokumentační mise. Spuštění celého systému umožňujícího bezpečnou autonomní lokalizaci a navigaci prostředím a řízení palubní kamery je zajištěno zavoláním jediného příkazu na palubním počítači helikoptéry. O úspěšném spuštění všech nezbytných částí systému informuje helikoptéra změnou barvy indikační světelné diody umístěné v zadní části helikoptéry. V případě potřeby získat podrobnější informace o stavu helikoptéry je možné realizovat vzdálené připojení na palubní počítač a zobrazení podrobnější diagnostiky systému. Poté co je helikoptéra připravena k letu je operátorem verifikována transformace ze souřadného systému helikoptéry do souřadného systému modelu prostředí a bezkoliznost plánu transformovaného do souřadného systému helikoptéry vůči modelu prostředí. Dokumentační mise je následně zahájena bezpečnostním pilotem, který přepnutím páčky na rádiové vysílačce předá kontrolu nad helikoptérou systému spuštěnému na palubním počítači, který sám misi zahájí a vykoná všechny kroky potřebné k jejímu úspěšnému provedení.

Samotná mise je složena z několika fází — vzlet, navigace na počáteční pozici dokumentačního plánu, sledování naplánované cesty se zastaveními v předdefinovaných pozicích, ve kterých jsou pořízeny fotografie, let zpět na místo startu a přistání. Během všech těchto fází je chování helikoptéry monitorováno jak bezpečnostním pilotem, tak operátorem mise, který může prostřednictvím bezdrátového spojení s palubním počítačem přistupovat k palubním datům helikoptéry. Díky tomu může zprostředkovat informaci o vzdálenosti od překážek, stavu vykonávání mise či plánovaném směru pohybu bezpečnostnímu pilotovi, který tak může rychleji zareagovat na případné nežádoucí chování. Kromě interpretace palubních dat má operátor rovněž možnost zastavit vykonávání mise, restartovat misi či zaslat požadavek na okamžitý návrat zpět na startovní pozici. Operátor má dále přístup i k obrazu z palubní kamery (Obrázek 021) a může tak kontrolovat, zda pořizované snímky odpovídají požadavkům a v případě nesrovnalostí přerušit či ukončit dokumentační misi. Po přistání helikoptéry na místě startu, bezpečnostní pilot odebere palubnímu počítači kontrolu nad helikoptérou a odpojí motory od napájení. Následně jsou odpojeny baterie a mise je ukončena. V případě pochybností o správném



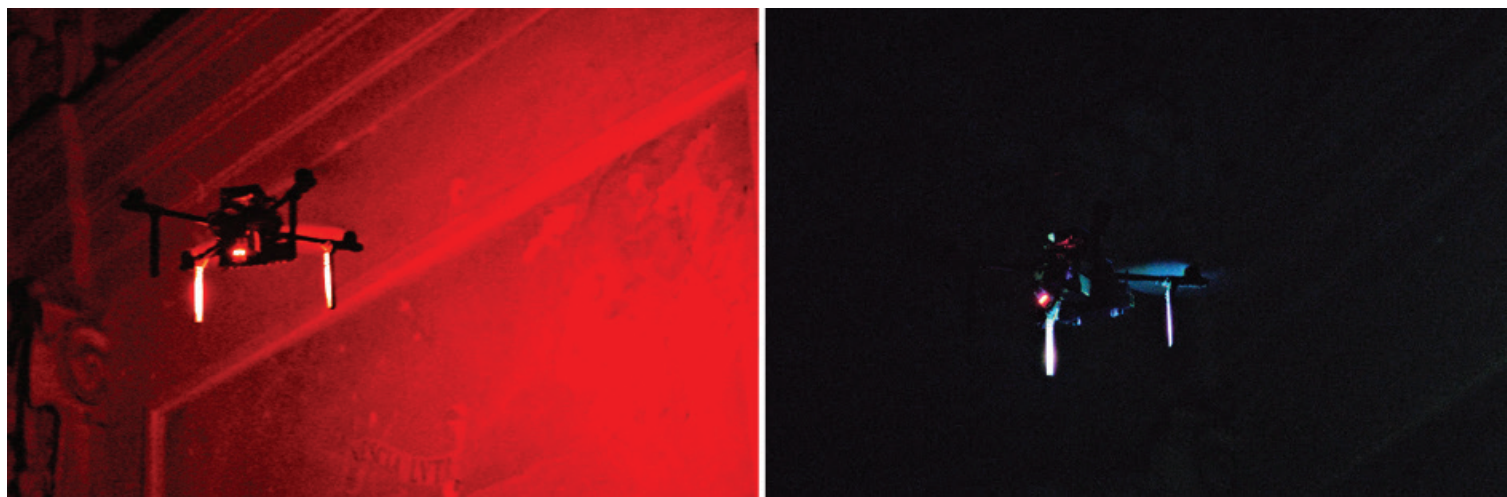
Obrázek 021: Obrázek z palubní kamery přenášený pomocí analogového vysílače na monitor operátora.

nastavení parametrů fotografování je možné zkontrolovat pořízené fotografie a případně zopakovat misi s upraveným nastavením fotoaparátu. Pokud je vše v pořádku, je možné popsaný postup opakovat na dalších dokumentačních plánech.

Přestože popisované kroky nasazení bezpilotní helikoptéry pro dokumentaci interiérů historických budov vyžadují dva pracovníky, k obsluze celého systému stačí i jediná osoba jelikož v případě bezproblémové funkce systému je role bezpečnostního pilota omezena pouze na přepínání páčky pro zahájení a ukončení mise. Nicméně vzhledem k vysoké hodnotě prostředí, pro který je popisovaný systém navržen, je smysluplné maximalizovat snahu o zvýšení bezpečnosti. Z tohoto důvodu se jeví jako vhodné využít bezpečnostního pilota jako záložní možnosti řízení helikoptéry nezávislé na palubním počítači a většině palubních senzorů. Celý systém může být rovněž využíván bez přítomnosti zkušeného operátora. Nicméně i tento přístup vede ke zpravidla nežádoucímu snížení bezpečnosti celého systému.

Obdobným způsobem jako snímání ve viditelném spektru lze realizovat i snímání v UV a IR spektru. Z hlediska snímacího zařízení

nedochází téměř k žádné změně, jelikož je zpravidla využit fotoaparát s upravenými UV a IR filtry. Významnými změnami jsou pouze požadavky na velmi slabé (ideálně žádné) světelné zdroje kromě zdroje o požadované frekvenci záření a delší expoziční čas potřebný k pořízení fotografie. První požadavek implikuje let za minimálního osvětlení, které znemožňuje manuální řízení helikoptéry. Vzhledem k tomu, že navržená helikoptéra je plně autonomní a pro svou lokalizaci nevyužívá metody závislé na osvětlení okolního prostředí, je schopna plnit svou funkci i při naprosté absenci okolního osvětlení. Druhý požadavek bohužel při aktuálním stavu použité technologie činí UV a IR reflektografii nevyužitelnou v případě umístění fotoaparátu na rám helikoptéry, jelikož tyto metody vyžadují expoziční časy v řádech desítek sekund. V rámci takto dlouhého času se již výrazně projeví posun fotoaparátu umístěného na rámu helikoptéry vůči snímanému objektu na kvalitě fotografií, které nedosahují požadované ostroty. Snímání v UV a IR spektru s pomocí bezpilotních helikoptér je tedy smysluplné pouze v režimu, kdy je fotoaparát umístěn na stativu



Obrázek 022: Realizace IR a UV reflektografie s využitím přisvěcování bezpilotní helikoptérou.

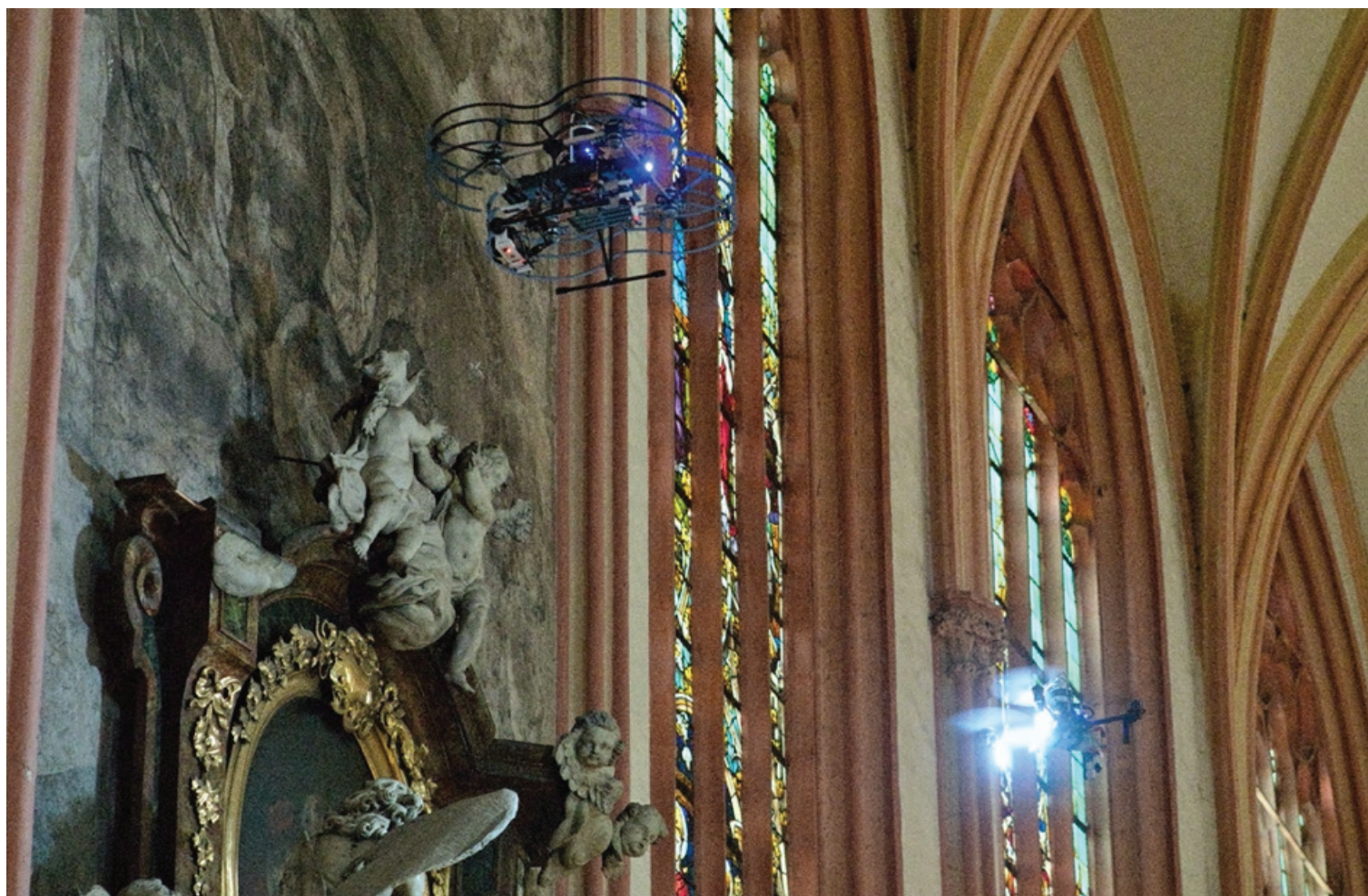
a helikoptéra je vybavena zdrojem světla o požadované frekvenci (Obrázek 021). Tímto způsobem je možné dosáhnout úhlů osvětlení, které jsou jinak složitě realizovatelné. Další výhodou tohoto přístupu je i možnost použití slabšího zdroje záření díky jeho možnému umístění blíže ke snímanému objektu.

Další metodou snímání, která již vyžaduje minimálně dvě helikoptéry, je snímání ve viditelném spektru s přisvěcováním. Interiéry historických objektů jsou pro účely pořizování dokumentace často nedostatečně osvětlené což snižuje kvalitu pořízených fotografií. V případě fotoaparátu umístěného na rámu helikoptéry nelze nedostatečné osvětlení kompenzovat navyšováním expozičního času, jelikož i v případě, že je helikoptéra stabilizovaná neustále dochází k pomalým posunům v rámci prostředí (obvykle v řádech jednotek centimetrů), které v případě delších expozičních časů způsobují nižší ostrot fotografie. Z tohoto důvodu je často nutné využít externího zdroje světla. Tento zdroj může být připevněn na rám helikoptéry nesoucí kameru. Nicméně takový přístup má svá omezení z hlediska intenzity použitého světla a úhlu světla vůči

optické ose kamery. V případě, že snímáný objekt má být osvětlen z jiného směru, než je směr totožný s optickou osou kamery, je nutné využít druhou helikoptéru jako nosič světla (Obrázek 023). Tento přístup umožňuje osvětlení snímaného objektu pod libovolným úhlem a zároveň i využití výrazně výkonnějšího zdroje světla, jelikož helikoptéra nesoucí kameru je vybavena velkým množstvím zařízení potřebných pro stabilizaci a ovládání kamery, jejichž přítomnost limituje velikost efektivní hmotnostní zátěže (tedy dokumentační techniky).

K dosažení co nejdelších expozičních časů při zachování ostroty fotografie je využito několik prvků. Prvním z nich jsou mechanické tlumící prvky (v našem případě Silentblok S2010 B) zamezující přenosu vibrací z rámu helikoptéry na fotoaparát. Pro další zamezení přenosu pohybu helikoptéry na snímací prvek je využito dvouosé stabilizační zařízení (rOsewhite Dragon Brushless Gimbal) kompenzující náklony helikoptéry. Oba tyto prvky pomáhají kompenzovat pohyb helikoptéry v krátkém čase a tím umožňují využití delších expozičních časů. Nicméně, tímto způsobem není možné dosáhnout nulového posunu snímacího zařízení vůči snímanému objektu v řádu sekund. Pro tento účel by musela být helikoptéra vybavena tříosým stabilizačním zařízením umožňujícím kompenzaci translačního pohybu helikoptéry. Předpokládaná hmotnost tohoto zařízení pro běžně využívané senzory s váhou dosahující až 500 gramů výrazně přesahuje nosnost navržené helikoptéry. Použití tohoto zařízení by tedy vyžadovalo využití helikoptéry větších rozměrů, což je v rozporu s hlavními cíli projektu. Jelikož veškerá stabilizační zařízení používají princip zpětné vazby a kompenzují detekovaný pohyb helikoptéry, absolutního zamezení

Obrázek 023: Realizace snímání ve viditelném spektru s využitím přisvěcování pomocí bezpilotní helikoptéry v kostele sv. Mořice v Olomouci. Předmětem dokumentace je nástěnná malba sv. Kryštofa se sv. Sebaldem a sv. Vavřincem z roku 1505.



pohybu kamery nelze dosáhnout. V kontextu tohoto odstavce za nulový posun považujeme posun kamery, který není rozpoznatelný ve výsledné fotografii.

Požadavky na helikoptéru nesoucí světlo jsou z hlediska HW i SW podobné požadavkům na hlavní helikoptéru. Nejvýraznějším rozdílem je absence kamery a zařízení pro její stabilizaci, ovládání a přenos obrazu což umožňuje zvolit pro účely přisvětlování rozměrově menší platformu. Příprava helikoptéry zajišťující přisvětlování je totožná s přípravou hlavní helikoptéry. Největší změny s sebou tedy přináší využití dvou kooperujících helikoptér ve stejný čas ve sdíleném prostoru. Koordinace helikoptér je řešena na úrovni softwaru a spoléhá na výměnu dat mezi jednotlivými helikoptéry prostřednictvím bezdrátové sítě. Helikoptéra nesoucí kameru je v rámci této úlohy považována za hlavní helikoptéru ve formaci a požadovaná pozice helikoptéry zajišťující přisvětlování je odvozena od trajektorie hlavní helikoptéry, pozice snímaného objektu a parametrů požadovaného osvětlení. Přestože je kooperace závislá na komunikaci, navržený systém obsahuje mechanismy pro kontrolu probíhající komunikace a v případě jejího výpadku pozastaví misi. Využitý systém pro řízení formace helikoptér je blíže popsán v publikaci.⁷⁷ Z pohledu obsluhy systému využití více kooperujících helikoptér vyžaduje navíc pouze bezpečnostního pilota pro každou helikoptéru. Navržený systém je obecně nezávislý na počtu použitých helikoptér a umožňuje tedy

⁷⁷ Martin Saska – Vít Krátký – Vojtěch Spurný – Tomáš Báča, Documentation of dark areas of large historical buildings by a formation of unmanned aerial vehicles using model predictive control, in: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2017, s. 1-8.



využití libovolného počtu přisvětlovacích helikoptér. Limitujícím prvkem je zde tedy především prostor, který je sdílen helikoptéry, které pro sebe vzájemně představují dynamické překážky a zmenšují tak svůj operační prostor. V případě nasazení velkého počtu helikoptér tak nutně dochází ke snížení vzájemných vzdáleností a tedy i ke zvýšení pravděpodobnosti kolize. Na základě zkušeností lze považovat dvě přisvětlovací helikoptéry za maximální rozumný počet. Stejným způsobem jako metodu snímání s přisvětlováním je možné realizovat i UV a IR fluorescenční reflektografii, která se z hlediska provedení liší pouze použitým světlem a požadavkem na nižší úroveň okolního osvětlení.

Speciální dokumentační technikou, kterou je možné efektivně realizovat pomocí bezpilotních helikoptér je metoda "Reflectance Transformation Imaging" vyžadující snímání objektu osvětlovaného z různých úhlů. Na základě takto pořízených fotografií je poté možné rekonstruovat obraz objektu pod libovolným osvětlením. Snímání množiny fotografií pro tuto metodu lze realizovat ve dvou režimech. První možností je plně robotický přístup, který je zjednodušenou variantou snímání s přisvětlováním, jelikož helikoptéry se společně přesouvají na místo snímání, následně se ale pohybuje pouze helikoptéra nesoucí světlo, zatímco helikoptéra nesoucí kameru setrvává na stejné pozici (Obrázek 024). Pozice světla, které je nutné znát pro výpočet vektoru osvětlení pro jednotlivé fotografie, jsou určeny na základě lokalizace helikoptéry v prostředí a známé pozice osvětlovaného objektu. Výhodou tohoto přístupu je možnost aplikace RTI metody v prostorách, které jsou jinak složitě dosažitelné. Nevýhodou je nutnost kompenzace pohybu kamery, která by v ideálním případě měla být statická po celou dobu snímání. Nedostatečně kvalitní kompenzace může snižovat ostrost výsledné reprezentace obrázku. Alternativou k tomuto přístupu je umístění kamery na stativ a využití pouze jedné helikoptéry coby nosiče světla. V tomto případě není potřeba kompenzovat pohyb kamery, nicméně pozice kamery je omezená na člověkem dosažitelnou část prostředí.

Poslední realizovanou metodou za pomoci bezpilotních helikoptér je metoda razantního bočního osvětlení. Tuto metodu

Obrázek 025: Specializovaná platforma pro realizaci metody razantního bočního osvětlení.



lze považovat za speciální případ snímání s přisvěcováním, které zpravidla vyžaduje let velmi blízko k objektu. K tomuto účelu byla vyvinuta speciální platforma (Obrázek 025), která je vybavena systémem umožňujícím stabilizaci v přímém kontaktu se stěnou či jiným objektem. Problémem tohoto přístupu je, že vyžaduje fyzickou interakci s objektem. Tento postup je tedy aplikovatelný v objektech, u kterých je znám jejich stav, nicméně v případě objektů, u kterých není stav znám by nasazení tohoto systému mohlo vést k narušení povrchových vrstev stěn objektu.

VIII. 1. 5. Výstupy

Poslední fází procesu dokumentace historických objektů je zpracování nasnímaných dat a jejich předání zadavateli dokumentačních prací. V případě 3D modelu vygenerovaného z nasnímaných skenů prostředí jsou nejčastěji používané formáty „ply“, „obj“, „glb“. Všechny tyto formáty lze otevřít ve většině programů určených pro práci s 3D modely včetně volně dostupného programu MeshLab. Většina z těchto programů rovněž umožňuje konverzi mezi uvedenými formáty. V případě fotografií pořízených pomocí palubního fotoaparátu jsou základním formátem výstupu surové raw fotografie, které je možné dále upravovat v závislosti na cílovém využití. Větší úsilí vyžaduje zpracování fotografií pořízených v rámci realizace metody RTI. Tyto fotografie je nutné nejprve zarovnat pro kompenzaci posunu fotoaparátu mezi pořízením jednotlivých snímků a dále vypočítat koeficienty bikvadratické funkce reprezentující intenzitu jednotlivých pixelů v závislosti na vektoru osvětlení. Pro tento účel lze využít volně dostupný program pro tvorbu polynomiálních texturových map (PTM), jehož vstupem je množina fotografií s přiřazenými vektory osvětlení, vypočítanými na základě znalosti času kdy byla fotografie pořízena a pozice helikoptéry nesoucí světlo známé díky algoritmům poskytujícím informaci o pozici helikoptéry na základě zarovnávání skenů z palubních senzorů. Výsledná mapa je poté vygenerována ve formátu „ptm“ a je možné ji zobrazit například pomocí volně dostupného programu PTMViewer od společnosti Cultural Heritage Imaging.

Vygenerovaná a zpracovaná data jsou následně poskytnuta vlastníkům či správcům historických objektů. Jejich nejčastější využití je při monitorování stavu kulturních památek, rovněž slouží jako podklad pro zhotovení restaurátorského záměru a plánování odborného zásahu, nebo pro prezentaci objektu veřejnosti za účelem popularizace či sbírání finančních prostředků na památkovou obnovu. Pořízený 3D model objektu a mračno bodů je případně možné využít i pro zaměřování konkrétních prvků v objektu.

VIII. 2. Případové studie

Metoda snímání interiérů pomocí autonomně se pohybující bezpilotní helikoptéry se osvědčuje jako univerzálně použitelná pro všechny typy prostor, ať už se jedná o rozlehlý sál či menší kapli.⁷⁸ Princip je vždy stejný, pomocí pozemního skeneru se získají data pro zhotovení 3D reprezentace prostorů, v níž se na základě výběru a definování interiérových prvků určených k snímání následně naplánuje bezkolizní cesta propojující všechny požadované pozice.⁷⁹ Tato cesta je poté realizovaná najednou či na několik etap v případě, že čas nutný k jejímu proletění převyšuje maximální letový čas helikoptéry na jednu sadu baterií.

Příprava na akci ze strany pracovníka památkové péče, restaurátora apod. je v zásadě totožná jako u jiných dokumentačních prací. Seznámení se s objektem a jeho stavební historií prostřednictvím literatury či pramenů je doprovázeno poznáním místa in situ. Zjištění jeho problematických prvků vyplývá z vlastní empirie, z kontaktu s vlastníkem či správcem památky. Po případném zjištění těžce dokumentovatelných partií interiéru se přikročí k realizaci jeho naskenování, což je ideální příležitost pro bližší ohledání stavby a prověření našeho záměru i dalších eventuálních prvků zájmu. Tato aktivita pak přináší operátorovi a bezpečnostnímu pilotovi preciznější specifikaci požadavků na záběry z bezpilotní helikoptéry – například na jejich šíři, detailnost, úhel snímání či zjištění, že může být pro dokumentaci daného prvku vhodná fotomapa. Tím se zajistí lepší spolupráce uvnitř týmu i kvalitnější výstupy v podobě fotodokumentace.

⁷⁸ V rámci našeho výzkumu byly vedle níže uvedených památek dokumentovány i následující objekty: Rondel na státním hradu a zámku Jindřichův Hradec, pohřební kaple Všech Svatých na zámku v Telči, kostel sv. Františka Xaverského v Uherském Hradišti, kostel Nanebevzetí Panny Marie v Cholině, kostel sv. Barbory v Šumperku, kostel sv. Bartoloměje v Zábřehu, kostel Nejsvětější Trojice v Kopřivné, kostel Povýšení sv. Kříže v Prostějově, kostel Narození Panny Marie v Novém Malíně, kostel Zvěstování Panny Marie ve Šternberku a kostel sv. Máří Magdalény v Chlumině.

⁷⁹ Jediným významnější rizikem při aplikaci metody autonomního letu se zdá být možný výskyt překážek v prostoru, které laserový skener není schopen s dostatečnou jistotou zaznamenat pro 3D model, v němž se má napláňovat operační let dronu. Těmito bezpečnostně problémovými prvky jsou nejčastěji řetězy a šňůry závěsných lustrů. Eliminace takové rizika je pak závislá na pozemní posádce UAV.

VIII. 2. 1. Kostel sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě u Města Libavá

Poutě do Staré Vody se konaly už v dobách pozdního středověku a místo dlouhodobě poutalo pozornost olomouckých biskupů, kteří jej podporovali. Současná stavba svatostánku vznikla převážně z peněz poutníků mezi lety 1681-1689, a to z iniciativy Karla II. Liechtenstein-Castelcornu, který na budování reprezentativního chrámu dohlížel s důkladností a energií sobě vlastní.⁸⁰ Architektonickým návrhem byl pověřen císařský stavitel Giovanni Pietro Tencalla, kamenické a snad i sochařské práce zhotovil Andrea Aglio, štukovou výzdobu Matteo Rezzi a pravděpodobně Baldassare Fontana, výmalbu vytvořil Giovanni Carlone – umělci z italsky hovořící oblasti Ticino ve švýcarském pohraničí.⁸¹ Krátce po dokončení hlavních částí poutního areálu byla jeho správa svěřena do rukou řádu piaristů, kteří zde působili až do dvacátých let 20. století. Po skončení druhé světové války došlo k odsunu zdejšího německého obyvatelstva, načež

80 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/kostel-sv-jakuba-vetsiho-a-sv-anny-535370>.

81 Jana Zapletalová – Rostislav Švácha, Poutní kostel sv. Jakuba Většího a sv. Anny ve Staré Vodě, 1680-1690, in: Rostislav Švácha – Martina Potůčková – Jiří Kroupa (eds.), *Karel z Lichtensteinu-Castelcornu (1624-1695). Místa biskupovy paměti*, Olomouc 2019, s. 393-417. – Jana Zapletalová, Malíř Giovanni Carlone na Moravě, *Umění LXIII*, 2015, s. 289-306. – Jana Zapletalová, Obraz římského malíře Luigiho Garziho pro kostel ve Staré Vodě, in: *Opuscula Historiae Artium*, č. 1, 2016, s. 56-63.



Obrázek 026: Poutní chrám sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě u Města Libavá

se v oblasti zřídil vojenský újezd Libavá, cvičiště československé a následně i sovětské armády, ze kterého zmizely původní vesnice i s historickými památkami.⁸²

Stejně tak byla zničena i Stará Voda (Altwasser), pouze poutní chrám zůstal zachován, i když silně poškozený dělostřelbou a vandalstvím. Neblaze se zde projevilo zatékání dešťové vody do objektu, kdy opadaly rozsáhlé plochy malířsky pojednaných omítek i štukové výzdoby. Zbylé partie jsou značně poznamenány nápisy v azbuce a střelbou, nejčastěji do hlav zobrazených postav. V posledních dekádách je chrám postupně obnovován místním skautským združením, německými rodáky, Městem Libavá a okrašlovacím spolkem Lubavia.⁸³

Z důvodu vysoké umělecké úrovně stavby, jejího poškození a snah o záchranu jsme se v rámci projektu na místo opakovaně vraceli za účelem zdokonalování naší dokumentační metody, provádění testů UV a IR fluorescenční reflektografie a RTI (viz výše, kap. VIII. 1. 4.). Hlavním cílem však bylo zachytit novým pohledem fragmenty původní kvalitní výzdoby vysoké osmiboké lodi, která v minulosti silně utrpěla.⁸⁴ Podařilo se pořídit kvalitní fotografie vegetabilně-figurální štukové složky, která přibližuje její strukturální složení restaurátorům. Snímky

82 Jan Bombera – Gabriela Elblová – Slavomíra Kašpárková – Jana Krejčová – Irena Peřinová-Kubešová – Helena Richterová, Poutní místo Stará Voda, Olomouc 1997, s. 10-17. – Dagmar Lepíková, *Giovanni Pietro Tencalla. Kostel sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě na Libavě. Výstavba, devastace a znovuobnovení* (diplomová práce), Ústav dějin křesťanského umění, KTF UK, Praha 2009.

83 Lubavia: <https://www.lubavia.cz/obce/stara-voda-altwasser-15v>.

84 A to palubním fotoaparátem Sony Alpha A6500.



Obrázek 027: Poutní chrám sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě, Zvěstování



Obrázek 028: Nástěnná malba Alegorie Afriky, detail, záběr z projektové oktokopty.

zachycující nástěnné malby Alegorií světadílů přinášejí poznání o změně barevnosti použitého pigmentu.

Záběry mariánsko-christologického cyklu v lunetových výsečích pod klenbou zaznamenaly jednu z nejvíce zatékáním poškozených částí malířské výzdoby. Stav dochování čtveřice výjevů se pohybuje od naprosté ztráty omítkových a barevných vrstev, přes partie s patrnou změnou barevnosti pigmentu, až po místa téměř intaktně dochovaná. Díky snímání pomocí autonomního letu bezpilotní helikoptéry se podařilo blíže rozpoznat figury výjevu Zvěstování Panny Marie a následně se snad podařilo identifikovat předlohu malby.⁸⁵

85 Hypotetickou předlohou, jejíž kompozici by nepochybně musela zprostředkovat reprodukce (grafika), může představovat olejomalba na plátně z let 1709-1710 z ruky Louise de Boullogne ml., jež se nachází ve sbírkách zámku ve Versailles. Pro obě kompozice je příznačné rozvržení andělů nad postavou Panny Marie a kompozice napůl ležícího anděla, eventuálně Ježíška, nad figurou Archanděla Gabriela. Mohlo by se jednat o neobvyklý motiv vtělení Krista do jeho neposkvrněné matky Marie.

VIII. 2. 2. Kostel sv. Mořice v Olomouci

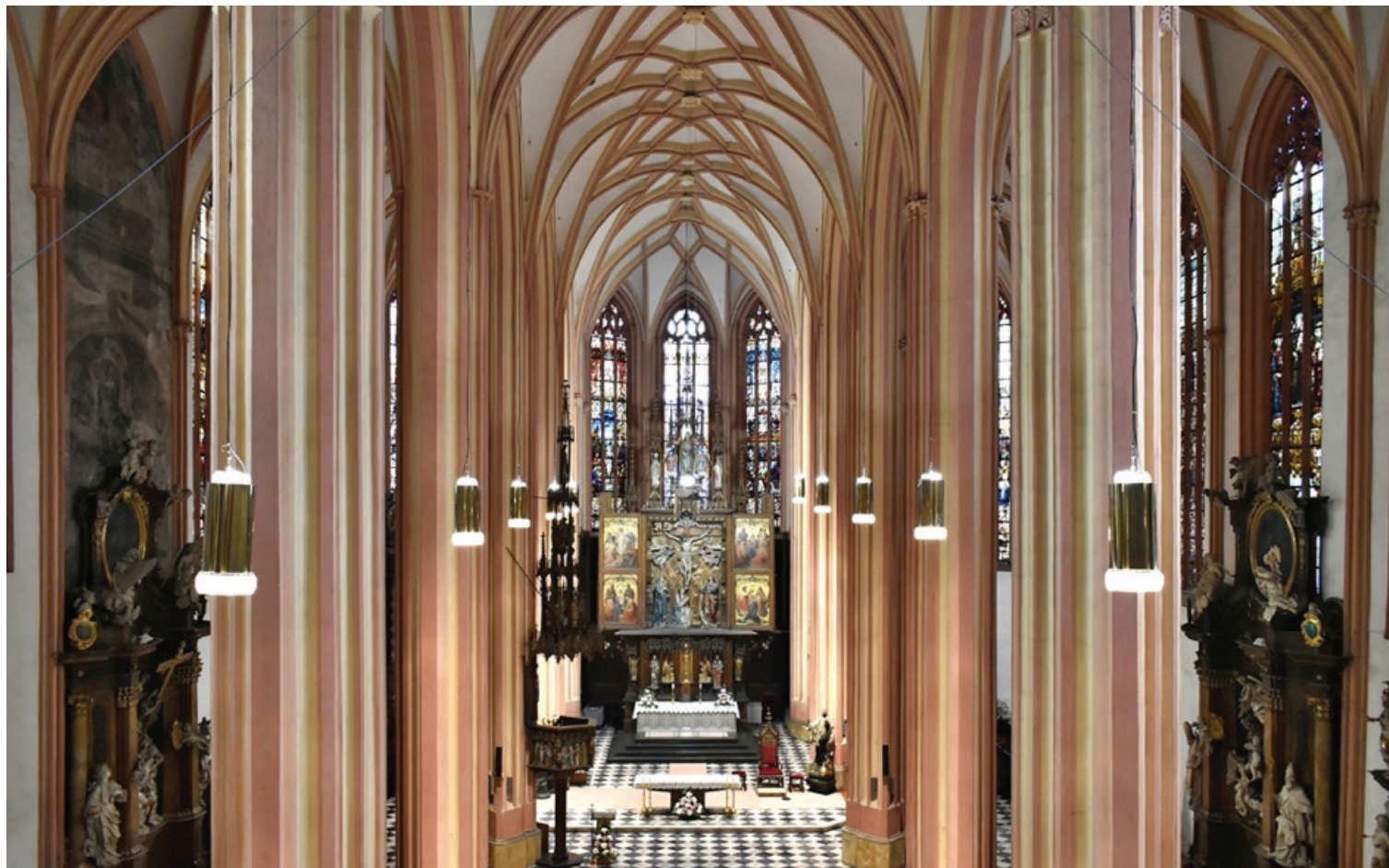
Jak už bylo uvedeno výše, v kapitole o snímání exteriérů budov, byl chrám sv. Mořice v Olomouci⁸⁶ zařazen do našeho výzkumného projektu jako jeden z dvojice hlavních objektů zájmu a jeho interiér jsme zpracovali v rámci hlavního výstupu specializovaná mapa s odborným obsahem (Nmap) – Interaktivní 3D model interiéru kostela sv. Mořice s odborným komentářem.⁸⁷

Svatomořické halové trojlodí bylo budováno po etapách v rozpětí let 1412-1540, a to v místě staršího chrámu z 13. století. K završení lodí křížovými klenbami došlo k roku 1443, kněžiště se skládá z trojice pětibokých závěrů, jejichž síťové klenby jsou na jednom z klenáků datovány rokem 1483. Po přelomu století pak došlo k adaptaci západní části trojlodí, které bylo opatřeno krouženými klenbami, v průčelí vznikl reprezentativní západní portál a vedle něj neobyčejné dvojité vřetenové schodiště. Výstavba hlavního městského chrámu nejprve postupovala pod vlivem pražského prostředí, následně se však progresivní architektonické dění přeneslo do rakouského Podunají, odkud zejména prostřednictvím vídeňské svatoštěpánské huti zasahovalo i Moravu.⁸⁸

86 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/kostel-sv-morice-12628015>.

87 Viz pozn. 22, interaktivní 3D model dostupný zde: http://mrs.felk.cvut.cz/3d-model-viewer/player/player.html?moric_inside, potažmo zde s průvodní zprávou a tabulkou trojjazyčných anotací: <https://dronument.cz/vystupy>.

88 Zdenka Bláhová, Kostel sv. Mořice, in: Ivo Hlobil – Marek Perůtka (eds.), *Od gotiky*



Obrázek 029: Pohled do trojlodí chrámu sv. Mořice v Olomouci.

Naše pozornost se v rámci interiéru věnovala zejména třiadvaceti novogotickým vitrajím⁸⁹ ve vysokých oknech, které v dohledné době čeká restaurátorský zásah. Pomocí projektové oktokopty se pořídila podrobná fotodokumentace, z níž se sestavily fotomapy jednotlivých oken,⁹⁰ jež je možné prohlížet jako celky, tak i v drobných detailech. Tato metoda přinesla kvalitnější výstupy než soudobý způsob dokumentace ze země, protože zabraňuje ztrátě informací při fotografování z dálky a eliminuje zkreslení vzniklé pohledem (Obrázek 029).⁹¹ Světelné podmínky pro pořízení fotodokumentace v chrámu sv. Mořice obecně nejsou dobré.

Taková situace je však v kostelích spíše pravidlem nežli výjimkou a vznáší zvýšené nároky na kvalitu a parametry fotografické techniky, její adekvátní nastavení (poměr ISO/expoziční čas/clonové číslo) a na stabilizaci dronu, který ji nese. V případě snímání vitrají je v potměšilém interiéru vítaným pomocníkem protisvětlo procházející zvenčí barevnými skly a vykreslující kontury malby.⁹² Můžeme pak pro zvýšení kvality záznamu zvolit nižší hodnotu ISO, vyšší clonové číslo a kratší dobu expozice, což snižuje eventuální přenos vibrací z helikoptéry na fotoaparát na gimbálu.

Fotomapy vitrají a monumentální pozdně gotické nástěnné malby sv. Kryštofa⁹³ byly sestaveny z jednotlivých snímků pořízených za letu projektovou oktokopty.⁹⁴ Postprodukční proces spočíval v selekci snímků vhodných pro spojení v jednu rozměrnou fotografii-fotomapu pomocí programu Adobe Photoshop, načež se přistoupilo k jejich perspektivnímu srovnání. Nato se snímky sloučily do tří až čtyř větších celků, které se v dalším kroku sjednotily v jedinou fotomapu, a to prostřednictvím funkce auto-photomerge. V úhrnu tvoří fotomapy menších vitrají 15-20 snímků, větší cca 30-50 kusů. Poslední fází se stala úprava jasu, barevnosti a ořezání okrajů.⁹⁵

k renesanci, *Výtvarná kultura Moravy a Slezska 1400-1550, III. Olomoucko*, Olomouc 1999, s. 204-208. – Ivo Hlobil – Vladimír Hylík – Milan Togner, Olomouc. *Proboštský farní kostel sv. Mořice*, Olomouc 1992. – Bohumil Zlámal, *Dějiny kostela sv. Mořice v Olomouci*, Olomouc 1939. 89 Markéta Žídková, *Vitrajová okna kostela sv. Mořice v Olomouci* (bakalářská diplomová práce), Katedra dějin umění FFUP, Olomouc 2012. – Markéta Hamzová, *Vitrajová okna kostela sv. Mořice v Olomouci a mnichovská dílna Mayer Kunstanstalt* (magisterská diplomová práce), Katedra dějin umění FFUP, Olomouc 2017. – Pavel Zatloukal, *Meditace o architektuře. Olomouc, Brno, Hradec Králové, 1815-1915, Řevnice 2016*, s. 157-163, 361-373.

90 Projektovou oktokopty se nasnímalý veškeré vitraje v interiéru trojlodí, až na vitraj s námětem Křtu Páně při jižním boku varhanní kruchty, kde již stálo lešení. Z tohoto důvodu byla vitraj klasicky nafocena ze zmíněné konstrukce.

91 Za zhodnocení fotomap vitrají děkujeme restaurátorovi Ing. arch. Janu Černohorskému (Ateliér VITRAJ s.r.o.).

92 Nemělo by však jít o ostrý sluneční svit, který může vytvářet nežádoucí stíny. Ideální je rozptýlené světlo způsobené oblačností, nebo např. okolní zástavbou.

93 Naše fotografie nástěnné malby sv. Kryštofa z počátků projektu – která se pořídila ze země, avšak malba byla osvětlována letícím dronem – byla použita v publikaci: Thomas Bauer – Jörg Lauterbach – Norbert Nußbaum, *Arnold von Westfalen und Benedikt Ried. Innovativer Gewölbebau im Dienst frühneuzeitlicher Fürstenhöfe*, Worms 2021, foto č. 171, s. 112. Zveřejněno v rámci kapitoly o chrámu sv. Mořice a radniční kapli sv. Jeronýma, s. 108-112.

94 Respektive jejím palubním fotoaparátem Sony Alpha A6500 opatřeným objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností f 35 mm (Samyang AF 35 mm f/1,8).

95 Výsledné fotomapy jsou relativně velké soubory (20-100 MB), pro jejich prohlížení v interaktivním 3D modelu na webových stránkách je tedy nutné je dále upravit. Řešení se naskytlo v použití DZI (Deep Zoom Image) formátu, který fotomapu adaptuje na systém mnoha obrázků různých velikostí a úrovní detailu. Snímky vitrají pak lze procházet obdobným způsobem, jako klasické internetové mapy. To umožňuje zachování podrobných detailů a kvality zobrazení vitráží při současném zlepšení responzivity aplikace interaktivního modelu. K prohlížení takto upravených fotografií byla využita knihovna OpenSeadragon.

V případě nástěnné malby sv. Kryštofa, nacházející se v temné části kostela, bylo navíc využito výše popsaného letu ve formaci (viz VIII. 1. 4., Obrázek 019), kdy jeden z dronů posloužil jako nosič LED reflektoru, zatímco druhý snímал osvětlené partie.

Další pozornost jsme v rámci interaktivního 3D modelu interiéru chrámu sv. Mořice věnovali oltářům, malířským a sochařským dílům, takže v souhrnu vzniklo 40 anotací ve třech jazykových mutacích.

Obrázek 030: Porovnání fotomapy poskládané z fotografií z palubní kamery helikoptéry (vlevo) a z fotografií pořízených fotoaparátem umístěným na podlaze na stativu.



VIII. 2. 3. Mauzoleum rodu Kleinů v Sobotíně

Vedle výše zmíněného exteriéru jsme v případě mauzolea ocelářského rodu Kleinů rovněž chtěli zdokumentovat stav vnitřní výzdoby neorenesanční kaple. Stavba je z předešlých dekád poškozena kvůli dlouhodobému zanedbání péče, zejména zatékáním dešťové vody.

Projdeme-li sloupovým portikem do interiéru, ocitneme se v prostoru vycházející z půdorysu kruhu, který je vepsaný do čtvercového obrysu vnějšího pláště. Naproti vstupní předsíni je umístěný pravoúhlý presbytář, na příčné ose se otevírají boční kaple. Vzlínající a zatékající voda notně poškodila mozaikovou podlahu, štukovou i malířskou výzdobu. Pro využití bezpilotní helikoptéry pro dokumentaci v interiéru zde vznikla příležitost v úrovni tamburu pod kupolí, kde se ve vlysu nad korunní římsou fragmentárně dochovala výmalba znázorňující výjevy ze života sv. Vojtěcha (Adalberta) a sv. Amálie od vídeňského malíře Karla Jobsta. Zatékající dešťová voda zde způsobila nevratnou ztrátu spodní části malířských i omítkových vrstev, které se postupně oddělují a opadávají. Tato partie výzdoby je pro fotografování přístupná pouze ze země, a to v poměrně úzkém, vertikálním prostoru, kde není možné od ní získat odstup a zmírnit tak zkreslení vzniklé podhledem. Kvůli malým rozměrům interiéru a dimenzím prvku našeho zájmu, který v pásu opisuje obvod válcového tamburu, se projektová oktokoptéra nepohybovala jako obvykle po složité trajektorii, ale vystoupala do úrovně předmětné výmalby středem svatostánku a víceméně se otáčela na místě kolem své osy za souběžného fotografování. Podařilo se nám takto získat kvalitní snímky zachycující plný rozsah poškození maleb, což napomůže precizněji určit koncepci restaurátorského, respektive konzervačního zásahu.



Obrázek 031: Mauzoleum rodu Kleinů v Sobotíně, detail degradované výmalby se sv. Vojtěchem.

VIII. 2. 4. Sál předků na hradu a zámku Vranov nad Dyjí

Zámek ve Vranově nad Dyjí⁹⁶ se vypíná na skalní ostrožně nad říčním meandrem, v místě románského a později gotického hradu střežícího jižní hranici Moravy. Středověké sídlo roku 1665 z velké části lehlo popelem a pozdější majitelé, rakouský rod Althannů, pak započali adaptaci objektu na reprezentativní barokní rezidenci. Jejím středobodem se stal monumentální Sál předků zabírající samostatnou budovu, jež dominuje celému údolí.⁹⁷ Realizace sálu byla hrabětem Michaellem Janem II. z Althannu svěřena do rukou dvaatřicetiletého architekta Johanna Bernharda Fischera z Erlachu⁹⁸ kolem roku 1688.

Monumentální sál oválného půdorysu završuje sklenutí, kterým pronikají centrické kónické tubusy desatera oválných oken. Pod ústřední malbou s námětem Apoteózy rodu Althannů od Johanna Michaela Rottmayra se mezi jednotlivými okny odehrávají výjevy z antické mytologie a alegorie téhož autora, které se váží ke statuím umístěným v nikách pod nimi. Tyto pískovcové sochy z dílny Tobiasa Krackera zpodobují deset nejvýznamnějších členů rodu, a to od legendárních osobností z dob pozdní antiky a raného středověku až po postavu objednavatele rodové galerie, hraběte

96 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/zamek-vranov-nad-dyji-2151203>.

97 <https://www.zamek-vranov.cz/cs/o-zamku/historie-hradu-a-zamku>, vyhledáno 20. 9. 2021.

98 Biografie J. B. Fischera von Erlach: http://biography.hiu.cas.cz/Personal/index.php/FISCHER_z_Erlachu_Johann_Bernhard_20.7.1656-5.4.1723, vyhledáno 4. 8. 2021.



Obrázek 032: Sál předků na zámku Vranov nad Dyjí.



Obrázek 033: Sál předků na zámku Vranov nad Dyjí, detail praskliny ve zdivu.

Michaela Jana II. Zmíněné meziokenní výjevy oslavují ctnosti, jimiž se tito muži vyznačovali. Nad hlavami jednotlivých Althannů byly ve štuce vyvedeny nápisové kartuše uvádějící jejich jména a zásluhy, jimiž se zapsali do historie. Niky se sochami se střídají s okny a dveřmi, nad nimiž jsou ztvárněny grisaillové malby ilustrující významné události ze života zobrazených mužů. V ostění spodních okenních otvorů byly v nízkém reliéfu vyvedeny štukové emblémy doplňující celkové oslavné vyznění sálu.⁹⁹

Naším týmem zde bylo provedeno snímání horní úrovně nástěnných maleb, a to za účelem zdokumentování jejich aktuálního stavu. Zvláštní pozornost se věnovala poškození, která byla patrná ze země či z fotografií, jež se pořizovaly při první sérii letů. Takové poruchy se pak dokumentovaly znovu, detailněji a cíleně. Zaměřili jsme se na praskliny v omítce, defekty malby projevující se zejména změnou barevnosti a především ztrátou zpráškovatělého pigmentu. Výsledky naší akce slouží jako podklad pro budoucí restaurátorský zásah a jako monitorovací fotodokumentace pro sledování postupu degradačních procesů. V Sále předků však náš tým zároveň prováděl srovnání fotografií z bezpilotní helikoptéry se snímáním z úrovně podlahy. Záběry z projektové oktokopty se kvalitativně vyrovnají dokumentaci ze země při použití stativu a fotoaparátu s objektivem s dostatečně velkou ohniskovou vzdáleností (f 300 mm). Záleží pak tedy na pracovních památkové péče, restaurátorech či na správcích objektu, k jaké dokumentační metodě se v takovém prostoru přikloní. Zaklenutí této prostorné místnosti zde totiž téměř eliminuje vznik zkreslení vlivem podhledu a tudíž nutně nevyžaduje uplatnění dronu, nebo stavbu pomocné pracovní konstrukce.¹⁰⁰

99 Bohumil Samek (ed.), *Sál předků na zámku ve Vranově nad Dyjí*, Brno 2003.

100 Naše vyvinutá metoda je téměř univerzálně použitelná, avšak je vhodné při každé příležitosti zvážit, zda-li nedosáhneme stejných výsledků i v případech, že je v místě např. tribuna či ochoz, ze kterých můžeme předměty zájmu fotografovat.

VIII. 2. 5. Sněmovní sál Arcibiskupského zámku v Kroměříži

Počátky výstavby barokní kroměřížské arcibiskupské rezidence¹⁰¹ spadají do období episkopátu Karla II. z Liechtenstein-Castelcora. Předmětem našeho zájmu zde byla štuková výzdoba Velké jídelny, jak byl původně Sněmovní sál nazýván,¹⁰² která však vznikla až v 70. letech 18. století v rokokovém stylu. Zakázku zadal olomoucký biskup Maxmilián z Hamiltonu vídeňskému štukatérovi Karlu Martinu Kellerovi, který předtím odstranil štuky Baldassara Fontany. Koncepce výzdoby je dílem Kellera a Franze Adolfa z Freethalu, autora výmalby. Štukatura převážně sestává z bohatě profilovaných zlacených rámců doplňovaných florálními ornamenty, hudebními i vědeckými instrumenty a girlandami. Figurální složka je poměrně skromná, zahrnuje pouze několik andělů či géníů, jenž nesou biskupovy insignie a rodový znak.¹⁰³

Vedle plošného snímání nedostupných partií štukové výzdoby byla předmětem naší dokumentace i oválná okna v horní etáži zámecké prostory. Zatímco v případě zaznamenání štukatury se jednalo o poměrně standardní práci palubního fotoaparátu, v případě oken musel být vyřešen problém tmavých snímků. Relativně intenzivní protisvětlo přicházející skrze okno zvnějšku způsobovalo nečitelnost technického stavu okenních rámců, křídel a ostění, protože fotoaparát vyrovnával expozici zvýšením clonového čísla. Postupným testováním

101 Památkový katalog: <https://pamatkovykatalog.cz/arcibiskupsky-zamek-14147650>.

102 Velká jídelna byla přejmenována na Sněmovní sál poté, co se zde v revolučních letech 1848-1849 konal Ústavodárný říšský sněm, jenž byl rozpuštěn až po obsazení Kroměříže vojskem císaře Františka Josefa I.

103 Ladislav Daniel – Marek Perůtka – Milan Togner (eds.), Arcibiskupský zámek & zahrady v Kroměříži, Kroměříž 2009, s. 62-64.



Obrázek 034: Sněmovní sál Arcibiskupského zámku v Kroměříži.



Obrázek 035: Sněmovní sál Arcibiskupského zámku Kroměříž, detail jednoho z horních oválných oken a jeho ostění.

bylo dosaženo adekvátního manuálního nastavení,¹⁰⁴ které sice přinášelo přexponovanou krajinu Podzámecké zahrady v pozadí, avšak umožnilo zjištění technické kondice oken, zvláště jejich spodních částí, kam stéká voda kondenzující na skle.

Bezpečnostní výzvu v sále představovaly křišťálové lustry, jejichž subtilní závěsná lana jsou obtížně zachytitelná pro palubní senzory i pozemní laserový skener. Problém se vyřešil opakovaným prověřením a úpravou letové trajektorie v dostatečné vzdálenosti od lustrů, aby se eventuální kolizi předešlo. Z tohoto důvodu se dvě z osmi oken nedokumentovaly pomocí dronu, ale pouze z úrovně podlahy, jelikož kolem nich neexistoval dostatečně velký prostor pro bezpečný pohyb bezpilotní helikoptéry.

104 Nastavení fotoaparátu: ISO 720, 1/500, f 5.

IX. Přínos projektu – autonomní létání a dokumentace v interiérech historických objektů

Během našeho výzkumu se podařilo odborníkům z FEL ČVUT, za součinnosti s památkáři z NPÚ, ú. o. p. v Olomouci, vyvinout bezpečný systém pro dokumentaci interiérů objektů s památkovou hodnotou pomocí autonomní bezpilotní helikoptéry. Podstatou tohoto úsilí bylo zejména zpřesnění a urychlení procesu fotografické dokumentace uměleckých a řemeslných prvků či statických poruch vnitřních prostor kulturních statků. Na základě pořízeného skenu a následně sestavené 3D reprezentace interiéru je dron schopen nasnímat jak rozsáhlé plochy výzdoby, tak i její jednotlivé detaily. Pořízené fotografie mohou sloužit pro rozličné potřeby oblasti památkové péče – monitoring technického stavu, restaurátorský průzkum, uměleckohistorickou badatelskou činnost i popularizaci památkového objektu. Při všech těchto aktivitách je možné využít výsledky pojednávaného výzkumu.

V úvodu řešení projektu byl otestován manuální, semiautonomní i autonomní mód řízení projektové helikoptéry. Na základě těchto testů bylo experimentálně ověřeno, že nejlepším módem řízení bezpilotní helikoptéry pro dokumentaci historických objektů je autonomní mód. Automatizace celého procesu zvyšuje nejen jeho efektivitu, ale především bezpečnost a navíc umožňuje realizaci fotografické dokumentace v místech, kde by jí nebylo možné s využitím manuálně řízené helikoptéry získat. V případě manuálního letu je pilot limitován vizuálním kontaktem a vlastním subjektivním odhadem vzdálenosti od překážek, který se zhoršuje se vzrůstající vzdáleností helikoptéry od pilota. Zatímco bezpečnostní pilot je schopen převzít řízení a bezpečně sklesat s helikoptérou k zemi, její řízení a navigace pouhých několik metrů od stropu budovy a desítky metrů nad místem, ve kterém se pohybuje pilot, je téměř nemožná. Vizuální odhad je na tuto vzdálenost značně nepřesný a manuální řízení dle dat z palubních senzorů výrazně komplikuje zpoždění přijímaných dat.

V rámci autonomní dokumentační mise je dron naváděn přesně na požadované pozice a zároveň využívá data z palubních senzorů pro zamezení jakýmkoliv kolizím. Tato prevence kolizí je výrazně spolehlivější díky velmi rychlému zpracování a vyhodnocení dat z palubních senzorů (vyhodnocení pomocí palubního počítače trvá přibližně 10 ms, zatímco pilot zareaguje na zobrazená data přibližně 200 ms po jejich zobrazení). Přesné navádění na požadované pozice urychluje proces dokumentace, čímž dále snižuje pravděpodobnost kolize s prostředím.

Ačkoliv se komerčně dostupné drony využívají k fotografování stejně jako k inspekci budov a v posledních letech zaznamenaly výrazný pokrok, systém navržený v rámci projektu vykazuje značné výhody v několika oblastech. Prvním významným přínosem je umožnění automatizace dokumentace historických budov, která výrazně zrychluje celý proces. Druhým signifikantním přínosem je modularita navrženého systému umožňující využití různorodých

senzorů, a tím i většího množství dokumentačních technik využívaných v rámci památkové péče. Množství těchto technik je dále rozšířeno díky možnosti aplikace týmu kooperujících helikoptér, díky čemuž je možné dokumentovat špatně osvětlené prostory interiérů či realizovat vyspělé dokumentační techniky (např. RTI).

Navržená technologie pro pokročilý inovativní modelový průzkum historických interiérů není v současné době dostupná na trhu. Jedná se o prototyp, který byl jedním z dalších hlavních výstupů projektu. Záměrem řešitelů je postoupit tato řešení po skončení projektu komerčním subjektům pro jejich finalizaci a uživatelsky příjemnější minimalizaci celého zařízení. Věříme, že tato cesta vedoucí k rychlejšímu, snazšímu a ekonomičtějšímu dokumentování celku i částí historických objektů je otázkou blízké budoucnosti.

X. Seznam zdrojů a literatury

X. 1. Internetové zdroje

Peter Brunčák – Jana Haličková – Anna Sučíková – Ivica Kravjanská a kol., *Digitálny pamiatkový fond Slovenskej republiky*, 2015, elektronicky: https://itlib.cvtisr.sk/wp-content/uploads/docs/30_digitalny.pdf

Mauro Lo Brutto – Alessandra Garraffa – Paola Meli, UAV Platforms for Cultural Heritage Survey: First Results, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. II-5, 2014. 10.5194/isprsannals-II-5-227-2014, elektronicky: https://www.researchgate.net/publication/263409166_UAV_Platforms_for_Cultural_Heritage_Survey_First_Results

Michaela Čadilová – Milan Škobrtal – Vít Krátký – Pavel Petráček – Tomáš Vítek – Kamila Davidová, *Památkový postup. Průzkum umělecko-historicky hodnotných interiérů za pomoci autonomního letu bezpilotní helikoptéry*, 2021, elektronicky: https://dronument.cz/sites/default/files/uploaded/npam_dronument.pdf

Emanuel Demetrescu – Daniele Ferdani – Nicoló Dell'Unto – Anne-Marie Leander Touati – Stefan Lindgren, Reconstructing the original splendour of House of Caecilius Iucundus. A complete methodology for virtual archaeology aimed at digital exhibition, *SCIRES it*, č. 1, 2016, s. 51-66. Elektronicky: <http://www.sciresit.it/article/viewFile/12009/11022>

Martin Gajda, *Metodologie archeologické prospekce a exkavace: workshop I – prospekce. Letecká archeologie*, studijní materiály FF AEA, MUNI Brno 2015, elektronicky: https://is.muni.cz/el/phil/podzim2015/AEA_73/um/Letecka_archeologie.pdf

Petr Gláser, *Stanovení ekonomické náročnosti restaurátorského zásahu*, 2016, elektronicky: <https://invenio.nusl.cz/record/261493/files/content.csg.pdf>

Norman Hallermann – Guido Morghenthal, *Vision-based monitoring of heritage monuments – Unmanned Aerial Systems (UAS) for detailed inspection and high-accurate survey of structures*, Conference: Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture - STREMAH 2015, At: A Coruna, 2015, elektronicky: https://www.researchgate.net/publication/281460456_Vision-based_monitoring_of_heritage_monuments_-_Unmanned_Aerial_Systems_UAS_for_detailed_inspection_and_high-accurate_survey_of_structures

Vít Krátký – Pavel Petráček – Tiago Nascimento – Michaela Čadilová – Milan Škobrtal – Pavel Stoudek – Martin Saska, Safe Documentation of Historical Monuments by an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle, *International Journal of Geo-Information, ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021, 10(11), 738, EISSN 2220-9964, elektronicky: [doi:10.3390/ijgi10110738](https://doi.org/10.3390/ijgi10110738)

Vít Krátký – Pavel Petráček – Pavel Stoudek – Martin Saska,

Systém senzoricky vybavené helikoptéry s mechanismem pro bezpečný let v úloze autonomní dokumentace interiérů historických budov, Funkční vzorek, 2021, elektronicky: https://www.dronument.cz/sites/default/files/uploaded/technicka_dokumentace_dronument.pdf

Thomas Luhmann – Maria Chizhova – Denys Gorkovchuk, Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia, *Drones* 2020, 4, 53; [doi:10.3390/drones4030053](https://doi.org/10.3390/drones4030053), elektronicky: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/3/53>

Paul Sestras – Sanda Roșca – Ștefan Bilașco – Sanda Naș – Stefan M Buru – Leontina Kovacs – Velibor Spalević – Adriana F Sestras, Feasibility Assessments Using Unmanned Aerial Vehicle Technology in Heritage Buildings: Rehabilitation-Restoration, Spatial Analysis and Tourism Potential Analysis, in: *Sensors* 20, no. 7: 2054. (<https://doi.org/10.3390/s20072054>), elektronicky: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7180607/>

Jiří Šíma, *Terminologický výkladový slovník pro potřeby realizace Akčního plánu Strategie rozvoje infrastruktury pro prostorové informace v České republice do roku 2020 verze 4 (01. 12. 2016)*, elektronicky: <https://adoc.pub/verze-4-.html>

Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví: <https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Letecka-doprava/Pravni-predpisy/Konsolidovane-zneni-zakona-c-49-1997-Sb>

<http://droneweb.cz/co-je-dron>

<https://uavalliance.cz/>

www.caa.cz

<https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/drones-information-notice>

<https://dron.caa.cz>

<https://pamatkovykatalog.cz>

<https://dronview.rlp.cz/>

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_destroyed_heritage

<https://fly4future.com/realizations/naki/>

<https://duomo.firenze.it/it/634/virtual-tour>

<http://www.3d-virtualmuseum.it/opere/sardegna-sassari-putifigari-necropoli-monte-siseri-domus-de-janas-di-sincantu>

<https://www.cipaheritagedocumentation.org/about/whatisnipa/>

<https://www.icomos.cz/index.php/en/o-nas>

<https://whc.unesco.org/>

<https://www.npu.cz>

<https://www.mkcr.cz/pamatky-unesco-263.html>

<http://www.opificiodellepietredure.it/>

<https://www.bsr.ac.uk/about>

<https://www.aarome.org/about>

<http://pompeiisites.org/en/>

<https://www.pompejiprojektet.se/index.php#>

<https://www.lunduniversity.lu.se/article/researchers-reconstruct-house-ancient-pompeii-using-3d-technology>

<https://www.isti.cnr.it/en/about>

<https://www.smithsonianmag.com/>

smart-news/take-virtual-tour-these-newly-excavated-pompeian-homes-180974654/

<https://volterra-detroit.org>

<https://www.autodesk.com/>

<https://leica-geosystems.com/>

<https://www.casetech.com/>

<https://italyworldsfairs.org/xml/datapages/basic/99>

<https://www.youtube.com/watch?v=FK07LRay-MI>

<http://chei.ucsd.edu/about/>

<https://www.haltadefinizione.com/en/image-bank/>

<http://boschproject.org/#/>

[http://pano.erlebnisland.de/player/?pano_dir=halberstadt/
dom&startscene=scene dom zu halberstadt&iframe=true&widt
h=90%25&height=90%25](http://pano.erlebnisland.de/player/?pano_dir=halberstadt/dom&startscene=scene_dom_zu_halberstadt&iframe=true&width=90%25&height=90%25)

[https://insideunmannedsystems.com/intel-falcon-8-drone-
used-inspection-15th-century-german-cathedral-artwork/](https://insideunmannedsystems.com/intel-falcon-8-drone-used-inspection-15th-century-german-cathedral-artwork/)

<https://insideunmannedsystems.com>

<https://thebasilica.church/>

[https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/
basilica-drone-laser-images-1.4128989](https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/basilica-drone-laser-images-1.4128989)

<https://www.slovakiana.sk/virtualna-exkurzia/pamiatky>

<http://www.pamiatky.sk/sk/page/digitalny-pamiatkovy-fond>

www.aeromapper.com

<http://heritagestudios.co.uk/>

<https://uavalliance.cz/>

[https://www.zamek-vranov.cz/cs/o-zamku/
historie-hradu-a-zamku](https://www.zamek-vranov.cz/cs/o-zamku/historie-hradu-a-zamku)

[http://biography.hiu.cas.cz/Personal/index.php/
FISCHER z Erlachu Johann Bernhard 20.7.1656-5.4.1723](http://biography.hiu.cas.cz/Personal/index.php/FISCHER_z_Erlachu_Johann_Bernhard_20.7.1656-5.4.1723)

[https://www.researchgate.net/figure/
Illustration-of-camera-lens-field-of-view-FOV_fig4_335011596](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-camera-lens-field-of-view-FOV_fig4_335011596)

<http://mrs.felk.cvut.cz>

<https://dronument.cz/zaznam/19>

<https://www.lubavia.cz/obce/stara-voda-altwasser-15v>

X. 2. Prameny

Markéta Hamzová, *Vitrajová okna kostela sv. Mořice v Olomouci a mnichovská dílna Mayer Kunstanstalt* (magisterská diplomová práce), Katedra dějin umění, FFUP, Olomouc 2017.

Markéta Lacinová, *Bezpilotní létající prostředky při činnosti IZS a legislativní rámec pro jejich použití* (diplomová práce), Fakulta biomedicínského inženýrství Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva, ČVUT, Praha 2016.

Dagmar Lepíková, *Giovanni Pietro Tencalla. Kostel sv. Anny a sv. Jakuba Většího ve Staré Vodě na Libavě. Výstavba, devastace a znovuoobnovení* (diplomová práce), Ústav dějin křesťanského umění, KTF UK, Praha 2009.

Markéta Žídková, *Vitrajová okna kostela sv. Mořice v Olomouci* (bakalářská diplomová práce), Katedra dějin umění, FFUP, Olomouc 2012.

X. 3. Literatura

Thomas Bauer – Jörg Lauterbach – Norbert Nußbaum, *Arnold von Westfalen und Benedikt Ried. Innovativer Gewölbebau im Dienst frühneuzeitlicher Fürstenhöfe*, Worms 2021.

Lukáš Beran – Vladislava Valchařová – Jan Zikmund, *Industriální topografie / Olomoucký kraj, průmyslová architektura a technické stavby*, Praha 2013.

Zdenka Bláhová, *Kostel sv. Mořice*, in: Ivo Hlobil – Marek Perůtka (eds.), *Od gotiky k renesanci, Výtvarná kultura Moravy a Slezska 1400-1550, III. Olomoucko*, Olomouc 1999, s. 204-208.

Jan Bombera – Gabriela Elblová – Slavomíra Kašpárková – Jana Krejčová – Irena Peřinová-Kubešová – Helena Richterová, *Poutní místo Stará Voda*, Olomouc 1997.

Marcel Brejcha – Vladimír Brůna – Zdeněk Marek – Bára Větrovská, *Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek*, Ústí nad Labem 2015.

Ladislav Daniel – Marek Perůtka – Milan Togner (eds.), *Arcibiskupský zámek & zahrady v Kroměříži*, Kroměříž 2009.

Ivo Hlobil – Vladimír Hylík – Milan Togner, Olomouc. *Proboštský farní kostel sv. Mořice*, Olomouc 1992.

Jakub Karas – Tomáš Tichý, *Drony*, Brno 2016.

Jakub Karas, *Drony. Sbírka nejužitečnějších postupů a řešení*, Brno 2017.

Jan Khündel – Jaroslav Mathon, *Plumlovský zámek a jeho knížecí architekt*, Prostějov 1937.

Karel Kuča – Věra Kučová, *Metodika klasifikace staveb podle památkové hodnoty*, Praha 2015.

Marek Novotný, Monitoring stavebních památek pomocí dronu, in: *Torzální architektura. Technologie konzervování, památková obnova*, Praha 2017, s. 59-61.

Ladislav Plánka, Počátky snímkování RC-modely letadel v Československu. In: *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství*, Brno 2014, s. 1, elektronicky: <https://docplayer.cz/9480175-Pocatky-snimkovani-rc-modely-letadel-v-ceskoslovensku-uvod.html>.

Drahomír Polách, Palladiovské mauzoleum rodiny Kleinů v Sobotíně na Šumpersku, *Zprávy památkové péče*, roč. 63, č. 3, Praha 2003, s. 156-159.

Alena Prudká, Příspěvek ke stavebnímu vývoji hradu Plumlova (okr. Prostějov). *Vlastivědný věstník moravský* 48, č. 2, 1996, s. 155-161.

Bohumil Samek (ed.), *Sál předků na zámku ve Vranově nad Dyjí*, Brno 2003.

Martin Saska – Vít Krátký – Vojtěch Spurný – Tomáš Báča, Documentation of dark areas of large historical buildings by a formation of unmanned aerial vehicles using model predictive control, in: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2017, s. 1-8.

Jan Veselý, *Měřická dokumentace historických staveb pro průzkum v památkové péči*, Praha 2014.

Jana Zapletalová, Malíř Giovanni Carlone na Moravě, *Umění LXIII*, 2015, s. 289-306.

Jana Zapletalová, Obraz římského malíře Luigiho Garziho pro kostel ve Staré Vodě, in: *Opuscula Historiae Artium*, č. 1, 2016, s. 56-63.

Jana Zapletalová – Rostislav Švácha, Poutní kostel sv. Jakuba Většího a sv. Anny ve Staré Vodě, 1680-1690, in: Rostislav Švácha – Martina Potůčková – Jiří Kroupa (eds.), *Karel z Lichtensteinu-Castelcora (1624-1695). Místa biskupovy paměti*, Olomouc 2019, s. 393-417.

Pavel Zatloukal, Šumperská architektura let 1850-1950, *Severní Morava*, Svazek 50, Šumperk 1985, s. 14-24.

Pavel Zatloukal, *Meditace o architektuře. Olomouc, Brno, Hradec Králové, 1815-1915*, Řevnice 2016.

Bohumil Zlámal, *Dějiny kostela sv. Mořice v Olomouci*, Olomouc 1939.