

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

PROVOZ BEZPILOTNÍCH LETADEL

PRAKTICKÉ ASPEKTY PROVOZU, PLÁNOVÁNÍ LETU A ZPRACOVÁNÍ DAT

SKRIPTUM

Jan KOMÁREK, Jiří ROUS

2024

Název: Provoz bezpilotních letadel

Podnázev: Praktické aspekty provozu, plánování letu a zpracování dat

Autoři: Ing. Jan Komárek, Ph.D.

komarekjan@fzp.czu.cz

Ing. Jiří Rous

rousjiri@fzp.czu.cz

Recenzenti: doc. Mgr. Jan Kropáček, Ph.D.

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

Ing. David Balhar

Řízení letového provozu ČR, Dronylegalne.cz



The speed at which any given scientific discipline advances will depend on how well its researchers collaborate with one another and with technologists in areas of eScience such as databases, workflow management, visualisation, and cloud-computing technologies.

The Fourth Paradigm book.

Obsah

Obsah.....	7
Seznam běžně využívaných zkratk v letectví.....	10
Předmluva	11
1. Úvod	12
2. Aerodynamika a pohyb letadla	14
Fyzikální podstata pohybu ve vzduchu	14
Osy pohybu – typy rotace UA	17
Směrový pohyb letadel	17
Směrový pohyb více-rotorových letadel	18
3. Technika a její analýza rizik, bezpečnost.....	20
Funkční celky bezpilotního prostředku.....	20
Drak a motorové gondoly	21
Motory a regulátory	21
Vrtule.....	22
Akumulátory.....	22
Řídicí soustava.....	22
Telemetrická soustava	23
Přistávací zařízení.....	23
Další celky bezpilotního prostředku	23
Nabíjecí soustava	24
Subsystem užitečného zatížení	24
Podvěs s užitečným zatížením.....	24
Palubní elektroinstalace	24
Senzorika (J. Rous)	26
RGB senzory	27
Multispektrální senzory.....	27
Hyperspektrální senzory	27
Termální senzory.....	28
Lidarové senzory	28
4. Letecká meteorologie.....	29
Zdroje meteorologických informací.....	31
5. Legislativní rámec provozu.....	33
Kategorie provozu.....	33
Otevřená kategorie	34
Specifická kategorie	36

Certifikovaná kategorie	37
Národní specifika	37
Pohyb v prostoru řízených letišť	38
Členění vzdušného prostoru	38
6. Plánování letové mise	45
Předletová příprava	45
Zásady plánování mise.....	46
Příklady plánování mise (J. Rous).....	49
DJI Pilot 2.....	49
DJI Ground Station Pro.....	50
eMotion.....	51
Pix4DCapture.....	54
Nenadále situace v průběhu letu (J. Rous)	56
Zpřesnění polohy a výšky (J. Rous)	56
DGPS.....	56
RTK	57
PPK	59
7. Náležitosti letové mise, bezpečnostní limity.....	60
Postupy a činnosti.....	60
Seznam minimálního vybavení	61
Zápisy z letu a údržby.....	62
Bezpečnostní limity a povinnosti	63
8. Geometrie snímání.....	65
Projekce, souřadnicové systémy, parametry orientace	65
Vnitřní orientace snímku.....	66
Distorze optického systému	66
Vnější orientace snímku	67
Transformace obrazových souřadnic	69
9. Zpracování dat UAS	71
Identifikace prvků na snímku – SIFT	73
Výpočet parametrů snímků a kamery – SfM	74
Tvorba zahuštěného orientovaného bodového mračka – MVS.....	76
Rekonstrukce povrchu	76
Shrnutí postupu	78
Zpracování snímků – konkrétní příklady postupů	79
Pix4DMapper.....	79

Agisoft Metashape	85
Zdroje praktických informací.....	90
Odborné zdroje informací	91
Seznam obrázků	92
Příloha 1 – Členění typů letadel	94
Příloha 2 – Normální postupy.....	95

Seznam běžně využívaných zkratek v letectví

Zkratka	Původní význam	Český význam
AFIS	Aerodrome Flight Information Service	Letištní letová informační služba
AGL	Above Ground Level	Výška nad terénem
AIP	Aeronautical Information Publication	Letecká informační příručka
AMSL	Above Mean Sea Level	Výška nad střední hladinou moře
ARP	Aerodrome Reference Point	Vztažný bod letiště
ATIS	Automatic Terminal Information Service	Automatická informační služba
ATZ	Aerodrome Traffic Zone	Letištní provozní zóna
AUP	Airspace Use Plan	Plán využití vzdušného prostoru
BLOS	Beyond Line of Sight	Typ provozu pro lety za hranici viditelnosti
CAA	Civil Aviation Authority Czech Republic	Úřad pro civilní letectví
CONOPS	Concept of Operations	Provozní koncepce
CTR	Control Traffic Zone	Řízený okrsek
EASA	European Aviation Safety Agency	Agentura EU pro bezpečnost letectví
EVLOS	Extended Visual Line of Sight	Typ provozu pro lety za viditelnosti
FL	Flight Level	Letová hladina
HOP		Hustě osídlený prostor
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla létání podle přístrojů
IVAO	International Virtual Aviation Organisation	Mezinárodní virtuální letecká organizace
LIS		Letecká informační služba
LKAA		Letová informační oblast (FIR) ČR
LKD	LK – Dangerous	Nebezpečný prostor
LKP	LK – Prohibited	Zakázaný prostor
LKR	LK – Restricted	Omezený prostor
METAR	Meteorological Aerodrome Report	Pravidelná letecká meteorologická zpráva
MTOW	Maximum Take-off Weight	Maximální vzletová hmotnost
NAA	National Aviation Authority	Národní úřad civilního letectví
NOTAM	Notice to Airman	Oznámení pilotovi od letecké autority
PDRA	Predefined Risk Assessment	Předdefinované posouzení rizika
ŘLP		Řízení letového provozu
SAIL	Specific Assurance and Integrity Level	Specifická úroveň zabezpečení a integrity
SIGMET	Significant Meteorological Information	Významná meteorologická zpráva
SORA	Specific Operations Risk Assessment	Analýza rizik specifického provozu
TAF	Terminal Aerodrome Forecast	Letištní předpověď
TMA	Terminal Manoeuvring Area	Koncová řízená oblast
TRA	Temporary Reserved Area	Dočasně rezervovaný prostor
TSA	Temporary Segregated Area	Dočasně vyhrazený prostor
ÚCL		Úřad pro civilní letectví
VFR	Visual Flight Rules	Pravidla létání podle vidu
VLOS	Visual Line of Sight	Typ provozu pro lety za viditelnosti
VTOL	Vertical Take-Off and Landing	Vertikální vzlet a přistání

Předmluva

Bezpilotní letecké systémy se stávají čím dál tím populárnějšími nástroji pro sledování a hodnocení krajiny, a to jak pro environmentální výzkum odborníky, tak i pro praktické aplikace komerčními subjekty. Popularitu si získávají především svojí flexibilitou, rostoucí dostupností a klesající cenou. Dostupnost platform a senzorů je až ohromující. Pro profesionální a experimentální aplikace lze využít prostředky osazené několika špičkovými senzory naráz se vzletovou hmotností daleko přesahující deset kilogramů až po prostředky, které mohou vzletět z dlaně ruky. Záleží vždy na konkrétním účelu letu a cílové aplikaci, nicméně v dnešní době dokáží už i prostředky vážící několik málo stovek gramů nasnímat plnohodnotná data pro reálnou aplikaci. Navíc díky neustále se prodlužující výdrži doby letu lze pořídit data v jednotkách, desítkách až stovkách hektarů rozlohy dle konstrukce platformy a parametrům letu. I přes nespočet výhod je využití bezpilotních systémů v environmentální praxi často negativně ovlivněno neuváženými rozhodnutími neznalých, nezkušených a pře-motivovaných uživatelů i malými zkušenostmi komerčních dodavatelů dat a služeb.

Publikace – skripta slouží jako podpůrný studijní materiál studentům se zájmem o bezpilotní létání a možnosti bezpilotních systémů v environmentální praxi. Publikace poskytuje základní orientaci v problematice a předpokládá dohledání dalším relevantních informací. Text je doplněn řadou odkazů, které jsou klíčové pro pochopení popisovaného tématu. V textu je použita řada zkratk, které je nutné si osvojit – zkratky se v praxi běžně používají a je třeba se v nich orientovat¹.

Důležité je neplést si pojmy automatický a autonomní let. Autonomní let je takový, který neumožňuje zásah pilota do řízení letu. Bezpilotnímu letadlu lze předem naprogramovat trasu do řídicí jednotky a let je tak proveden více či méně automaticky (=automatický let), pilot má vždy možnost zasáhnout do řízení letu (což je nutnost pro provoz v otevřené a specifické kategorii). Autonomní provoz UA předpokládá pouze speciální kategorie provozu (certifikovaná).

Seznámení s podmínkami provozu a identifikace potenciálních konfliktů s podmínkami provozu je povinností a odpovědností provozovatele bezpilotního systému a dálkově řídicího pilota. Za průběh letu, nehledě na úroveň automatizace a technickou sofistikovanost systému, je odpovědný pilot, proto je třeba myslet na fakt, že bezpilotní letadlo je jenom soubor hardware a software, které se mohou začít chovat kdykoli zcela nepředvídatelně nebo skončit výpočetní chybou.

Publikace je členěna do devíti kapitol, které postupně procházejí nezbytná témata pro pochopení jako jsou technická podstata a rizika, bezpečnost provozu, základy letecké meteorologie, legislativní regulace, podstata plánování bezpečné mise a její náležitosti, principy zpracování dat včetně praktických ukázek.

Zpětná vazba jako i návrhy na doplnění a zlepšení jsou vítány – [formulář zde](#), děkujeme.

¹ Pro vaši představu, zde je např. seznam zkratk používaný v publikacích AIS.
https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/g2-2.pdf.

1. Úvod

V odborné literatuře se můžete setkat s označeními Unmanned/Uncrewed Aircraft – UA, Unmanned/Uncrewed Aerial Systems – UAS, Unmanned/Uncrewed Aerial Vehicle – UAV, Remotely Piloted Aerial System – RPAS či často také drony. Označení lze považovat za synonymická, ovšem mohou vyjadřovat i různé celky. Jak již z názvu plyne, UA/UAV je stoj, jedno konkrétní letadlo, zatímco slovo systém ve zkratce UAS s sebou nese i další dílčí celky nutné k provozu UA. Bezpilotní letecký systém proto bude zahrnovat i pozemní řídicí stanici a její komunikaci se strojem, zařízení pro start či přistání, aparáty pro přenos telemetrických údajů a živých náhledů ze senzorů atd.

Historie využití bezpilotních leteckých prostředků sahá do začátku 20. století, kdy se začalo experimentovat s letadly bez člověka na palubě. Cílený vývoj a konstrukci bezpilotních letadel využívala (americká a britská) armáda pro trénink střelby, zaměřování a sestřelování vzdušných cílů. První zdokumentovaný prototyp rádiem řízeného letadla byl během první světové války toho času ve fázi testování bez operativního nasazení. S pochopením významu bezpilotních prostředků pro vojenské účely se od té doby kladl velký důraz na výzkum i vývoj. Vznikají první průzkumné a sledovací prostředky, u kterých postupně docházelo ke zvyšování výdrže doby letu i zvyšování kvality pořízených snímků. Rychlý účelový vývoj pak probíhal v období druhé světové války. Později se též zaváděl přenos obrazu v blízkém reálném čase či technologie značkování pozemních cílů. Drony se pak hojně využívaly během studené války pro cílenou špionáž. Od 90. let jsou pak drony prakticky součástí některých světových armád². Od 10. let 21. století se pak drony pro bojové operace využívají na rutinní bázi.

Mimo vojenské aplikace se od začátku 21. století drony využívají též pro civilní účely. Velkou roli ve vývoji civilních dronů pro koncové uživatele hrály mj. francouzský Parrot (2010, prototyp dronu řízeného pomocí iPhone) a čínské DJI (v 2013 uvádí na trh nejznámější řadu malých dronů Phantom). Následovala masivní expanze lehkých dronů do celého světa, čímž souběžně vznikala i podpůrný průmysl (např. výroba chytrých velkokapacitních baterií) a iniciativa národních leteckých úřadů provoz dronů regulovat. V současnosti existuje nepřeberné množství aplikací. Drony využívají záchranné složky, výrobní průmysl, logistika, zemědělství, stavebnictví, facility, energetika, ale lze je využít např. i jako alternativu k ohňostroji či přenos nejrůznějších signálů.

Zkratka dron (resp. *drone* z anglického originálu) je v české terminologii považována za bezpilotní prostředek vojenského využití (odborně se též používá termín Unmanned Combat Aerial Vehicle –UCAV). V běžné komunikaci se však hovorově dron uvažuje jako univerzální (pozemní, vodní, letecký) prostředek řízený bez posádky na palubě, tedy vzdáleně pomocí řídicí stanice. Běžně se setkáte se dvěma základními typy prostředků. Nejpopulárnějšími jsou tzv. multi-koptéry (rotary-wing), se kterými se lze setkat v nespočtu provedení. Druhým typem jsou tzv. pevná křídla (fixed-wing), nicméně slovo pevná je trochu zavádějící, protože odnímatelnost křídel od těla letounu nehraje pro toto členění roli. S křídly se nejčastěji setkáte u modelů letadel, ale objevují se i v komerční praxi při mapování rozlehlějších oblastí. Mimo konstrukčního řešení se bezpilotní prostředky člení ještě dle maximální vzletové hmotnosti (maximum take-off weight – MTOW). Setkat se můžete s prostředky, které mají pár gramů a mohou startovat z dlaně ruky až po prostředky s hmotností desítek kilogramů, jejichž ovládání vyžaduje pokročilejší praxi.

² Známý a stále využívaný dron je např. britsko-izraelský vojenský projekt Watchkeeper, thalesgroup.com.

Při provozu letadla v České republice, resp. Evropské unii přijdete přímo či nepřímo do kontaktu s několika klíčovými institucemi – Národním úřadem pro letectví (NAA), Agentury EU pro bezpečnost letectví (EASA) a Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO). ICAO³ je mezivládní organizace, které má významný vliv na vytváření pravidel, standardů, norem a postupů v mezinárodním civilním letectví. ICAO, které je od roku 1947 specializovanou organizací Spojených národů, má vazbu na národní letecké úřady členských států s cílem koordinace bezpečnosti a plynulosti civilního letectví. Se zavedenými standardy ICAO se setkáte mj. u kódů letišť a typů letadel nebo tříd vzdušného prostoru. EASA⁴ je od roku 2002 leteckým úřadem Evropské unie s regulačními kompetencemi v oblasti civilního letectví. Součástí EASA je národní letecké úřady všech členských států EU i několik dalších států. Smyslem EASA, podobně jako ICAO, je stanovování standardů, pravidel a norem v civilním letectví s ohledem na bezpečnosti provozu i ochranu životního prostředí. EASA má kompetenci i v oblasti kontroly dodržování pravidel členskými státy. NAA je národní úřad regulující provoz civilního letectví daného státu. V České republice tuto kompetenci má Úřad pro civilní letectví (ÚCL)⁵, který je nejbližší institucí, se kterou přijdete do kontaktu např. při registraci provozovatele a pilota, získávání dokladů a osvědčení nebo při podávání žádostí pro udělení výjimky ze stanovených pravidel provozu UA.

Aby nedošlo k nedorozumění, vše, co létá, je letadlo, resp. tak to chápe česká legislativa. Jakékoli typy pilotovaných nebo nepilotovaných létajících prostředků jsou letadla. Letadlo je tedy základní jednotkou veškerého členění (viz Příloha 1 – Členění typů letadel).

Provoz bezpilotních systémů je v České republice regulován od začátku roku 2021 sjednocenou evropskou legislativou, a to především Nařízením komise (EU) 2019/945 o bezpilotních systémech a o provozovateli bezpilotních systémů ze třetích zemí, a Prováděcím nařízením Komise (EU) 2019/947 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel. Jednotná evropská pravidla provozu bezpilotních leteckých systémů ucelila místy roztržštěné národní legislativní rámce a přinesla do praxe řadu výhod. Zjednodušil se tím například provoz bezpilotních systémů ve vzdušném prostoru cizího státu, tedy přeshraniční spolupráce a provoz bezpilotního leteckého systému v zahraničí. Byť evropská legislativa přináší společná pravidla provozu na území EU, jsou zároveň ponechána možná lokální specifika daného státu. Národní letecké authority mohou zachovat část národní legislativy a dodatečně regulovat provoz na svém území. Proto jsou stále platné části tzv. Doplnku X leteckého předpisu L2⁶, tedy národního regulačního rámce pro provoz bezpilotních leteckých systémů platného do konce roku 2020, resp. 2021 v rámci přechodného období. Doplněk X byl nahrazen 31. 12. 2020 vyhlášením omezeného prostoru LKR10-UAS⁷, jehož účelem je zachování stávající územní ochrany České republiky, resp. dodatečná národní úprava provozu bezpilotních letadel ve vzdušném prostoru horizontálně vymezeného státní hranicí České republiky.

³ <https://www.icao.int>

⁴ <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones>

⁵ <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/>

⁶ <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>

⁷ <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/zemepisne-zony/blizsi-informace-k-omezenemu-prostoru-lkr10-uas/>

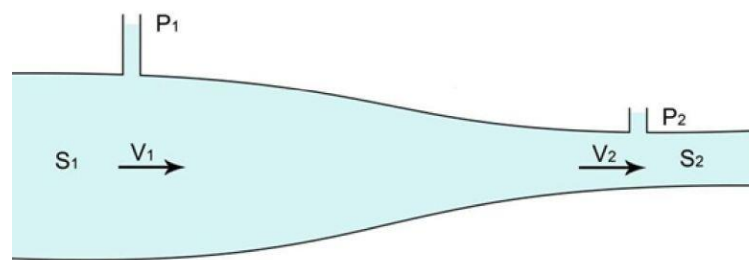
2. Aerodynamika a pohyb letadla

Fyzikální podstata pohybu ve vzduchu

Na začátek je třeba rozlišit dva typy prostředků – lehčí nebo těžší než vzduch (podrobněji Příloha 1). U prostředků lehčích než vzduch se pro vertikální pohyb ve vzduchu uplatňuje Archimedův zákon. Prostředky lehčí než vzduch (aerostaty) využívají pro pohyb ve vzduchu vzácných plynů, jejichž hustota je mnohonásobně nižší než hustota vzduchu, nebo plynů s odlišnou teplotou. Hustota vzduchu je v závislosti na teplotě cca $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zatímco např. hustota helia je pouhých $0,179 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Takové prostředky jsou většinou neřiditelné a jejich horizontální pohyb je dán v závislosti na proudění vzduchu (balón). Mohou být ale i řiditelné, jejich pohyb je pak ovlivněn z pravidla tlačnými vrtulemi (vzducholod).

Prostředky těžší, než vzduch musejí překonat zemskou gravitaci i odpor a tření vzduchu. Pohyb letadel ve vzduchu je popisována pomocí Bernoulliho teorému, Coandova efektu a třetího Newtonova zákona.

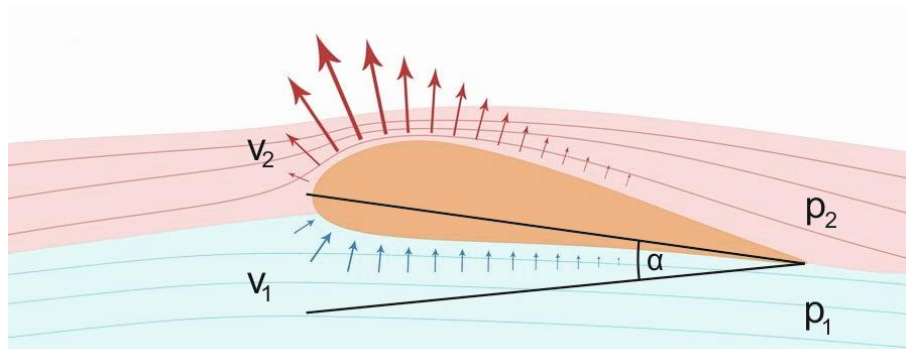
Daniel Bernoulli (1700–1782) odvodil zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. Bernoulliho teorém popisuje rychlost proudění a tlak kapaliny (Obrázek 1), kdy v místě s větším průřezem má proudící kapalina větší tlak, ale menší rychlost, zatímco v místě s menším průřezem má menší tlak, ale větší rychlost.



Obrázek 1. Schéma proudění – Bernoulliho teorém. Průměr S_1 je větší než S_2 a proto rychlost proudění v_1 je nižší než v_2 a tlak p_1 je větší než tlak p_2 .

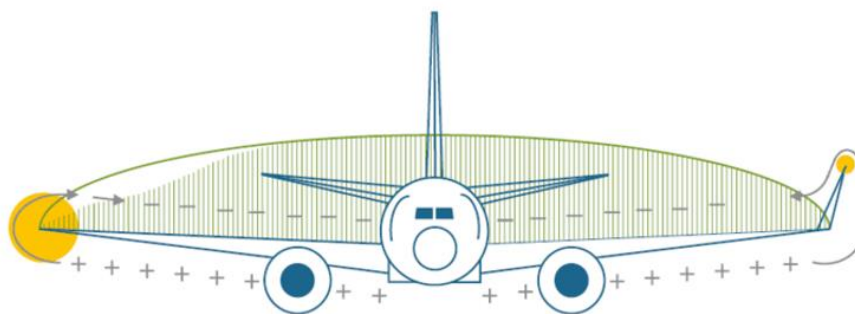
Letecký profil (aerofoil) nebo také profil křídla letadla je záměrně asymetrický. U standardního profilu vzduch nad křídlem musí proudit rychleji, aby došlo k poklesu tlaku (tedy vytvoření podtlaku). Naopak pod křídlem proudí vzduch pomaleji a dochází k nárůstu tlaku, resp. vztlaku. Dle Bernoulliho rovnice tedy vyplývá, že pod profilem křídla je větší tlak než nad profilem ($p_1 > p_2$) a tím je profil křídla vztlakovou silou tažen do vzduchu. Vysvětlením vzniku nižšího tlaku nad profilem křídla a vyššího tlaku pod jeho profilem však není delší dráha svrchní části profilu, nýbrž její zakřivení⁸. Rozdíl tlaku udržuje letadlo ve vzduchu (Obrázek 2). Poměr mezi vztlakem a odporem musí být co největší, tedy snažíme se dosáhnout maximální vztlaku a minimálního odporu. Vývoj leteckých profilů probíhá od samotného počátku letectví (začátek 20. století) a nyní existuje nespočet profilů. Konstrukční rozdíly reflektují účel využití a odrážejí především rozdílnou rychlost letu, manévrovatelnost letadla, ekonomičnost a bezpečnost letu apod. Většina profilů se však konstruuje tak, aby dosahovala co nejmenšího odporu vzduchu.

⁸ <https://www.cam.ac.uk/research/news/how-wings-really-work>



Obrázek 2. Proudění vzduch kolem profilu křídla letadla. Proudění vzduchu rychlostí \vec{v}_1 a tlakem p_1 pod profilem křídla (modře), \vec{v}_2 a p_2 nad profilem (červeně). Úhel náběhu α je úhlem tětiny a směru přitékajícího vzduchu, s narůstajícím úhlem dochází k vyššímu ohybu svazků proudnic vzduchu. Směr přitékajícího vzduchu je zleva. Upraveno dle <https://elspeedo.cz>.

Rozdíl tlaku nad a pod profilem křídla je důsledkem vzniku indukovaného odporu, který se projevuje především na koncích křídel (Obrázek 3). Proto se využívají tzv. winglety, jejichž úkolem je tento indukovaný odpor snižovat. Přímým efektem využití wingletů je snížení spotřeby paliva i hluku, důsledkem je poté zvýšení ovladatelnosti letadla i zlepšení vlastností při vzletu.



Obrázek 3. Winglety na křídlech. Vlevo případ bez, vpravo s wingletem. Oranžově je naznačen vzniklý vzdušný vír, zeleně vztlak, šedě kopmenzace tlaku. Zdroj: <https://www.facc.com>.

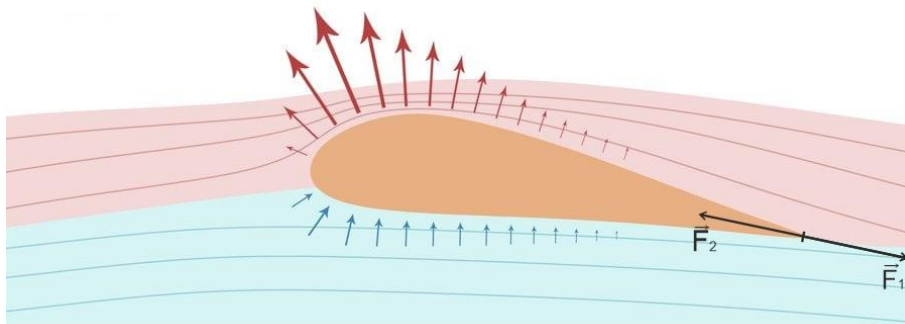
Coandův efekt (popsán poprvé 1910) popisuje chování kapaliny při kontaktu s konvexním povrchem. Vzduch se uvažuje jako nestlačitelná tekutina, tedy objem vzduchové hmoty bude časově konstantní. Tekutina o dané hustotě a viskozitě (ν v našem případě vzduch) se má tendenci držet hladkého konvexního povrchu překážky, kterou obtéká⁹ (Obrázek 2). Toho se mj. využívá při konstruování profilů křídel. Při proudění tekutiny se zároveň na povrchu vytváří oblast nižšího tlaku.

Henri Coandă (1886–1972), původem z Rumunska, byl průkopník aerodynamik a pravděpodobně první, kdy si uvědomil důsledky popisovaného efektu pro letectví, resp. možnou výhodu při konstrukci letadel.

⁹ Důsledků Coandova efektu se využívá i při nejrůznějších demonstracích, experimentech a hrách, např. rotující balónek ve vertikálním tryskajícím proudu vzduch, kdy proud vzduch drží balónek v určité vzdálenosti od trysky a gravitace mu též brání v tom, aby byl odfouknut pryč. Vyzkoušet efekt si lze i doma, např. sfouknutím svíčky, když před svíčku umístíte kulatou sklenici (válec), nebo umístěním konvexní části lžičky pod tekoucí proud vody.

Vznik aerodynamického (vz)tlaku lze popsat také pomocí Třetího pohybového Newtonova zákona (Zákon akce a reakce) lze využít pro popsání. Vztlak vzniká jako silová reakce při ohybu svazku proudnic vzduchu na vrchlíku křídla (Obrázek 4). Na pohybující se křídlo tak působí síla směrem vzhůru, což je reakcí na vychýlení okolního vzduchu směrem dolů. Jestliže je aerodynamická vztlaková síla vyšší než síla gravitační, letadlo ve vzduchu zrychluje směrem nahoru. Velikost aerodynamické síly je závislá na ploše, tvaru a profilu křídla, ale i úhlu náběhu křídla, hustotě vzduchu či rychlosti letadla. V praxi je u dopravních letadel podpořen profil křídla, resp. úhel náběhu využitím klapek a slotů. U bezpilotních prostředků je možné si u typů s horizontálním startem povšimnout sklopených směrových prvků (klapek). Sklopení klapek vede ke změně směru vystupujícího proudu vzduchu – úhlu náběhu.

Více-rotorové bezpilotní prostředky disponují zpravidla elektromotory s nastavitelným točivým momentem, a elektronickými regulačními jednotkami (regulátory). Dle Newtonova zákona akce a reakce působí motor na rotor určitým momentem síly, které rotor¹⁰ roztáčí. Opačně orientovaným stejně velikým silovým momentem ale působí motor i na celý UA. Působením tohoto reakčního momentu by docházelo k rotaci letadla. Tento efekt se kompenzuje přidáním dalšího rotoru, který se otáčí v opačném směru (u jedno-rotorových strojů se točivý moment kompenzuje dodatečným rotorem orientovaným ve vodorovné ose – tzv. ocasní vrtule). Na nosných rotorech vzniká následkem zmíněného Newtonova zákona aerodynamický vztlak tím, že rotory nasávají vzduch z oblastí nad nimi a vyfukují ho vyšší rychlostí směrem pod vrtule. Velikost aerodynamického vztlaku je regulována rychlostí otáčení rotorů.



Obrázek 4. Důsledek Newtonova pohybového zákona. Ve směru vystupujících svazků vzduchu vzniká síla \vec{F}_1 (akce) a v opačném směru na ní působí akce \vec{F}_2 (reakce), která způsobuje vztlak křídla (červeně). Směr přitékajícího vzduchu je zleva. Upraveno dle <https://elspeedo.cz>.

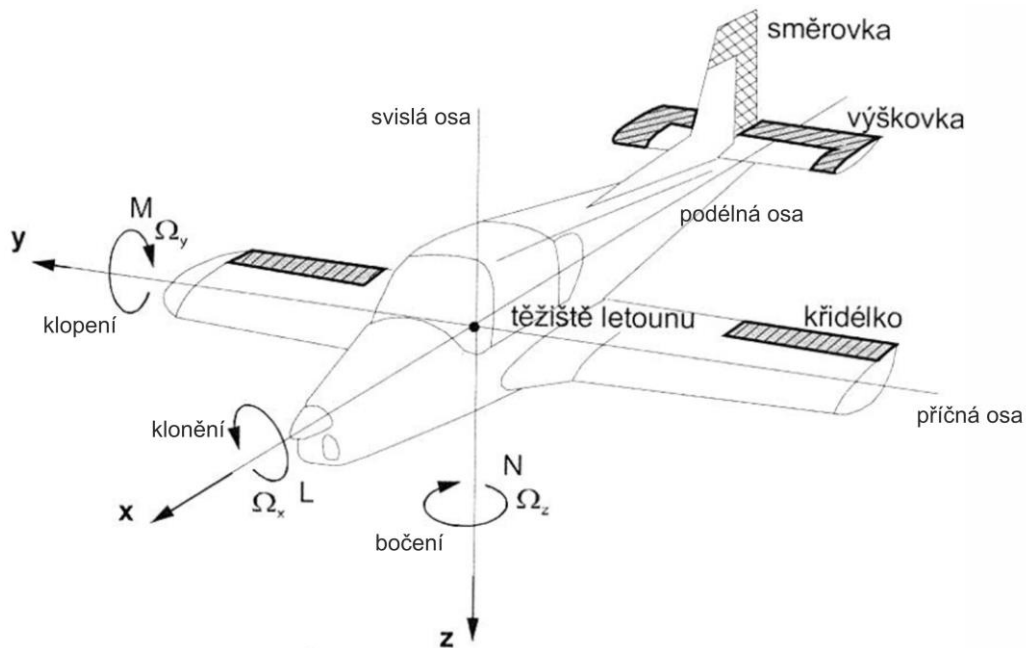
¹⁰Motor, resp. elektromotor se obvykle skládá ze dvou základních částí – statické (statoru) a otáčivé (rotoru). V případě UA se používají obvykle nízko-napěťové nízko-otáčkové elektromotory s rotačním pláštěm, tedy vnějším rotorem. V případě letectví se výraz rotor používá ale také pro rotující nosnou plochu, tedy tu část, kde vzniká aerodynamický vztlak a tah. Rotor je v tomto případě obvykle spojen hřídelí s motorem. V případě UA tuto nuanci zanedbáváme.

Osy pohybu – typy rotace UA

U všech typů prostředků rozlišujeme tři základní osy pohybu – x, y, z. Jedná se o dvě horizontální a jednu vertikální osu.

Směrový pohyb letadel

Letadla mají zpravidla tři základní ovládací prvky, které umožňují měnit jejich směr pohybu – křídélka, směrovka a výškovka. Každý prvek ovlivňuje rotaci kolem jedné z os, tedy klonění, bočení a klopení (Obrázek 5).



Obrázek 5. Osy pohybu letadla se znázorněnými směrovými ovládacími prvky a typy pohybu.

Je potřeba se orientovat v základních pojmech, včetně anglických ekvivalentů, které jsou využívány také při zpracování dat. Níže (Tabulka 1) je uveden přehled os, jejich funkcí a prvků, které jsou využity.

Tabulka 1. Osy pohybu letadla a směrové prvky.

Osa	Pohyb	Směrový prvek
Podélná (longitudal)	Klonění (roll)	Křídélka
Příčná (lateral)	Klopení (pitch)	Výškovka
Svislá (vertical)	Bočení (yaw)	Směrovka

Zatímco u klasických letadel je možné využití více prvků zároveň (např. pro zatačení), u bezpilotních prostředků je tento princip zjednodušen zpravidla na jeden ovládací prvek. U bezpilotních systémů se obvykle pohyb po všech osách řídí jedním ovládacím prvkem a jsou obvykle vybaveny tlačnou vrtulí, která stroji reguluje jeho rychlost, resp. výkon. Ovládacímu prvku, který kombinuje funkce křidélek a výškových kormidel, se říká elevon. Elevony se často využívají právě u bezocasých letadel (samokřidel).

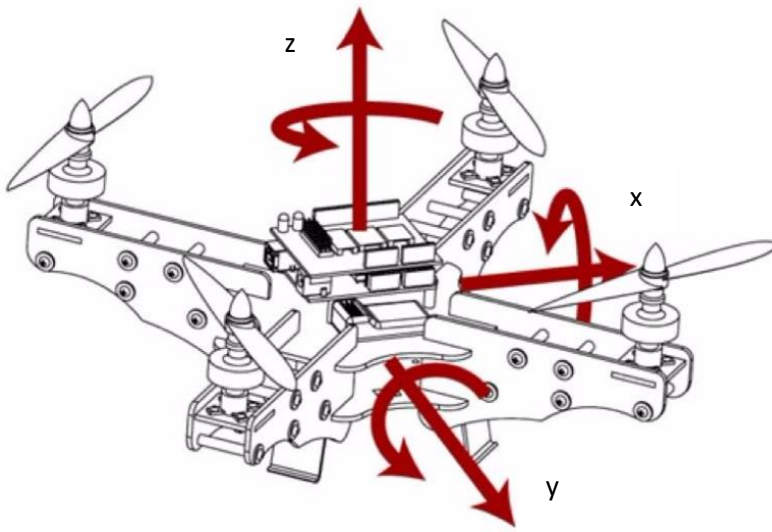
Směrový pohyb více-rotorových letadel

Koptéry udržuje ve vzduchu tahová síla díky točivému momentu, který generují motory. Změna pohybu je proto řízena pouze změnou tahu jednotlivých vrtulí. Je potřeba si uvědomit, že počet vrtulí je obvykle sudý – stejný počet levotočivých a pravotočivých vrtulí. U koptér se listy dvou sousedních rotorů otáčejí vždy protisměrně (Obrázek 6).



Obrázek 6. Protisměrný chod sousedních rotorů zabraňuje svévolné rotaci stroje na místě.

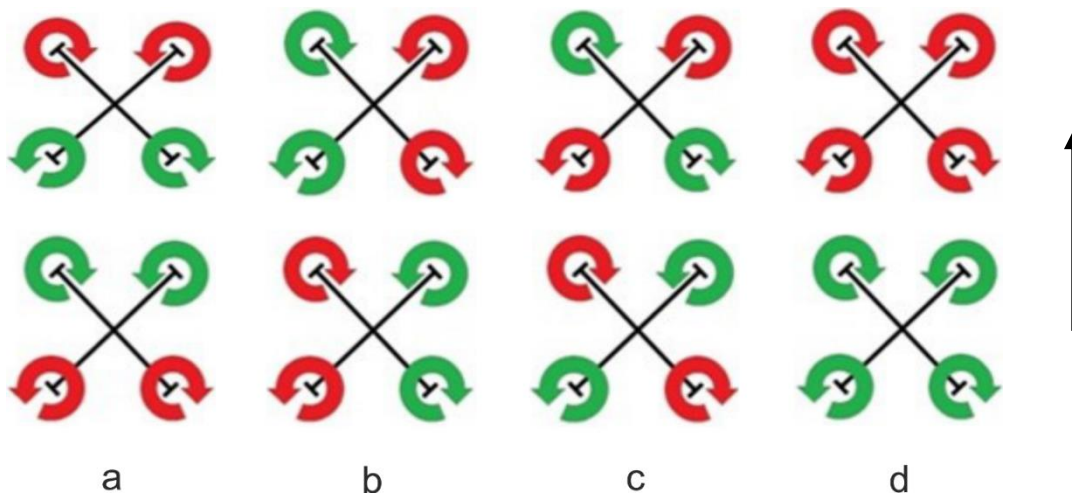
Oproti letadlu je potřeba rozlišovat čtyři základní typy pohybu stroje (Obrázek 7). Pohyb rotorových prostředků v horizontálním směru po všech osách je sférický. To znamená, že pro změnu (rychlosti) pohybu či směru dojde vždy ke snížení či zvýšení otáček (resp. točivého momentu) dvojic motorů. Dva motory protisměrného chodu ovlivní pohyb po osách x , y , dojde tedy ke klopení či klonění (dle orientace stroje). Dva motory stejnosměrného chodu ovlivní pohyb po ose z , čímž dojde k otočení stroje neboli změně kurzu. Pro pohyb ve vertikálním směru je zapotřebí, aby došlo ke změně rychlosti otáčení všech rotorů. Všechny motory vytvářejí stejný točivý moment, vektorovým součtem získáme celkovou tahovou sílu. Pokud je celková tahová síla větší než síla tíhová, stroj bude stoupat.



Obrázek 7. Osy pohybu rotorových UA, směr pohybu stroje je ve směru kladné osy x .

Níže je přehled os, jejich funkcí a prvků, které jsou využity. Je potřeba se uvědomit, že pohyb po ose Z může být ve vertikálním i horizontálním směru (Obrázek 8).

Osa	Pohyb	Směrový prvek
Podélná (longitudal)	Klonění (roll)	Dva protisměrně rotory
Příčná (lateral)	Klopení (pitch)	Dva protisměrně rotory
Svislá (vertical)	Změna kurzu (yaw) Změna letové hladiny	Dva stejnosměrně rotory Všechny rotory



Obrázek 8. Řízení koptér změnou tahu jednotlivých vrtulí: (a) klopení, (b) klonění, (c) změna kurzu, (d) změna letové hladiny. Šipka určuje směr orientace stroje.

Na všechny typy bezpilotních letadel mají značný vliv vzdušné proudy, resp. směr a rychlost větru, nárazový vítr apod. Bepilotní prostředky je třeba stabilizovat pomocí elektroniky – řídicí jednotky a pomocných senzorů. Např. u rotorových typů je potřeba si uvědomit, že vlivem změny rychlosti větru dochází k neustálému vyhodnocování a přepočítávání rychlosti otáčení všech rotorů. Tyto typy jsou také obzvláště citlivé na rozdílný tah rotorů. Řídicí jednotka dokáže na základě informace z dalších senzorů zmíněné vlivy kompenzovat a stroj stabilizovat více či méně na místě.

3. Technika a její analýza rizik, bezpečnost

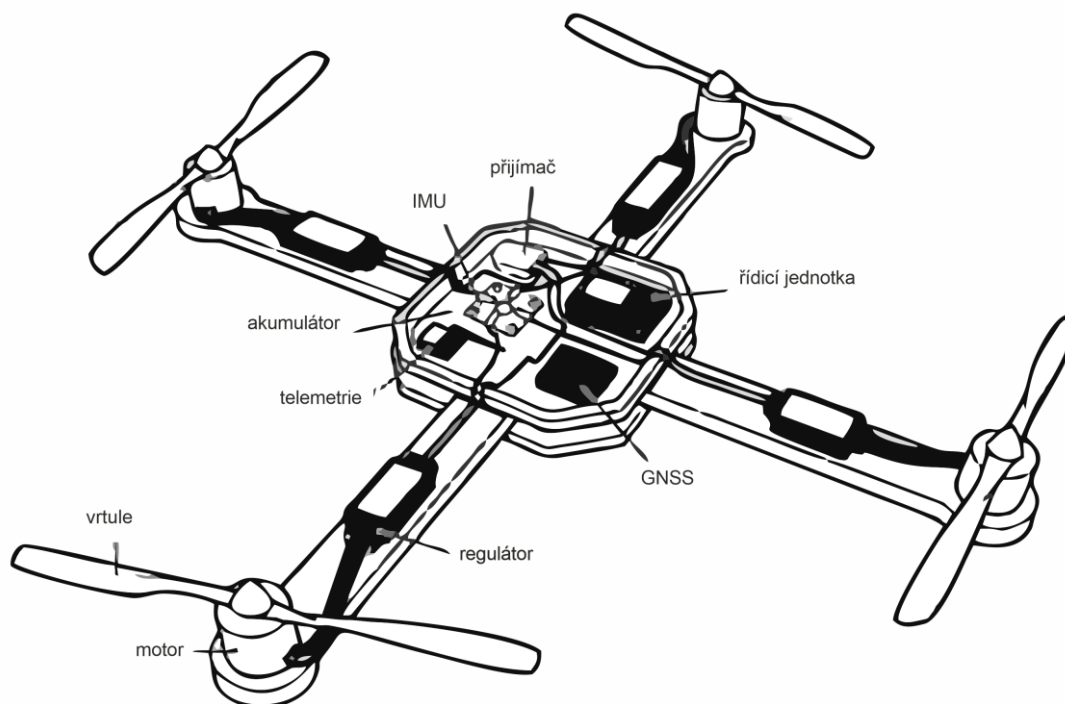
Bezpilotní letecký systém se obvykle skládá z celé řady funkčních celků, bez kterých by nemohl být provozuschopný. Níže je popsán přehled všech nezbytných i obvyklých dalších prvků systému včetně analýzy rizik pro jednotlivé části (ty se mohou samozřejmě ale lišit dle typu prostředku). Popis jednotlivých částí slouží ke zvýšení povědomí studentů o využívaných technologiích. Pro jednotlivé typy by se drobně odlišoval, nicméně princip zůstává vždy stejný.

Funkční celky bezpilotního prostředku

Počet a typy celků se liší zpravidla dle konstrukčního řešení, nicméně základními prvky jsou obvykle vlastní drak (trup), motory s regulátory, vrtule, elektroinstalace včetně řídicí jednotky, akumulátor atd. Pro lepší představu je níže uveden obrázek konstrukce pozemního více-rotorového vrtulníku – kvadrakoptéry (Obrázek 9).

Bezpilotní prostředek se skládá mj. z těchto funkčních celků:

- Drak (trup)
- Motorové gondoly
- Motory
- Elektronické regulátory otáček
- Vrtule
- Akumulátor, stabilizace napětí
- Řídicí soustava
- Telemetrická soustava
- Navigační a stabilizační jednotka (kompas, barometr, GNSS)
- Inerciální měřicí jednotka (gyroskop, akcelerometr, magnetometr)
- Přistávací zařízení
- Optická, sonická a laserová sensorika pro detekci překážek
- Podvěs s užitečným zatížením (kamerou/senzorem)



Obrázek 9. Schéma funkčních celků dronu. Upraveno dle 10.1145/3093241.3093251.

Drak a motorové gondoly

Trup prostředku bývá jednodílná skořepina z nejrůznějších kompozitů či montovaná (vytištěných) soustava dílů. Drak slouží pro umístění palubní části řídicí soustavy, telemetrické soustavy, akumulátoru a subsystému užitečného nákladu. K draku jsou připevněny obvykle motorové gondoly s pohonnými jednotkami, a úchytem přistávacího zařízení. Uvnitř prochází silová elektroinstalace pohonných jednotek.

Rizika: Jedná se o kritickou část systému, která obvykle nese všechny další celky. Je potřeba si dát pozor na trhliny z důvodů přepravy, chybné manipulace, střetem s cizím objektem anebo chybně provedeným přistávacím manévrem. Běžným provozem se drak znečistí. Nečistota zvyšuje vzletovou hmotnost a může proniknout k ložiskům motorů a způsobit výpadek pohonné jednotky.

Motory a regulátory

Bezpilotní prostředek disponuje několika zpravidla stejnými typy motorů. Jde o elektromotory s rotačním pláštěm. Bezpilotní prostředek také ke každému motoru disponuje regulátory otáček.

Rizika: Motory se mohou uvolnit z motorových loží. Motor se musí otáčet volně a bez vůlí. Je nutné dodržovat intervaly servisních prohlídek motorů a předepsané výměny ložisek. Motor může provozem dosáhnout vyšší než povolené provozní teploty (tj. ca 60 °C). Provozem UAS dochází k zahřívání regulátorů. Maximální povolená provozní teplota regulátoru je 60 °C.

Vrtule

Bezpilotní prostředek disponuje na každý motor jednou dvoulistou vrtulí, výjimku mohou tvořit trikotéry, kde jsou na jednom motoru nainstalované vrtule dvě. Je třeba rozlišit levo- a pravo-točivou vrtuli. Na rozdíl od klasického letectví, vrtule zpravidla neumožňuje změnu náklonu.

Rizika: Provozem může dojít k mechanickému poškození vrtulí. Při jakémkoliv poškození libovolné vrtule není UA provozuschopné.

Akumulátory

Jedná se většinou o více-článkové Li-Ion nebo Li-Pol akumulátory o kapacitě v řádech tisíců miliampérhodin (mAh). Akumulátor může obsahovat podpůrnou elektroniku, která zajišťuje sběr dat o provozních údajích jako je napětí, proudové odběry, odevzdané kapacity a provozní teploty. V dnešní době jsou také časté tzv. chytré baterie, které si mimo zmíněných parametrů hlídají např. počet použití či se dokáží sami po určité době vybit na skladovací kapacitu. Provoz, skladování a údržba akumulátorů podléhají postupům popsáným v příručce akumulátorů. Povolené provozní teploty akumulátoru jsou obvykle 5-50 °C.

Rizika: Nedostatečná kapacita akumulátoru pro danou misi či mechanické poškození představuje pro pilota potencionální problém, zrovna jako závady na upevnění akumulátoru. Nízké provozní teploty snižují kapacitu akumulátoru a zároveň představují nižší proudovou zatížitelnost akumulátoru. Akumulátory se mohou skladovat pouze nabitě/vybité na částečnou kapacitu (obvykle 70 %), nesmějí se též nechat vybit pod kritickou mez kapacity. Akumulátoru může hrozit přehřátí v důsledku nadměrného odběru proudu i okolní teploty vzduchu.

Řídicí soustava

Řídicí soustava slouží k přenosu řídicích povelů pilota a stabilizaci UA. Soustava je složena obvykle z vysílače, přijímače, stabilizační (řídicí) jednotky a přijímá informace z celé řady podpůrných systémů, a to satelitního navigačního přijímače, magnetického kompasu, barometru, inerciální měřící jednotky (IMU)¹¹, systémů pro detekci překážek, altimetru a dalších dostupných prvků nutných k bezpečnému provozu. Všechny prvky je možné také duplikovat, tedy mohou být obsaženy v UA vícekrát za účelem zvýšení spolehlivosti, přesnosti, stability či jako ochrana proti případným výpadkům. K přenosu je používáno obvykle bezdrátové pásmo 2,4 a 5 GHz. Povelů jsou zpracovávány palubní stabilizační jednotkou, která ovládá pomocí regulátorů otáček otáčky motorů a tím pohyb UA ve všech třech osách.

¹¹ IMU jednotka je zařízení pro inerciální navigaci. Obsahuje gyroskop, akcelerometr, případně magnetometr, někdy i více kusů každého. IMU určuje nezávisle na prostorové poloze senzoru prvky jeho vnější orientace vůči přijatému souřadnicovému referenčnímu systému. V podstatě se jedná o systém určování relativní polohy.

Spolehlivost řídicí soustavy a její odolnost proti rušení je zabezpečena spárováním vysílače a přijímače a zvýšena povinným užitím dodatečného satelitního přijímače. Systém vyhodnocuje úroveň a kvalitu signálu z těchto přijímačů a automaticky volí silnější a kvalitnější signál.

Rizika: Rušení řídicí soustavy představuje pro pilota poměrně velký problém, protože při zarušení ztratí kontrolu nad řízením UA. Mechanické poškození libovolného prvku palubní části řídicí soustavy a vysílače nebo také přímý styk s vodou představuje ze stejného důvodu taktéž vážné riziko. Negativně může na sensorovou část řídicí soustavy působit náhlá změna okolní teploty. Kompas je velice citlivý na elektromagnetické rušení. Po významné změně polohy je někdy nutné provést kalibraci kritických systémů – kompasu, případně IMU jednotky.

Telemetrická soustava

Telemetrie jsou dálkově přenášeny informace ze senzorů dronu do řídicí stanice pilota. Telemetrická soustava je určena pro monitorování a přenos provozních dat palubních a pohonných systémů UA. Přenos je realizován v bezdrátovém pásmu 2,4 či 5 GHz do pozemního stanoviště, které umožňuje pilotovi vyhodnotit aktuální stav UA.

Součástí telemetrických informací je obvykle kapacita a teplota baterie, síla signálu spojení mezi dronem a řídicí stanicí, kvalita signálu GNSS včetně informace o aktuální poloze, volitelně jakékoli další informace z palubních senzorů, např. rychlost otáčení jednotlivých rotorů, teplota motorů atd.

Rizika: Mechanické poškození libovolného prvku palubní části telemetrické soustavy stejně tak jako přímý styk s vodou představují vážné riziko. Telemetrie hraje pro pilota významnou roli jako podpora pro jeho rozhodování. Bez telemetrických údajů ztratí pilot informaci o stavu baterie, poloze letadla, rychlosti a směru letu atd.

Přistávací zařízení

Mechanické přistávací zařízení slouží ke stabilizaci UA při startu a přistání. Je tvořeno systémem podvozkových noh, s volitelnou možností sklápění a délky podle zvoleného užitečného zatížení.

Rizika: Mechanické poškození přistávacího zařízení představuje relativně nízké riziko, může dojít k poškození subsystému užitečného nákladu nebo pohonných jednotek při přistávacím manévru. Nicméně bezpečnost letu jako takového ohrožena není za předpokladu, že nemá poškození přistávacího zařízení za následek změn těžiště stroje.

Další celky bezpilotního prostředku

Pro chod bezpilotního prostředku je zapotřebí dalších funkčních celků jako např. nabíjecí soustava, subsystém užitečného zatížení, padákový systém, systém přenosu obrazu (tzv. *first-person view*, FPV), zařízení pro start, systémy detekce překážek a vyhýbání, další nejrůznější vysílače/přijímače či další příslušenství.

Nabíjecí soustava

Nabíjecí soustava slouží k nabíjení akumulátorů v provozních podmínkách. Tvoří ji nabíječ s konektorovým rozhraním pro použité akumulátory. Napájení nabíjecí soustavy je zpravidla možné pomocí síťového napětí 230 V nebo trakčních baterií 12 V.

Rizika: Nedodržením předepsaného nabíjecího profilu pro použitý akumulátor může dojít ke zničení akumulátoru. Připojením k nevhodnému zdroji elektrického napětí může dojít ke zničení nabíjecí soustavy. Jakýkoliv přímý styk nabíjecí soustavy s vodou představuje vážné riziko pro nabíjení a poté nesmí být nabíjecí soustava používána. Provozní teplota nabíječe nesmí přesáhnout zpravidla 80 °C.

Subsystém užitečného zatížení

Systém užitečného zatížení slouží k upevnění schválených zařízení, jako jsou kamery snímající ve viditelném spektru anebo různá další sensorová zařízení (snímající v dalších částech spektra) či ostatní měřicí a sensorová technika. Instalace užitečného zatížení nesmí překročit maximální hmotnost schválenou při certifikaci UA.

Rizika: Mechanické poškození libovolného prvku subsystému užitečného nákladu představuje relativně velké riziko. Může dojít k jeho uvolnění a tím k fatální ztrátě stability. Pokud je k UA připevněn nepovolený užitečný náklad může dojít k překročení maximální povolené vzletové hmotnosti anebo dojít k posunu těžiště UA.

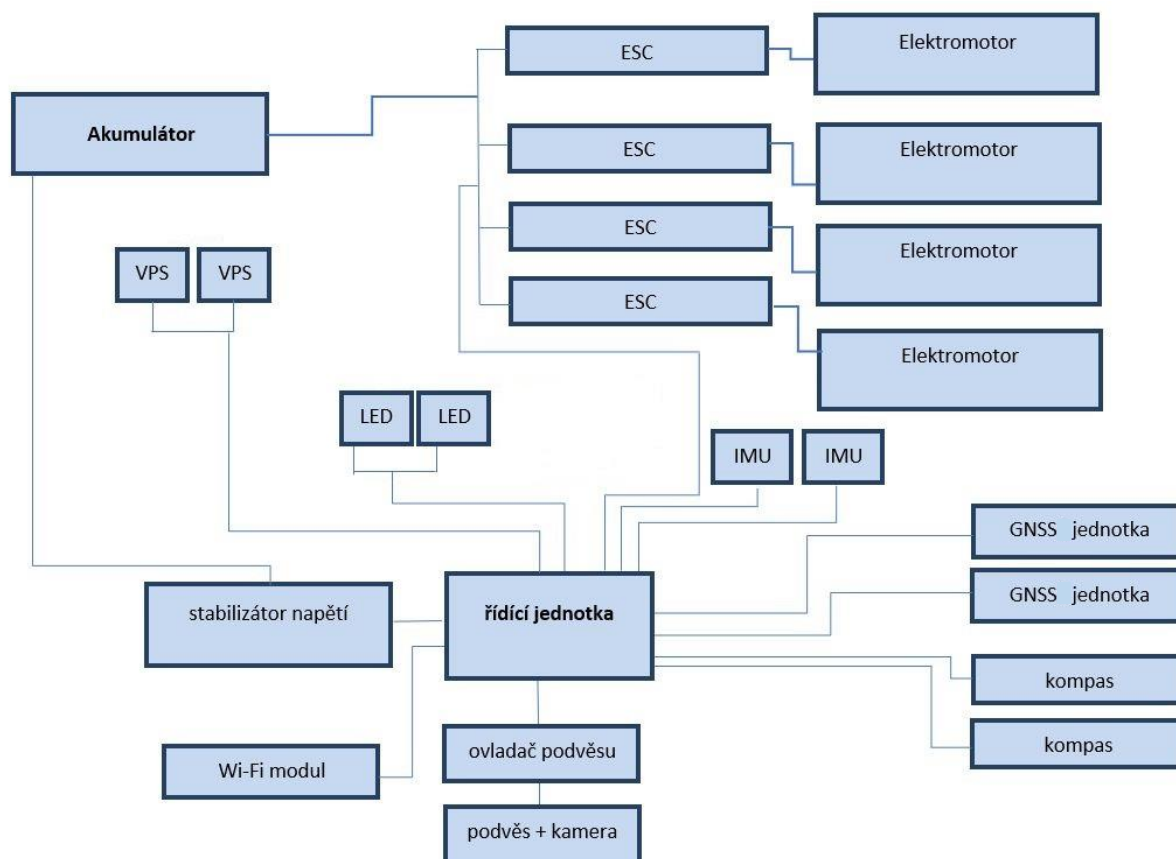
Podvės s užitečným zatížením

Dvojosý nebo trojosý stabilizovaný podvės (gimbal) nese užitečné zatížení – senzor/kameru. Zpravidla je stabilizován a centrován tak, aby neměnil těžiště dronu. Podvės se senzorem bývá napojen na palubní elektroinstalaci a konzumuje energii ze společného akumulátoru, případně má vlastní akumulátor určený ke stabilizaci podvėsu. Stabilizace podvėsu probíhá pomocí několika servomotorů, jejichž točivý moment je regulován pomocí dodávaného proudu a napětí požadavky řídicí jednotky motorů. Umístěný senzor je obvykle zapojen do obvodu řídicí jednotky, která tak může v závislosti na příkazech řídicí stanice dávat pokyny ke spoušti závěrky (*triggering*).

Palubní elektroinstalace

Nezbytná část celého systému je elektroinstalace, která propojuje všechny dílčí celky a je skryta v draku UA. Níže (Obrázek 10) je schematicky znázorněno možné zapojení palubní elektroinstalace UA.

Pomyslným středem a centrálním mozkiem systému je řídicí jednotka, která je propojena s kritickými systémy. Řídicí jednotka přijímá dostupné informace z telemetrického čidla, informace vyhodnocuje a následně dává příkazy regulátorům motorů. Zvolená řídicí jednotka je plně programovatelná a lze k ní mimo připojeného GNSS modulu a inerciální jednotky připojit nejrůznější podpůrné systémy jako jsou např. optické, ultrasonické či jiné senzory, které sbírají další data pro podporu rozhodování. Mimo čidel lze k systému připojit nejrůznější další zařízení, led diody, kamery, speciální snímače apod.



Obrázek 10. Schéma palubní elektroinstalace pozemního více-rotorového vrtulníku. ESC = electronic speed controller (regulátor otáček), VPS = visual positioning system (doplňková čidla telemetrie), LED = light emitting diode (diody).

Řídicí jednotka je závislá na informacích o činnosti dostupných systémů. Pomocí GNSS modulu (a tím je prakticky vždy systém GPS¹²) přijímá informace o změně polohy a díky tomu začne patřičným regulátorům dávat informace o změně rychlosti otáčení, čímž dojde ke stabilizaci stroje víceméně na místě (v mezích činnosti IMU jednotky a odchylky GNSS). Plná funkčnost telemetrických čidel je zde klíčová. Pokud budou informace o telemetrii chybné, řídicí jednotka chybu nerozpozná a začne na dodané informace reagovat. Důsledkem může být nepředvídatelné chování bezpilotního prostředku a potencionální ohrožení zdraví či majetku. U některých modelů dochází ke znásobování obvodů s cílem zvýšit přesnost a bezpečnost. Bezpilotní prostředky mohou být vybaveny více GNSS přijímači, více IMU jednotkami, více kompasovými jednotkami, více řídicími jednotkami ale např. i zdvojeným obvodem napájení.

Většina dronů má zabudovaný systém nouzového chování (*fail safe system*) pro případ, že dojde ke ztrátě spojení mezi dronem a řídicí stanicí. Chování lze obvykle nastavit v prostředí řídicího software tak, že se po ztrátě spojení stroj začne vracet na místo, zůstane viset ve vzduchu nebo přistane. Možnosti nastavení detailů chování je závislé na řídicím software. Failsafe je povinná výbava pro Specifickou a Certifikovanou kategorii provozu, jako i pro drony s MTOW vyšší než 250 g.

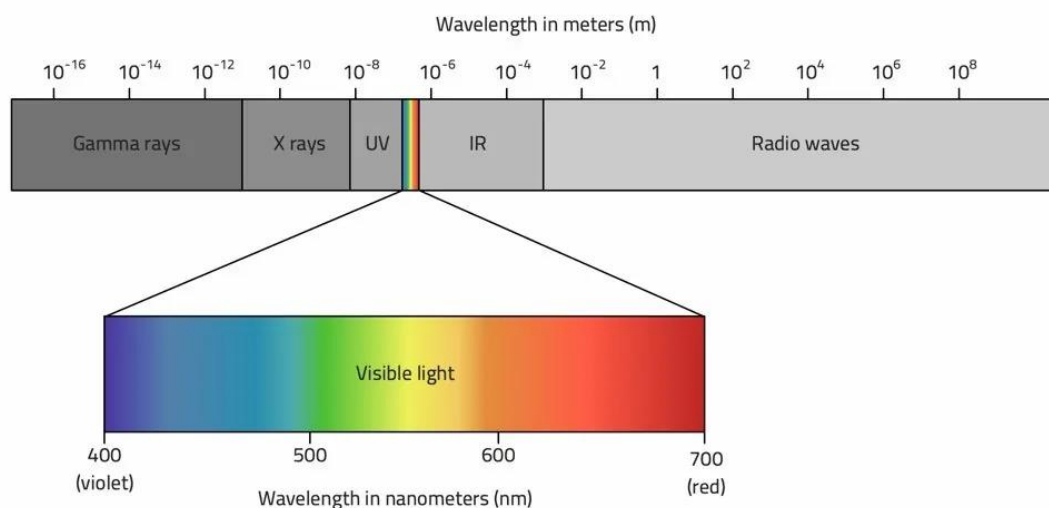
¹² GNSS jednotka dronu je obvykle schopná přijímat signál z dalších globálních navigačních systémů jakými jsou evropské Galileo, ruský Glonass a čínský BeiDou. Využití více konstelací má za následek doplňování a zpřesňování polohové informace.

Dálkový průzkum Země představuje klíčovou metodu pro získávání dat o povrchu Země a atmosféře bez přímého kontaktu s pozorovaným objektem nebo fenoménem. Tento proces je zajišťován prostřednictvím senzorů umístěných na různých platformách, jako jsou satelity, letadla nebo drony. Sensory hrají zásadní roli, protože umožňují zachytávat elektromagnetické záření, které je odráženo nebo vyzařováno objekty na zemském povrchu. Na základě těchto dat lze následně provádět analýzy a modelování, které jsou neocenitelné v řadě vědeckých a praktických aplikací.

Sensory mohou být plně integrovány do bezpilotního prostředku nebo může dron sloužit pouze jako nosič externího senzoru. Sensory lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní senzory detekují přirozené elektromagnetické záření, které je odráženo nebo vyzařováno povrchem Země. Typicky jde o sluneční záření, které je po interakci s povrchem zaznamenáváno senzorem. Nejrozšířenějšími pasivními senzory jsou multispektrální a hyperspektrální kamery, které umožňují detailní analýzu vegetačního pokryvu, vodních ploch, městské infrastruktury a dalších povrchových prvků. Kamera zaznamenává hodnoty v definovaných páslech spektra elektromagnetického záření (Obrázek 11).

Multispektrální kamera obsahuje menší množství pásů se širším rozptylem vlnové délky. Zpravidla se jedná o dvě až tři pásma viditelného spektra, o pásma na hraně viditelnosti *red edge* a za hranou viditelnosti *near-infrared*. Hyperspektrální kamera naopak snímá až desítky úzkých spektrálních pásem. Výsledkem je spojitá křivka zobrazující hodnoty pozorovaného objektu napříč elektromagnetickým spektrem.

Na druhé straně stojí aktivní senzory, které samy vysílají záření směrem k zemskému povrchu a následně měří jeho odraz zpět k senzoru. Mezi nejrozšířenější technologie v této kategorii patří LiDAR (*Light Detection and Ranging*), experimentálně také radarové systémy, jako je syntetická apertura radaru (SAR). Aktivní senzory jsou schopny získávat data nezávisle na denní době a povětrnostních podmínkách, což je činí mimořádně užitečnými pro mapování topografie, monitorování změn v krajině, sledování ledovcových hmot nebo lesních porostů. Využití aktivních senzorů v kombinaci s daty z pasivních senzorů umožňuje komplexní analýzu a porozumění procesům probíhajícím na Zemi.



Obrázek 11. Elektromagnetické spektrum, zdroj: <https://www.radio2space.com/components-of-electromagnetic-spectrum/>

RGB senzory

Standardní viditelné senzory snímají obraz pouze v červeném, zeleném a modrém spektru (tzv. RGB – *red-green-blue*). Snímají tedy ve viditelném spektru a jsou tak často využívány pro tvorbu ortofotomap, 3D modelů a vizuálních inspekcí. Tyto senzory jsou základem pro dokumentaci stavů povrchů, urbanistických zón či infrastruktury. Světlo odražené od povrchu je zachyceno senzorem, kde je každý pixel vybaven filtrem pro jednu z těchto barev. Přijaté signály jsou následně digitalizovány a kombinovány, aby vytvořily plně barevný obraz.

Mezi drony vybavené takovými senzory patří mimo běžné hobby drony například DJI Mavic 3, Phantom 4 Pro nebo Autel EVO II Pro. Jako externí sensor lze zmínit S.O.D.A, který je kompatibilní s dronem senseFly eBee. Pro profesionální využití jsou velmi často RGB senzory umístěny společně s multispektrálním.

Multispektrální senzory

Multispektrální senzory fungují na principu zachycování elektromagnetického záření v několika specifických spektrálních pásmech, která se pohybují i mimo viditelné světlo. Na rozdíl od RGB sensorů multispektrální senzory zaznamenávají data i v blízké infračervené (NIR) nebo krátkovlnné infračervené (SWIR) oblasti. Každé spektrální pásmo je citlivé na různé vlastnosti povrchu, což umožňuje detailnější analýzu vegetace, vodních ploch nebo půdy. Data z těchto sensorů se často používají k výpočtu vegetačních indexů, jako je NDVI, které poskytují informace o zdraví a růstu rostlin.

Na dronech jsou multispektrální senzory klíčové pro precizní zemědělství, kde se používají k monitorování stavu plodin, detekci stresu rostlin způsobeného nedostatkem vody nebo živin nebo optimalizaci zavlažovacích a hnojících strategií. Kromě zemědělství se multispektrální senzory využívají také v ekologických studiích pro sledování změn v ekosystémech, v mapování eroze půdy nebo monitorování vodních zdrojů. Díky vysoké spektrální citlivosti poskytují multispektrální senzory data nezbytná pro environmentální rozhodování i komerční aplikace.

Za příklady lze uvést drony od firmy DJI – Phantom 4 Multispectral, Mavic 3M, a ze samostatných sensorů pak MicaSense Altum-PT a RedEdge P pro křídla senseFly eBee.

Hyperspektrální senzory

Hyperspektrální senzory jsou pokročilé nástroje, které umožňují detailní analýzu zemského povrchu prostřednictvím sběru dat v desítkách až stovkách úzkých spektrálních pásem, pokrývajících širokou škálu vlnových délek od viditelného světla až po infračervené záření. Každý pixel v hyperspektrálním obrazu obsahuje kompletní spektrální informaci, což umožňuje identifikaci a analýzu materiálů na základě jejich specifických spektrálních vlastností. Tento přístup umožňuje rozlišit objekty a materiály, které by jinak vypadaly stejně v obrazech pořízených běžnými RGB nebo multispektrálními senzory. Hyperspektrální senzory jsou také cenné v geologii, kde umožňují mapování minerálních složek půdy, a v průmyslovém využití pro kontrolu kvality materiálů a detekci nečistot nebo kontaminantů.

Hyperspektrální senzory zpravidla nejsou integrovány přímo na dron. Prodávají se jako externí zařízení, které se umístí na podvěs. Například Specim AFX10 s 224 spektrálními pásy v rozsahu 400 až 1000 nm.

Termální senzory

Termální senzory detekují infračervené záření, které vyzařují objekty v závislosti na jejich teplotě. Každý objekt s teplotou nad absolutní nulou ($-273,15\text{ °C}$) vyzařuje infračervené záření, které lidské oko nedokáže zachytit, ale termální senzory ano. Tyto senzory měří intenzitu infračerveného záření a převádějí ji na teplotní hodnoty, které se zobrazují jako obraz složený z různých barev podle teploty – od chladných odstínů (modrá, zelená) po teplé odstíny (žlutá, červená). Tento obraz, známý jako termogram, poskytuje vizuální reprezentaci teplotních rozdílů na povrchu.

Drony vybavené termálními senzory mají široké uplatnění v různých oblastech. V zemědělství se využívají k monitorování stresu plodin, odhalování zavlažovacích problémů nebo detekci škůdců. V průmyslovém prostředí pomáhají identifikovat úniky tepla, poruchy elektrických systémů nebo slabá místa v izolaci budov. V záchranných operacích se termální senzory používají k hledání pohřešovaných osob nebo sledování požárů, protože dokáží identifikovat zdroje tepla i za špatné viditelnosti, například v noci nebo v hustém kouři.

Mezi drony s termální kamerou lze opět zařadit produkty DJI – Mavic 3T, sensor H20T nebo Zenmuse XT. Mimo DJI pak např. senseFly DuetT nebo senzory z rodiny FLIR.

Lidarové senzory

LiDAR funguje na principu měření vzdálenosti pomocí laserových paprsků. Dron vybavený LiDAREm vysílá tisíce až miliony krátkých laserových pulzů směrem k zemskému povrchu. Tyto pulzy se odrážejí od různých objektů, jako jsou stromy, budovy nebo terén, a vracejí se zpět k senzoru. Na základě času, který laserovému paprsku trvá cesta tam a zpět, se vypočítává vzdálenost k objektu. Kombinací těchto měření z různých úhlů se vytváří detailní 3D model prostředí. LiDAR na dronech je obzvláště užitečný pro tvorbu digitálních modelů terénu a povrchu, mapování vegetace, a přesné zaměřování infrastruktury.

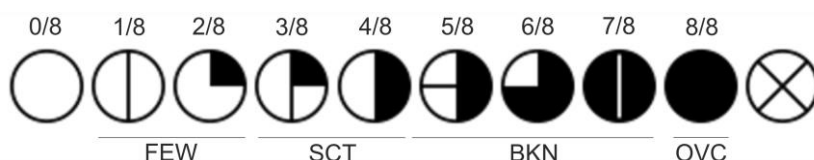
Nejčastěji využívaný je rotační typ. Rotační LiDAR vysílá laserové pulzy během svého otáčení a zároveň zachycuje odražené paprsky z okolních objektů. Tímto způsobem neustále skenuje své okolí a vytváří detailní 3D mapu prostoru, která se aktualizuje v reálném čase. V závislosti na rychlosti rotace a frekvenci vysílání pulzů může LiDAR dosáhnout velmi vysoké hustoty bodů (tisíce na metr čtvereční), což umožňuje přesné měření a detekci objektů v blízkém i vzdálenějším okolí. Kompaktní lidarový senzor je například DJI Zenmuse L2, 3DT Scanfly nebo Emesent Hovermap ST-X.

4. Letecká meteorologie

V letectví se pracuje s parametry tzv. standardní atmosféry – odvozeného domluveného modelu atmosféry, který uvažuje gradient poklesu teploty a tlaku s nadmořskou výškou. Standardní atmosféra by měla vystihovat převládající poměry v atmosféře reprezentativní během celého roku ve všech zeměpisných šířkách. Změny tlaku, hustoty nebo teploty vzduchu jsou klíčovými pro letové parametry. Mezinárodní standardní atmosféra stanovená na hladinu moře má tlaku vzduchu 1013.25 hPa, hustotu vzduchu $1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, teplotu vzduchu $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (288.15 K) a tíhové zrychlení $9.8066 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V nulové výšce jsou hodnoty konstantní a přesně definované. Teplotní gradient je v jednotlivých vrstvách atmosféry konstantní a nabývá přesně definovaných hodnot – do 11 km teplota s výškou klesá $0.0065 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$. Tento standart zavedla Mezinárodní organizace pro civilní letectví a smyslem jejího zavedení je možnost jednotné kalibrace tlakových výškoměrů a možnost výpočtu a porovnání letových charakteristik letadel.

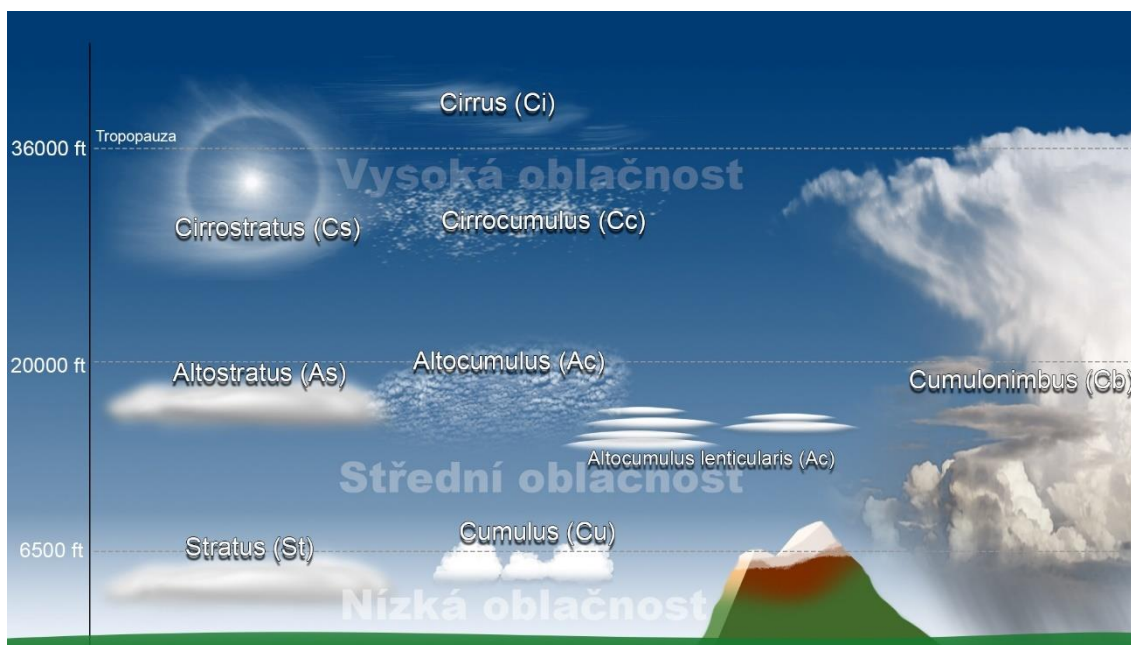
Oblačnost je v letectví opět klíčovým parametrem, udává míru pokrytí oblohy oblaky. Oblačnost je viditelná vodní pára zkondenzovaná na částicích vody, ledu nebo prachu v atmosféře, vzniká kondenzací vzdušné vlhkosti v různých výškách. Hranice, za kterou se plynné skupenství mění v kapalné se nazývá rosný bod. Rosný bod je tedy teplota, kdy dojde k maximálnímu nasycení vzduchu vodními parami, a může tak docházet ke kondenzaci (tj. mezní hodnota, nad kterou obsah vodních par nemůže být vyšší). Teplota rosného bodu je tak zpravidla nižší (či rovna) teplotě vzduchu. Čím větší je rozdíl teploty vzduchu teploty a rosného bodu, tím nižší je relativní vlhkost. Čím vyšší je rosný bod, tím větší je absolutní vlhkost, tedy obsah vodní páry ve vzduchu.

Pro piloty je hodnota rosného bodu klíčová, protože při nízkých teplotách může dojít k namrznání vrtulí, což znamená významnou degradaci výkonu při stejném točivém momentu. Námraza obvykle narůstá velmi rychle, de-facto již v několika sekundách. Námraza mění hmotnost letadla, může posunout těžiště a určitě změní aerodynamické vlastnosti vrtulí. U čtyř-rotorů námraza i na jedné vrtuli znamená prakticky pád stroje, u více-rotorů existuje šance, že bude ještě možné nouzové přistání. Teplotu rosného bodu lze vyčíst ze zdrojů níže pro stanici nejbližší zájmové lokalitě. Piloty bezpilotních systémů zajímá také spodní (a horní) základna oblačnosti a s tím mění se dohlednost. Pokryv oblohy oblačností se udává v osminách (oktas), kdy 0/8 je jasno a 8/8 plně zataženo (Obrázek 12). Ke stanovení horní, ale především dolní základny oblačnosti lze mimo vizuální odhad využít balóny, světlokatory (dříve) nebo ceilometry (dnes). Ceilometr měří tranzitní čas odraženého laserového paprsku a využívá se též ke zjišťování informací o mlze i srážkách. Lze využít metody dálkového průzkumu Země, především pro horní vrstvy s ohledem na jejich rozdílné teplotní poměry.



Obrázek 12. Oblačnost oblohy v osminách udávaná pomocí symbolů. Symboly popořadě reprezentují: jasno, jasno, skoro jasno, malá oblačnost, polojasno, oblačno, oblačno, skoro zataženo, zataženo. Poslední symbol indikuje, že oblačnost nelze rozetnat. Anglické termíny FEW – a few (clouds), SCT – scattered, BKN – broken, OVC – overcast využívá mezinárodní letecká meteorologie a jsou i součástí zpráv METAR/TAF.

Názvy oblačnosti se odvíjejí o jejího vzhledu, vzniku, ale i výšku jejich základny. Oblačnost dělíme zpravidla do třech vrstev podle výšky její základny – nízká (GND až 6500 ft), střední (6500 ft až 20000 ft), vysoká (nad 20000 ft). Jako dálkově řídící piloty vás bude zajímat především nízká oblačnost, nicméně je třeba mít základní povědomí i o horních vrstvách troposféry. Základními typy oblak jsou Stratus, Cumulus. Předpony Alto (střední) a Cirr (vysoká) značí výšku základny oblačnosti (Obrázek 13). Stratus je obvykle šeda kontinuální vrstva oblačnosti tvořená drobnými kapičkami vody. Cumulus je kupovitá oblačnost tvořena kapkami vody. Stratus i Cumulus představují relativně nízké riziko námrazy, avšak již kolem teploty 0 °C, riziko srážek je zde spíše ve formě přeháněk. Zvláštními typy oblačnosti jsou Cirrus, který je tvořen ledovými krystaly; Nimbostratus, rozsáhlý dešťový mrak; a Cumulonimbus, kupovitý dešťový, resp. bouřkový mrak. Cumulonimbus se obvykle rozpíná přes velkou část troposféry, obsahuje vodu ve všech skupenstvích, představuje pro letectví poměrně vysoké riziko kvůli vysokým turbulencím, námraze a silnému statickým náboji¹³.



Obrázek 13. Vrstvy a typy oblačnosti. Zdroj: <https://cz.iviao.aero>.

Pro provozování bezpilotních prostředků jsou stěžejní základní parametry počasí – základna mraků, dohlednost, rychlost a směr proudění vzduchu (včetně nárazů), teplota a rosný bod. Nejvěrohodnějším zdrojem těchto parametrů jsou vlastní pozorování a měření. Ovšem pro plánování letové mise je obvykle potřeba využít meteorologických služeb.

¹³ Kvalitní literaturou na meteorologické téma je např. Dvořák, P. (2017). Letecká meteorologie. Svět křídél.

Zdroje meteorologických informací

V našich podmínkách je optimálním zdrojem těchto informací Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Mimo klasických předpovědí počasí je vhodné využít informací z meteorologických radarů pro stanovení pravděpodobnosti srážek v dohledné době. Pro stanovení základny oblačnosti a dohlednosti je vhodné využít relativně husté sítě webkamer, které poskytují informace téměř v reálném čase o daném místě. ČHMÚ poskytuje i oblastní letové předpovědi pro letiště nebo službu SIGMET (Significant Meteorological Information), která sleduje vývoj počasí s ohledem na bezpečnost letového provozu.

ČHMÚ ale také poskytuje službu předpovědi počasí pro sportovní létání¹⁴. Ta udává základní přehled situace a její předpokládaný vývoj. Dozvíme se informace o základně mraků, dohlednosti i předpovědi rychlosti a směru větru v různých letových hladinách. Smyslem plánování letu je vytvoření ucelené představy o tom, jak bude počasí v nejbližší době vypadat a zhodnotit podmínky pro letovou misi (která může trvat i několik hodin). Kritickými parametry jsou pravděpodobnosti výskytu bouřek, mlh, srážek a kombinace nízkých teplot a vysoké vlhkosti.

Řízení letového provozu ČR poskytuje, resp. řízená letiště zveřejňují informace o počasí v okolí daného letiště. Pilot zde najde informace o rychlosti a směr větru, dohlednosti, oblačnosti, teplotě, rosném bodu apod. Výhoda je ta, že počasí je aktualizováno každou hodinu s platností jedné hodiny. Jedná se tak vždy o aktuální lokální informace. Zpráva METAR (METeorological Air Report) je generována kódově jednoduchým textovým zápisem. Tato informace v sobě ukrývá komplexní informaci o počasí a její výhoda je v tom, že bude po celém světě interpretována stejně. Mimo aktuální letové zprávy o počasí poskytují letiště i krátkodobé předpovědi, tzv. TAF (Terminal Aerodrome Forecast). Jejich zápis a následné interpretace je stejná jako u zpráv METAR¹⁵. TAF je obvykle vydáván jednou za 6 hodin s platností na 12, 24 nebo 30 hodin.

METAR vždy začíná označení letiště (čtyřpísmenný ICAO identifikátor), následuje čas vydání v UTC Zulu¹⁶. Zápis jsou 2 číslice den v měsíci a 4 číslice hodiny a minuty. V případě TAFu následuje informace o době platnosti – 2 číslice den v měsíci, 2 číslice hodina začátku platnosti, 2 číslice hodina konce platnosti, u METARu je tato informace bezpředmětná. Vlastní počasí začíná informací o větru – 3 číslice udávají směr větru (stupně vůči zeměpisnému severu), 2 číslice rychlost větru a jednotka uzly (*knots*), může být doplněno informací o proměnlivosti či nárazech. Další údaj je horizontální dohlednost – 4 číslice v metrech (případně doplnění o směr). Současné počasí je označeno pomocí 2písmenných kódů (viz odkazy) a doplněno informací o množství oblačnosti a výšce její základny. Zápis pokračuje informací o teplotě a tlaku, může být doplněn o stavu letištních drah či nepravidelných změnách počasí. Zápis obvykle končí poznámkou o regionálním tlaku. V praxi tedy např. takto: METAR LKPR 071030Z VRB02KT 9999 FEW038 08/M01 Q1020 NOSIG RMK REG QNH 1016=.

¹⁴ <https://www.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/letecke/sportovni-letani>.

¹⁵ Existují webové služby, které dekódují zápisy zpráv METAR a TAF do grafické podoby. Jednou takovou službou je <https://metar-taf.com>, která dekóduje zprávy pro všechny letiště světa.

¹⁶ Koordinovaný světový čas (Coordinated Universal Time, UTC) je definice času (teoreticky) nezávislá na rotaci Země odvozena od mezinárodního atomového času (Temps Atomique International). Jedná se o souřadnicový čas, jednotlivá pásma jsou definována odchylkami od UTC. V ČR je dán jako UTC+1 (při zimním času) a jako UTC+2 (při letním času).

Letiště často vysílají na vysokých či velmi vysokých frekvencích i automatizované strojově čtené zprávy o počasí nebo informace o provozu na letových drahách. Informace je vysílána zpravidla nepřetržitě. Rozlišit lze dva druhy, prvním je komplexní informace o letišti jako takovém včetně informací o počasí, tzv. ATIS (Automatic Terminal Information Service). Druhým typem jsou vysílané informace pouze o počasí, tzv. VOLMET (z *francouzštiny flight weather*). Informace jsou volně dostupné, poslouchat je lze leteckou vysílačkou nebo jsou dostupné i online. Informace o frekvencích lze nalézt ve VFR příručce. Letiště Ruzyně (LKPR) vysílá ATIS nepřetržitě na frekvenci 122,160 MHz, lze ho ale odposlechnout i online.

Na strukturu automatické zprávy ATIS se lze podívat níže. První je informace o letišti jako takovém, přibližovací proceduře, používané dráze a případné další relevantní informace (např. překážky), jedná se o zprávu NOTAM. Následuje zpráva METAR včetně meteorologických fenoménů (déšť apod.). Zpráva je obvykle zakončena časovou značkou a specifickými informacemi (např. o omezení rychlosti). Každé letiště má vlastní ATIS. Účelem této zprávy je ušetření opakování informací řídicím pracovníkem věže – TWR. ATIS má obvykle platnost, dokud nedojde k zásadní změně (dráhy, počasí atd.).

Příklad automatizované zprávy ATIS:

```
GOOD MORNING RUZYNE ATIS INFORMATION G 08 44 ILS APPROACH RUNWAY IN USE 24 TRANSITION  
LEVEL 70 RWY 12 30 CLOSED METAR PRAHA ISSUED AT 08 30 WIND 070 DEGREES 3 KNOTS VARIABLE  
BETWEEN 010 AND 130 DEGREES VISIBILITY CAVOK TEMPERATURE 13 DEWPOINT 9 QNH 1013  
HECTOPASCALS NOSIG TWR LKPR ARR/DEP ATIS G 0844Z EXP ILS APP ARR RWY 24 DEP RWY 24 TA  
5000 YOU HAVE RECEIVED ATIS INFORMATION G
```

Tradičně dobrým zdrojem o stavu počasí a krátkodobé předpovědi je aplikace Windy¹⁷, specializovanou aplikací je pak UAV Forecast¹⁸. Obě služby jsou poskytovány jako webové i mobilní pro iOS i Android. UAV Forecast má jako cílovou skupinu dálkově řídicí piloty, aplikace umožňuje nastavit limity pro jednotlivé meteorologické parametry s ohledem na zamýšlený typ letadla nebo účel sběru dat.

¹⁷ <https://www.windy.com>

¹⁸ <https://www.uavforecast.com>

5. Legislativní rámec provozu

Současná legislativa provozu UA se ve členských státech Evropské Unie řídí Nařízením komise (EU) 2019/945 o bezpilotních systémech a o provozovatelích bezpilotních systémů ze třetích zemí¹⁹, resp. Prováděcím nařízením Komise (EU) 2019/947 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel²⁰. Vzniku těchto nařízení předcházelo obecnější nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví²¹. Jednotná evropská legislativa přináší sjednocení pravidel provozu UA v členských státech EU s důrazem na bezpečnost letového provozu, zdraví a majetku, ochranu soukromí, ale i životního prostředí. Těž je jejím cílem ujasnit a zjednodušit pravidla pro pohyb UA a transport zboží i osob. Prováděcím nařízením komise (EU) 2021/664²² zavádí nový typ vzdušného prostoru, tzv. U-space²³. Evropská společná legislativa vešla v platnost 31. 12. 2020. Tvůrcem legislativy je Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví. V České republice je implementována Ministerstvem dopravy, resp. Úřadem pro civilní letectví. ÚCL je zde tak v roli regulátora.

Kategorie provozu

Zavedeny jsou tři kategorie provozu dle předpokládané míry rizika, a to Otevřená, Specifická a Certifikovaná. Mimo kategorie provozu zavádí nově i třídy UA, tzv. štítky C0-C6. Třídy UA jednak obecně odrážejí MTOW letadla následovně: C0 <250 g, C1 <900 g, C2 <4 kg, C3 <25 kg, C4 <25 kg (pro modely letadel), případně definují způsob provozu: C5 a C6 dle standartních scénářů STS v rámci Specifické kategorie provozu.

¹⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0945&from=CS>

²⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0947&from=CS>

²¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018R1139&from=CS>

²² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32021R0664>

²³ <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-u-space-regulation-eu-2021664>

Otevřená kategorie

Otevřená kategorie uvažuje nejmenší míru rizika provozu UA. Jedná se tak o základní kategorii, do které spadne většina uvažovaného provozu. Otevřenou kategorii lze dále rozdělit na tři dílčí podkategorie (A1, A2, A3). Podkategorie reflektuje bezpečnost zamýšleného druhu provozu, MTOW letadla a provozní charakteristiky. Oproti původní legislativě (Doplněk X Leteckého předpisu L2) současná legislativa nerozlišuje komerční, vědecko-výzkumný a sportovně-rekreační provoz. Otevřená kategorie obvykle nevyžaduje předchozí povolení ÚCL (v ČR existují výjimky), ani prohlášení provozovatele UAS (s ohledem na související rizika).

V otevřené kategorii nehledě na podkategorii provozu platí shodně omezení maximální letové hladiny na 120 m AGL. Je též nutná registrace provozovatele letadla u ÚCL²⁴. Podkategorie provozu A1 a A3 vyžadují po pilotech absolvování online výcvikového kurzu a splnění zkuškového testu. Pilot je též povinen se seznámit s uživatelskou příručkou letadla a postupy provozovatele UA. Podkategorie A2 vyžaduje po pilotovi navíc praktický výcvik a absolvování testu z rozšířené teorie fyzicky na ÚCL. Pilot komunikuje s ÚCL skrze online portál na Profilu pilota²².

Povinností pilota ve všech podkategoriích je označit všechna letadla uvedená do provozu registračním číslem provozovatele (označení členského státu a 12 alfanumerických znaků). V podkategorii A2 a A3 je provozovatel také povinen zajistit informování všech osob zapojených do provozu přítomných v oblasti provozu o rizicích a jejich výslovného souhlasu se svou přítomností. Ve všech podkategoriích platí provoz typu VLOS.

Podkategorie A1 je určena pro letadla do MTOW <0.9 kg, uvažuje tedy provozu UA tříd C0 a C1. Lze létat kdekoli s výjimkou letů nad shromážděními osob nebo prostorů, které byly státem omezeny/zakázány zavedením omezení letů dronů prostřednictvím geozón či dalších opatření, viz Obrázek 14. Platí povinnost plánování letu za pomoci pravidla 1:1 (výška:radius), nepřelétávat nezapojené osoby a současně předem vyznačit svůj let v hustě osídleném prostoru v digitální mapě (zřízené v souladu s Článkem 15 Prováděcího nařízení).

OPEN CATEGORY SUBCATEGORY A1

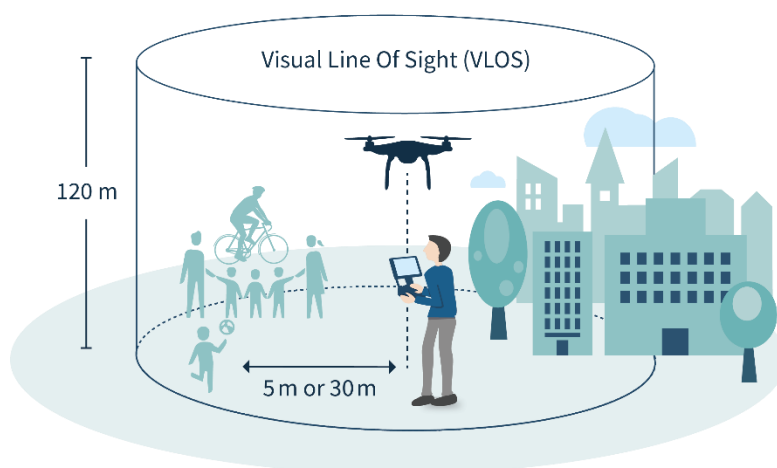


Obrázek 14. Provoz podkategorie A1. Zdroj: <https://www.flynex.io>.

²⁴ <https://dron.caa.cz>

Podkategorie A2 je určena pro letadla do MTOW <4 kg, uvažuje tedy navíc provoz UA třídy C2. A2, resp. C2 umožňuje lety mj. v zastavěném území, nicméně je nutné dodržovat bezpečnou vzdálenost od osob nezapojených do provozu. Minimální vzdálenost by měla být rovna výšce, ve které dron právě letí s tím, že tato vzdálenost nesmí být menší než 30 m (5 m s využitím nízko-rychlostního režimu), viz Obrázek 15. Přelétávání shromáždění osob je též zakázáno.

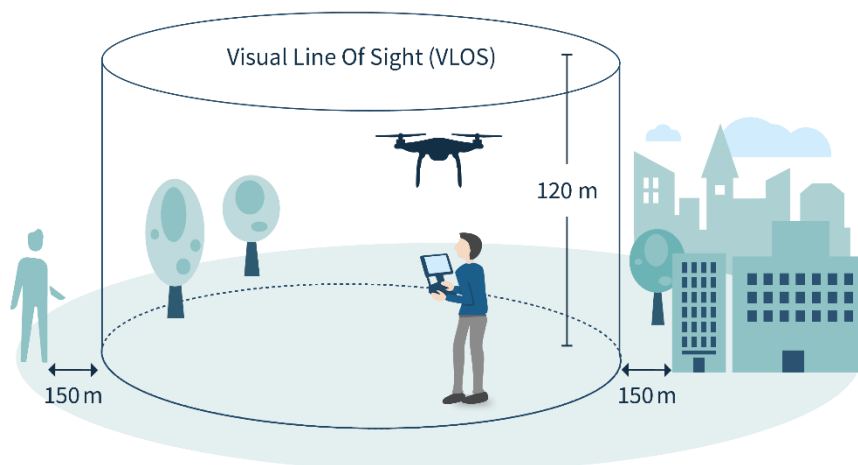
OPEN CATEGORY SUBCATEGORY A2



Obrázek 15. Provoz podkategorie A2. Zdroj: <https://www.flynex.io>.

Podkategorie A3 je určena pro letadla do MTOW <25 kg, uvažuje tedy navíc provoz UA tříd C3, C4 a soukromě zhotovené drony do 25 kg. Lety v A3 nemohou být provozovány v zastavěném území a je nutné udržovat dron nejméně 150 m od rezidenčních, komerčních nebo průmyslových prostorů a létat pouze v oblastech, kde se nenachází žádné nezapojené osoby v okruhu, v němž může být dron provozován, viz Obrázek 16.

OPEN CATEGORY SUBCATEGORY A3



Obrázek 16. Provoz podkategorie A3. Zdroj: <https://www.flynex.io>.

V rámci provozu UA v otevřené kategorii lze žádat ÚCL o udělení Oprávnění k letu v případě, že je zamýšlený provoz v konfliktu s vyhlášenými zeměpisnými zónami (geozóny)²⁵ či jinými provozními opatřeními. Mimo papírových formulářů lze o výjimku žádat i skrze Portál provozovatele. Podání žádosti je správním řízením a podléhá správnímu řádu, v tomto případě je řízení bez správního poplatku.

Specifická kategorie

Do specifické kategorie se dostane vždy, když zamýšlíte překročit některý z limitů stanovených v otevřené kategorii. Provoz zde vyžaduje povolení příslušného úřadu (v případě ČR např. Oprávnění k provozu vydané Úřadem pro civilní letectví) před uskutečněním provozu, s uvážením zmírňujících opatření identifikovaných v posouzení provozního rizika. K posouzení rizika slouží metodika SORA²⁶ (Specific Operations Risk Assessment), která mj. prostřednictvím Specifické úrovně integrity a zabezpečení (SAIL) slučuje dohromady analýzu rizik na zemi a ve vzduchu a představuje úroveň jistoty. Mimo metodiku SORA lze rizika posoudit pomocí institutu tzv. předdefinovaného posouzení rizika²⁷ (PDRA, Pre-Defined Risk Assessment) či deklarace provozu ve standardních scénářích (STS), publikovaných agenturou EASA. V oblasti provozních oprávnění lze v současné době dosáhnout i Osvědčení provozovatele lehkých UAS (LUC), jež umožní provozovateli realizovat schvalování vlastního provozu.

ÚCL vydal směrnici²⁸ pro posouzení rizika specifické kategorie provozu (SORA), která definuje postup provozovatele k podání žádosti na vydání Oprávnění k provozu (OkP) ve specifické kategorii. Jedná se o následující agendu:

- Žádost o vydání OkP spolu s
 - Přílohou dle bodu 3.5,
 - Přílohou dle bodu 3.6,
 - Deklarací o ochraně osobních údajů,
 - Provozní příručkou,
 - Provozní koncepcí (ConOps).

Podání žádosti je správním řízením a podléhá správnímu řádu, v tomto případě se jedná o řízení se správním poplatkem. Vydání OkP se řídí článkem 12 Prováděcího nařízení 2019/947. Kategorie specifická předpokládá provoz s letovou hladinou nad 120 m AGL, provoz BVLOS, vstup do vypsáných zón (např. CTR), vstup do území chráněných jiným zákonem (např. národní parky) nebo ochranných pásem. Specifická kategorie uvažuje také tzv. kontejnment dle článku 11 Prováděcího nařízení.

Od 1. 1. 2024 je povinností provozovatele vybavit UA provozované ve specifické kategorii dálkovou identifikací provozovatele (Remote-ID).

²⁵ <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/zemepisne-zony>

²⁶ <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/specific-category-civil-drones/specific-operations-risk-assessment-sora>

²⁷ <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/specific-category-civil-drones/predefined-risk-assessment-pdra>

²⁸ <https://www.caa.cz/news/uverejneni-smernice-sora-uas>

Certifikovaná kategorie

Certifikovaná kategorie předpokládá provoz pokročilejších technologií, které jsou pro provoz certifikovány. Znamená to, že EASA, resp. NAA budou vstupovat jako kontrolní orgán do procesu návrhu a výroby letadla, aby splňovala nutné vlastnosti pro udělení certifikace (obdobně jako je tomu u pilotovaných letadel). Předpokládá se pro provoz letadel převážející zboží nebo i osoby. Kategorie by měla být vyhrazena např. pro záchranné operace nebo průmyslové aplikace. Provoz by měl být uskutečňován ve vzdušném prostoru U-space. V současné době probíhá pouze testovací provoz.

Národní specifika

Každý členský stát může do společné evropské legislativy vnést národně-specifické omezení, která se budou vyžadovat na území daného státu. Česká republika uplatňuje dodatečnou územní ochranu, resp. podle článku 15 zachovává stávající územní ochrany České republiky, veřejným vyhlášením ÚCL opatření obecné povahy, kterým se zřizuje na celém území ČR omezený prostor LKR10-UAS²⁹.

Předmětem opatření LKR10 je dodatečná úprava provozu bezpilotních letadel:

- v řízených okrcích a letištních provozních zónách,
- v zakázaných, omezených, nebezpečných a aktivovaných dočasných prostorech,
- v hustě osídlených prostorech,
- v ochranných pásmech stanovených příslušnými právními předpisy:
 - podél dopravní a technické infrastruktury,
 - uvnitř zvláště chráněných území,
 - v okolí vodních zdrojů,
 - objektů důležitých pro obranu státu,

a dále dodatečná národní úprava:

- stanovených meteorologických minim,
- žádoucího souladu s jinými právními předpisy,
- podmínek použití zvláštních druhů pohonu.

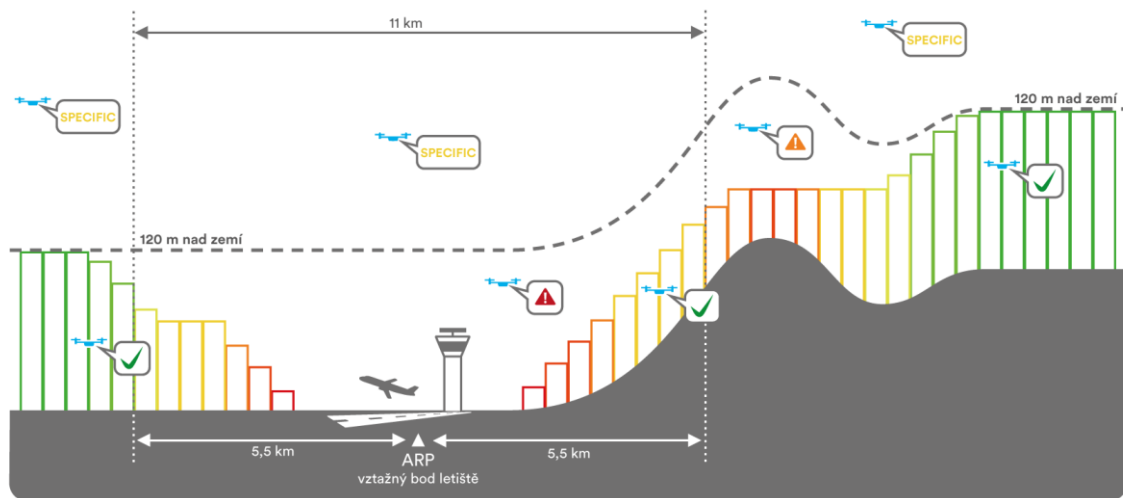
Pro pochopení národních specifik je nutné prostudovat [vyhlášené OOP](#), kde jsou konkrétně rozepsána výše uvedená omezení. Ideální zdrojem je též portál <https://letejtezodpovedne.cz> provozovaný ŘLP.

²⁹ <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/zemepisne-zony/blizsi-informace-k-omezenemu-prostoru-lkr10-uas>

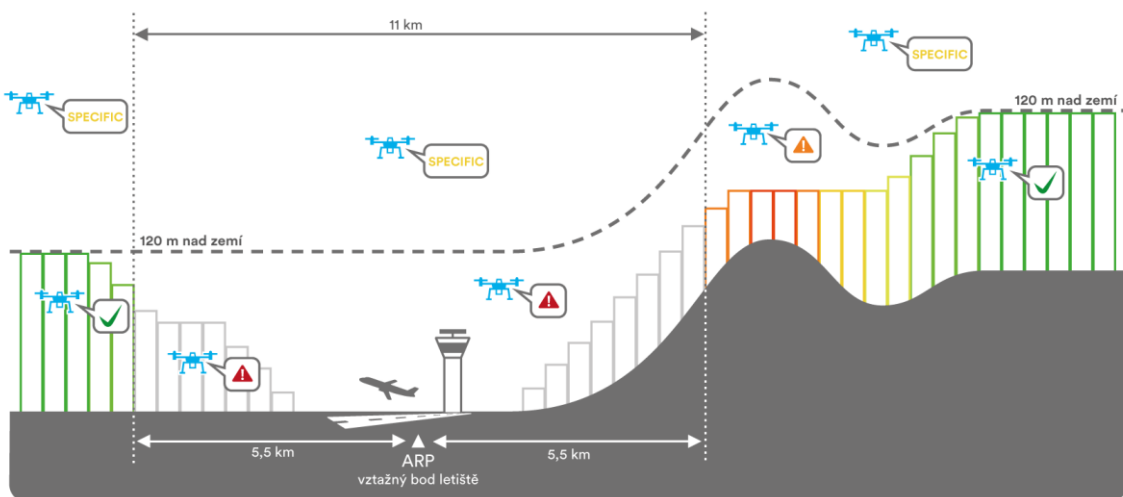
Pohyb v prostoru řízených letišť

V prostorech (M)CTR je nutné se seznámit s polohou vztažného bodu (ARP), od kterého je definované ochranné pásmo v kružnici o poloměru 5,5 km. V celém (M)CTR je dostupná vrstva gridů, které vymezují maximální letovou hladinu dané buňky gridu. Při pohybu UA v prostorech (M)CTR záleží na MTOW letadla ($UA < 0,91 \text{ kg} < UA$). Létání uvnitř 11 km pásma je možné pouze za koordinace s příslušným stanovištěm ŘLP, případně i provozovatelem letiště, viz Obrázek 17.

Pravidla provozu dronů vážících **do 0,91 kg** v blízkosti letiště (CTR a MCTR)



Pravidla provozu dronů vážících **více než 0,91 kg** v blízkosti letiště (CTR a MCTR)



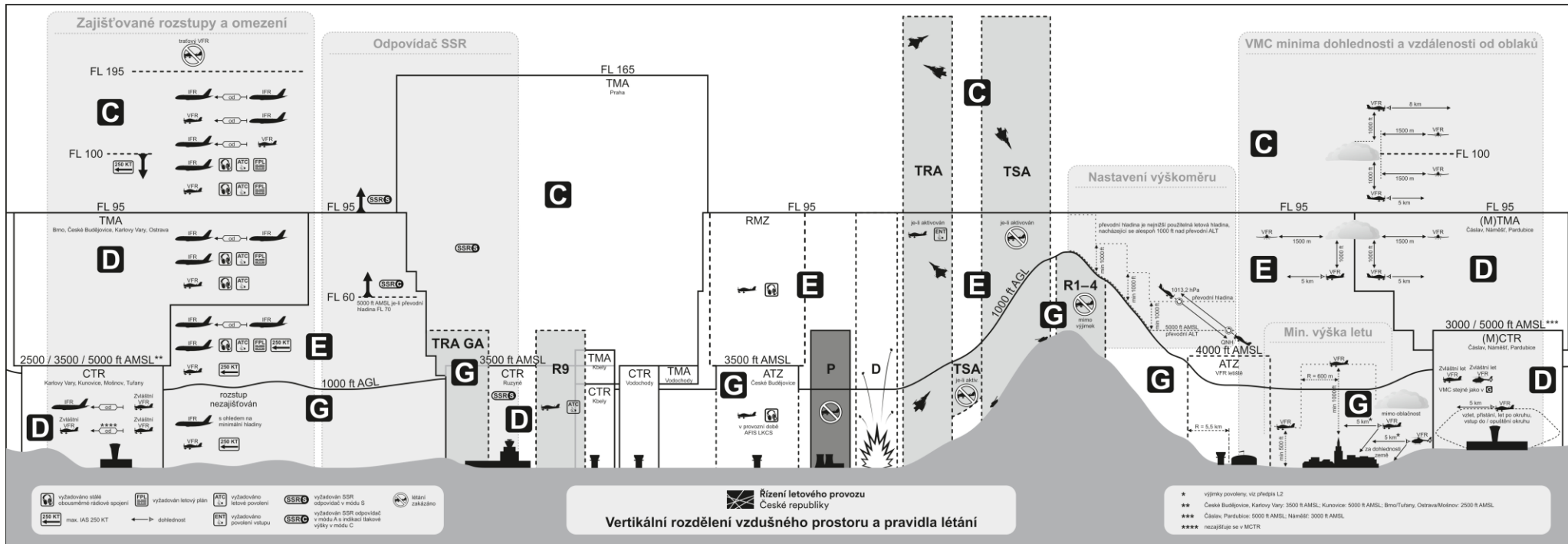
Obrázek 17. Pohyb UA v řízeném okrsku. Zdroj: letejtezodpovedne.cz.

Členění vzdušného prostoru

Předletová příprava je důležitým krokem k hladkému průběhu letové mise. Příprava vyžaduje znalost současné legislativy, základní orientaci ve vzdušných prostorech ČR a schopnost čtení v letecké mapě (Obrázek 19). Je také třeba vzít na vědomí, že provoz UA je možný pouze za pravidel letu VFR a typu provozu VLOS. Existují dvě pravidla letu, Instrument Flight Rules – IFR a Visual Flight Rules – VFR, tedy lety dle přístrojů a lety dle viditelnosti. Zatímco IFR (výškoměr, rychloměr, ukazatel kurzu a polohy aj.) využívají dopravní letadla, lety dle vidu využívají přístroje jenom jako podporu pro rozhodování, nicméně primárním zdrojem dat jsou oči, resp. výhled. Na to navazují dva základní typy provozu, Visual Line Of Sight – VLOS a Beyond Line of Sight – BLOS (existují i jejich případné varianty). Režim provozu VLOS vyžaduje trvalý a nepřetržitý vizuální kontakt pilota s prostředkem, zatímco BLOS umožňuje využití dalších technických zařízení (např. FPV kamer). Zvláštním případem je EVLOS, kdy pilot využije zapojených a poučených osob, se kterými je v trvalém spojení, aby si prodloužil dohled za překážku.

Při plánování mise – zakázky je primární vědět, kde se nachází zájmová lokalita. Znalost této informace musí být mj. konfrontována s omezeními plynoucími z LKR10. Typicky se jedná o provoz v blízkosti letišť, uvnitř ochranných pásem, v blízkosti hustě osídlených prostorů (HOP) apod. Mimo horizontálních regulací je možná i regulace vertikální (Obrázek 18). Standardně se lze s UA pohybovat ve vzdušném prostoru třídy G do 120 m AGL, avšak v některých případech je vertikální hranice stanovena jako 1500 m AMSL či 80-100 m AGL. Identifikací těchto omezení si pilot musí být jistý.

Vzdušný prostor třídy G se nachází nejnižší, jeho vertikální hranice je stanovena jako GND-1000 ft AGL. V případech, kdy provozujete UA v řízeném okrsku se můžete dostat do vzdušného prostoru třídy D, případně třídy E, když byste se pohybovali v letištní provozní zóně. Na obrázku níže (Obrázek 18) je třeba si uvědomit, jakou souvislost spolu mají vzdušné prostory jednotlivých tříd a vyhlášené prostory.



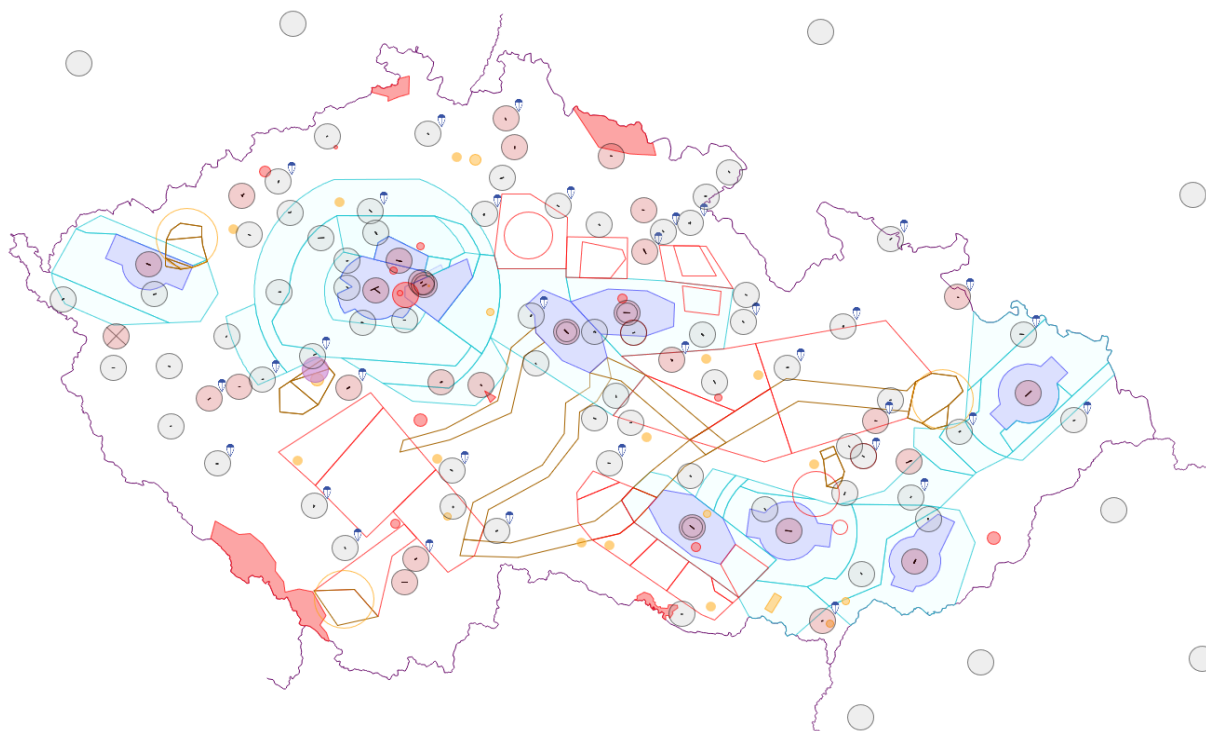
Obrázek 18. Vertikální členění vzdušného prostoru ČR. Zdroj: <https://aim.rlp.cz>.

Vyhlášené prostory jsou součástí horizontálního členění vzdušného prostoru, proto je nutná kontrola omezení vzdušného provozu v dané lokalitě. K tomu slouží letecká mapa ICAO (Obrázek 19)³⁰, ve které je pilot schopen identifikovat permanentní i dočasné omezení vzdušného provozu. Jedná se o pět základních typů prostorů, viz Tabulka 2.

Tabulka 2. Základní typy vyhlášených prostorů.

PA (LKP)	Zakázaný prostor	Prohibited Area,
RA (LKR)	Omezený prostor	Restricted Area,
DA (LKD)	Nebezpečný prostor	Dangerous Area,
(LK)TSA	Dočasně vyhrazený prostor	Temporary Segregated Area,
(LK)TRA	Dočasně rezervovaný prostor	Temporary Reserved Area.

Jak již název napovídá, v zakázaném prostoru nesmí probíhat let za žádných okolností. Typicky se jedná o oblasti, resp. objekty, které vyžadují ochranu – např. jaderné elektrárny. Omezený prostor umožňuje let provést za určitých podmínek, které jsou specifické pro každou oblast. Nebezpečné prostory slouží k ochraně letadel, let je zde nedoporučen. Všechny tyto prostory jsou trvalé. Dočasně vyhrazený a dočasně rezervovaný prostor je aktivován zpravidla k vojenskému využití (střelbě či přeletu), let je zde zakázán (v TRA je možná koordinace). Dočasné prostory mají stálá vyznačení v mapě, avšak k jejich aktivování dojde na vyžádání a je proto třeba vždy ověřit, zdali pro nás představují omezení.



Obrázek 19. Letecká mapa ICAO s vyznačenými letišti (šedá kružnice s dráhou, červená kružnice značí přiřazený NOTAM), zakázané/omezené/nebezpečné prostory (červené vyplněné polygony), a dočasně vyhrazené/rezervované prostory (červené a hnědé polygony, v případě jejich výplně došlo k přiřazení AUP), prostory kolem řízených letišť (modré a fialové polygony). Zdroj: <https://aisview.rlp.cz>.

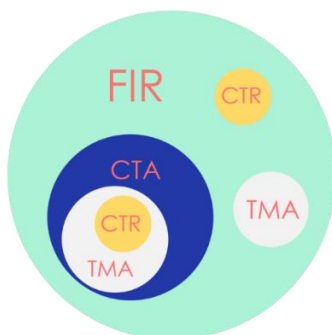
³⁰ Letecké mapy jiných zemí jsou v gesci národních leteckých úřadů. Pro zajímavost takto vypadá ICAO mapa v Itálii (<https://www.deskaeronautico.it/mappa>) nebo Španělsku (<https://insignia.enaire.es>).

Se čtením letecké mapy je nutné znát ještě význam dalších permanentních prostorů, které vyznačují oblasti řízených či neřízených letišť³¹, koncových či řízených oblastí nebo letové informační oblasti (Obrázek 20). FIR značí veškerý vzdušný prostor nad daným územím, u nás se jedná o FIR Praha (tj. LKAA), který je horizontálně vyměřen hranicí státu a vertikálně sahá do hladiny FL660. V letectví se vertikální vzdálenosti uvádějí pomocí zkratky FL – Flight Level. Hodnota je uvedena ve stovkách stop, tedy zmíněný FL660 je letová hladina 66000 stop, tj. ca 20 km.

FIR poskytuje letovou informační a pohotovostní službu. Řízená oblast poskytuje navíc službu řízení letového provozu. LKAA se dělí do pěti dílčích CTA (CTA 1 Praha, CTA 2 Praha, CTA Brno, CTA Ostrava a CTA Karlovy Vary). Koncová řízená oblast slouží k ochraně přílezu a odletů, proto ji lze nalézt kolem (řízených) letišť. Skládá se obvykle z více částí – čím blíže je letišti, tím níže má spodní hranici. V ČR je pět civilních a čtyři vojenské koncové řízené oblasti. Řízený vzdušný prostor (CTR) chrání letištní provoz u řízených letišť, zatímco ATZ neřízená letiště. Níže je uveden přehled prostorů (Tabulka 3).

Tabulka 3. Permanentní oblasti vzdušného prostoru.

FIR	Flight Information Region	Letová informační oblast
CTA	Control Area	Řízená oblast
TMA	Terminal Control Area	Koncová řízená oblast
MTMA	Military Terminal Control Area	Vojenská koncová řízená oblast
CTR	Control Zone	Řízený okrsek
MCTR	Military Control Zone	Vojenský řízený okrsek
ATZ	Aerodrome Traffic Zone	Letištní provozní zóna



Obrázek 20. Schématického členění vzdušných prostorů.

³¹ Řízená letiště disponují službou řízení letového provozu. V ČR se jedná o letiště Letiště Václava Havla Praha, Letiště Brno-Tuřany, Letiště Leoše Janáčka Ostrava, Letiště Vodochody, Letiště Kunovice, Letiště Karlovy Vary, Letiště Pardubice.

Veškeré podrobnosti o těchto prostorech jsou k dispozici v Letecké informační příručce – AIP nebo Visual Flight Rules příručce – VFR. Zde se je možné také dozvědět kontakty na provozovatele či majitele neřízených letišť, radiové frekvence pro spojení se s obsluhou řízených letišť a dalších informace o letištích. Tyto informace také poskytuje Databáze letišť³². Mimo papírové letecké mapy ICAO je možné využít digitální verzi (AisView)³³ na webu Řízení letového provozu. AisView je také dostupný jako mobilní aplikace³⁴. Ve zjednodušené verzi funguje také služba DroneView³⁵ určená pouze pro operátory bezpilotních systémů.

V praxi se můžete mimo zmíněné prostory potkat ještě s plochou pro vzlet a přistání sportovních leteckých zařízení (SLZ) nebo modelářskými letišti. Oba typy letišť budou mít svého provozovatele a případně i vlastní pravidla létání. Ta je třeba dodržovat a v případě potřeby kontaktovat provozovatele. Plochy SLZ jsou zanesené v letecké mapě. Modelářské letiště dohledáte např. na mapy.cz, případně veškeré modelářské plochy jsou zaneseny též v RC mapě³⁶.

Pro kontrolu omezení plynoucích z omezení vzdušného prostoru je vhodné využít aplikaci DronView od ŘLP. DronView zobrazuje pouze prostory, do kterých se můžete legálně dostat při provozování UA. Mimo prostorů jsou CTR a ATZ se dozvíte i o prostorech SLZ (Obrázek 21). Aplikace je interaktivní, po kliknutí na zvolenou zónu dostanete informace o AUP a NOTAM i dalších podmínkách provozu UA. Můžete se podívat i do AIP/VFR na konkrétní zónu. Patrné z obrázku níže jsou i tzv. gridy. Jedná se o bližší výšková omezení provozu UA v řízených okresech. Hodnota v každém gridu značí maximální letovou hladinu UA v metrech AGL. Svůj plánovaný let UA je možné v aplikaci zaregistrovat (symbol kvadrokoptéry níže), čímž o sobě dávat vědět ostatním pilotům a potencionálně tak přispíváte ke zvýšení bezpečnosti leteckého provozu.

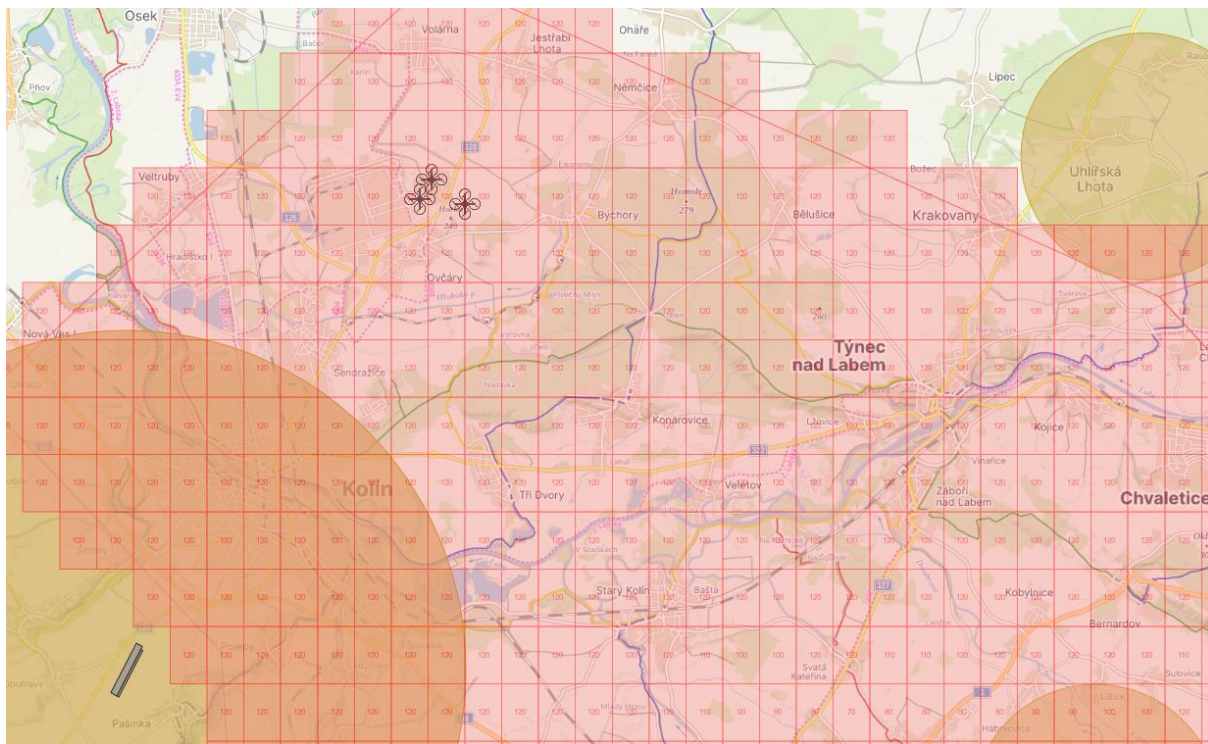
³² <https://www.dl.cz>

³³ <https://aisview.rlp.cz>

³⁴ <https://play.google.com/store/apps/details?id=cz.foxtrot.aisview>
<https://apps.apple.com/us/app/aisview/id1438343345>

³⁵ <https://dronview.rlp.cz>

³⁶ www.rcmapy.cz



Obrázek 21. Náhled do aplikace DronView s patrnými gridy.

6. Plánování letové mise

Předletová příprava

Během předletové přípravy je nutné vzít v potaz rozdílné aspekty letové mise. Operátor bezpilotních systémů by měl při plánování letové mise vždy vzít v potaz podmínky provozu v místě letu, meteorologické podmínky a fenomény, letovou způsobilost a zdravotní stav dalších pilotů na misi, ale i dostupnost minimálního vybavení. Pilot vždy odpovídá za průběh letu, a to včetně nepředvídatelných skutečností. Proto zde platí, že neexistuje přehnaná opatrnost – vždy je třeba mít na mysli bezpečnost.

První věc, kterou pilot kontroluje, jsou regulativy v místě letu. Základním zdrojem informací je letecká mapa ICAO (AisView/DroneView) a příručky AIP a VFR. Zde lze zjistit, zda v dané lokalitě vůbec mohou létat či za jakých podmínek. V případě potřeby se zažádá o potřebná povolení. Vždy je potřeba mít jasnou představu o místě vzletu a přistání. Zároveň je potřeba si vyžádat stanoviska a povolení, pokud by se měl let odehrávat na zvláštních územích (např. maloplošná a velkoplošná chráněná území, ochranná pásma apod.). S ohledem na legislativu je třeba žádat oprávněný orgán (např. správce infrastruktury) o vydání stanoviska k zamýšlenému provozu a s tím žádat ÚCL o povolení letu, viz kapitola Legislativní rámec provozu. Při plánování je třeba vzít v potaz, že povolení nejsou samozřejmostí a jejich vystavení může trvat i několik týdnů. Pro konkrétní lokalitu je také vhodné zkontrolovat využití vzdušného prostoru. ŘLP vydává Plán využívání vzdušného prostoru České republiky (AUP). Zde je uvedena informace o využití konkrétního prostoru v daném časovém období. V případě využití klasické letecké mapy ICAO se v AUP dozvíme aktuální aktivaci či rezervaci prostorů.

Samozřejmostí je kontrola počasí včetně předpovědi, viz kapitola Letecká meteorologie. Méně běžné, ale také důležité je kontrola stavu elektromagnetických jevů. UAS jsou vybaveny magneticky citlivou elektronikou a působení vůči magnetickému poli může mít negativní důsledky na provoz UAS. Hrozí poškození řídicí jednotky, kompasu a dalších senzorů. Činnost těchto senzorů může být ovlivněna změnami magnetického pole Země, zvýšenou aktivitou Slunce, magnetickou bouří nebo solárním větrem. Pilot by měl před vzletem zkontrolovat tyto jevy a zhodnotit jejich vliv na letovou misi např. skrze data Národního úřadu pro oceán a atmosféru (NOAA)³⁷.

Pilot velitel je zodpovědný za stav a způsobilost dalších pilotů operátorů na misi. Pilot nesmí umožnit řízení UA osobě, která nemá adekvátní osvědčení. Mimo to pilot velitel zodpovídá i za zdravotní stav dalších pilotů operátorů. V případě zjištění pochybností je vždy lepší letovou misi přerušit či zajistit odpovědnější operátory. Pilot kontroluje mimo členů i doklady UA a doklady pilotů, platnost pojištění, záznamy o závadách a opravách, letový deník, povolení a stanoviska dotčených orgánů a úřadů. Před zahájením letu je vždy vhodné zajistit – připravit minimální vybavení. V tomto případě se jedná především o výstražné tabule, lékárničku, hasicí přístroj a podobné předměty, které napomohou k hladkému průběhu mise nebo k řešení nenadálých událostí.

³⁷ <http://www.n3kl.org/sun/noaa.html>

Zásady plánování mise

Vlastní plánování letové mise, tj. projektování trajektorií letu UA nad konkrétním územím může probíhat předem, ale obvykle se tak stane až po příjezdu na lokalitu a zhodnocení podmínek a překážek v místě letu. Dle typu řídicí jednotky (a operačního systému) probíhá projektování letu ve specializovaném software, např. Mission Planner, Pix4DCapture, senseFly eMotion, DJI GS Pro, UgCS, FreeFlight, DroneDeploy, Litchi. Běžná je kompatibilita se systémy Windows, Android a iOS. Některé UAS lze ovládat s využitím řídicí stanice (tj. např. laptop s radio-modemem), jiné vyžadují chytré zařízení v podobě telefonu či tabletu. Nabídka software je široká, obzvláště pro populární sportovní a hobby UA. Volba ovládacího SW může ovlivnit letové vlastnosti a tím spolehlivost letu. Je třeba mít na paměti, že pilot zodpovídá za průběh letu neohledně na úroveň automatizace procesů.

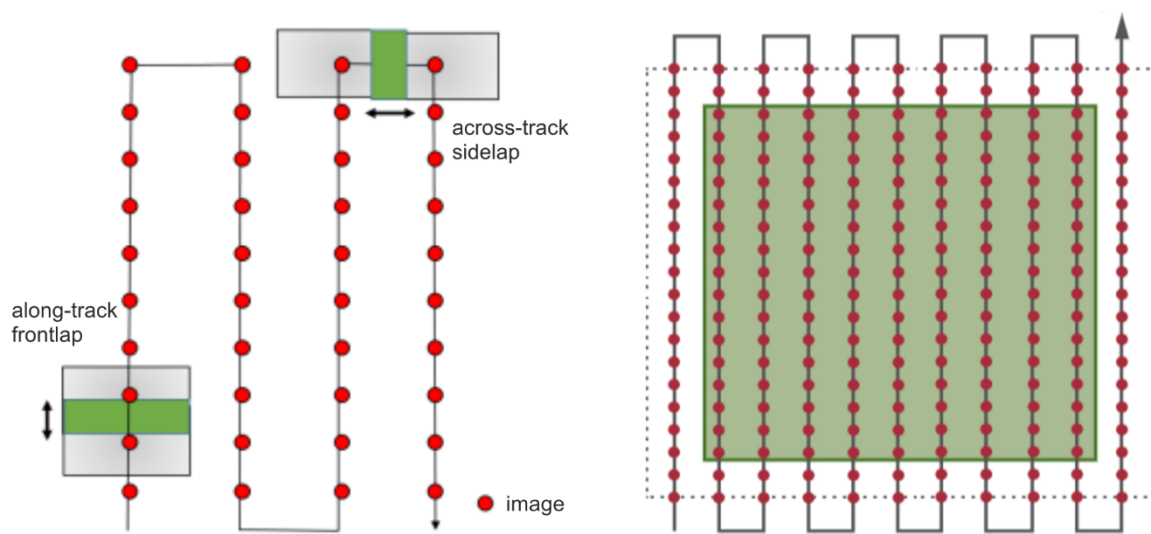
Při plánování letové mise je potřeba znát zvolenou lokalitu s ohledem na výskyt nejruznějších vertikálních a horizontálních omezení způsobené např. ochrannými pásmy či chráněnými objekty apod. Důkladné plánování zabezpečí hladký průběh letové mise – v ČR je téměř 90 letišť, které vás mohou překvapit svým letovým provozem. Pilot si musí být vědom také všech zákonných omezení – LKR10 se odkazuje na další relevantní zákony. V našem případě půjde mimo jiné o zákony 114/1992 Sb., 289/1995 Sb., 254/2001 Sb., 361/2000 Sb., 458/2000 Sb., které mohou omezit provoz bezpilotních systémů nejčastěji ve smyslu ochranných pásem, viz např. také [zde](#)³⁸.

Největší riziko během plánování mise je opomenutí vertikálních překážek – v české krajině je velké množství telekomunikačních prvků a technické infrastruktury (např. vedení nízkého či vysokého napětí). Správně zvolená letová hladina je klíčem k hladkému průběhu mise. V případě špatně naplánované mise či pochybení řídicí jednotky musí mít pilot vždy možnost zasáhnout do průběhu letové mise. Převzetí řízení nebývá častým jevem, ale riziko jeho nutnosti je tu vždy. Proto musí pilot sledovat UA po celou dobu letu a být připraven na výskyt nenadálé události.

Horizontální vzdálenosti od osob, budov a HOP definuje mj. LKR10. Hodnoty je třeba zohlednit, a to i s rezervami – např. poloměr otáčení křídla či směr a rychlost proudění vzduchu. Vertikální vzdálenosti se mohou lišit podle zvolené letové hladiny ve vztahu k topografii terénu. Většina UA pracuje s tzv. výškou nad místem vzletu (*Above Take-Off*, ATO), řídicí jednotka zafixuje letovou hladinu nad místem vzletu a ta zůstává konstantní po celou dobu letu. To může působit řadu nepříjemností, pokud pracujeme ve vertikálně členitém terénu, proto lze u některých UA nastavit hladinu letu nad terénem (AGL nebo také *Above Elevation Data* – AED). Řídicí jednotka pracuje s výškovým modelem terénu a letovou hladinu udržuje konstantní vůči reliéfu. To může být klíčové nejen pro udržení bezpečnosti, ale také pro zachování konstantních překryvů při pořizování obrazových dat. Využit lze také někdy stanovení letové hladiny pomocí nadmořské výšky (*Above Mean Sea Level*, AMSL) a pracovat tak s absolutními hodnotami.

³⁸ https://letejtezodpovedne.cz/content/documents/Ochranna_pasma.pdf

Pro získání dat validních pro kvazi-fotogrammetrické zpracování, je nutné pořizovat snímky s dostatečnými překryvy (Obrázek 22). Stejně jako v letecké fotogrammetrii lze rozlišit překryvy ve směru letu (along-track, frontlap) a překryvy sousedních letových linií (across-track, sidelap), ovšem oproti leteckému snímkování jsou hodnoty překryvů pro UA snímky vyšší, především u sousedních linií. Hodnoty se odvíjí od topografie terénu a zkušeností pilota, ale neměly by klesnout pod 60 % v obou směrech. U sensorů s nižším rozlišením (typicky multispektrální kamery) se hodnoty doporučují nad 75 %. Zatímco navýšení překryvů ve směru letu nemá vliv na letový čas (proto je běžně 70-90 %), navýšení překryvů sousedních linií může výrazně ovlivnit rozložení letových linií a tím i celkovou dobu letu (hodnoty jsou obvykle nižší, typicky 60-80 %). Aby byly dodrženy překryvy i v okrajových částech zájmového území, je vhodné letovým liniím nastavit drobný přesah za hranici rámce zájmového území (Obrázek 22).



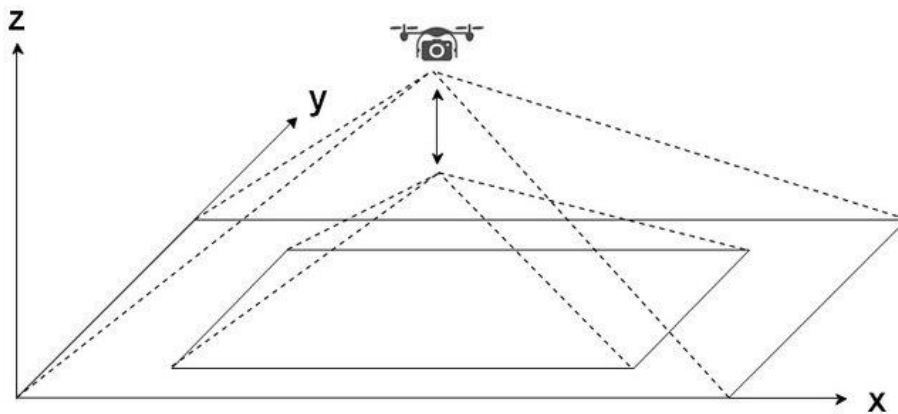
Obrázek 22. Překryvy leteckého snímkování (vlevo), letové linie za hranice zájmového území (vpravo).

Rámec letové mise je nutné volit s ohledem na fakt, že pilot musí mít po celou dobu letu s UA přímý vizuální kontakt bez využití technických pomůcek (tj. vše mimo dioptrických brýlí či kontaktních čoček, tedy i dalekohled – režim VLOS, případně EVLOS). Důraz je také potřeba dát na volby místa vzletu a přistání nejen s ohledem na bezpečnost ale také energetickou efektivitu. Během nezbytných přesunů UA bez pořizování snímků (*transition, taxi*) dochází k čerpání kapacity baterií, proto je nanejvýš vhodné omezit tyto pohyby na minimum. S tímto ohledem je také třeba plánovat trajektorie letových linií – jejich orientace vůči topografii, směru větru apod.

Kritické je i zvolení správné letové hladiny. Dnešní sensorika se chlubí prostorovým rozlišením v řádu jednotek centimetrů. Toho samozřejmě obvykle lze dosáhnout, avšak je třeba mít opět na paměti, jak probíhá následné zpracování dat. Při zvolení nesprávné letové hladiny (obvykle příliš nízké) je možné, že nebude dosaženo potřebných překryvů mezi sousedními snímky. Řídící software pro plánování letu obvykle pracuje s překryvy s ohledem na úhel záběru kamery, resp. virtuální otisk snímku na zemi (*footprint*). Úhlu záběru kamery se říká *field of view* (FOV) a rozlišit lze horizontální (HFOV), vertikální (VFOV), případně úhlopříčku (DFOV). Je třeba pochopit, že ony parametry jsou obvykle vyjádřeny úhlem optického systému, ve kterém mohou snímat data.

S klesající výškou se s fixním FOV násobně zmenšuje *footprint* (Obrázek 23). Můžeme se také u některých výrobců senzorů potkat s uvedeným rozměrem *footprint* v konkrétní výšce pro lepší představivost uživatele. Všechny uvedené hodnoty jsou ale vždy vztaženy k terénu, nikoli povrchu. Pokud snímáte data v území, kde se terén nerovná povrchu, tak i přes fixní FOV kamery dochází k významné poklesu dimenze *footprint* kvůli výškovým překážkám. Snadno se v praxi stane, že pořízené snímky mají nedostatečné překryvy, i když překryvy jsou nastaveny v řídicí aplikaci správně.

Pokud zvolíte naopak vyšší letovou hladinu, výše popsaný efekt je opačný. S rostoucí letovou výškou se při stejném FOV zvětšuje *footprint*, adekvátně pak i klesá prostorové rozlišení. Vyšší letová hladina bude mít za následek snížení míry detailu, avšak větší jistotu, že data půjdou zpracovat.



Obrázek 23. Změna *footprint* snímku při změně letové hladiny při stejném FOV. Zdroj: 10.1109/JSEN.2018.2850856.

Příklady plánování mise (J. Rous)

Každý výrobce bezpilotního prostředku zpravidla poskytuje vlastní řídicí aplikaci, ve kterém plánování mise probíhá. V této kapitole je popsán postup v těch nejčastěji používaných.

DJI Pilot 2

Aplikace DJI Pilot 2 je součástí nových ovladačů RC Pro určených k ovládání dronů ze série Mavic 3 a Mavic 3E. Aplikace běží na systému Android, zapne se automaticky s ovladačem. Přihlášení probíhá pomocí účtu DJI. Na úvodní stránce lze zvolit, jestli létat na volno nebo naplánovat misi. Seznam misí se zobrazí po kliknutí na ikonu *Flight Route*. Zde jsou k nalezení všechny naplánované mise uskutečněné pod daným účtem na daném zařízení. V pravém horním rohu se nachází ikona +. Takto je možno vytvořit novou misi anebo ji naimportovat z předem připraveného projektu ve formátu KML/KMZ.

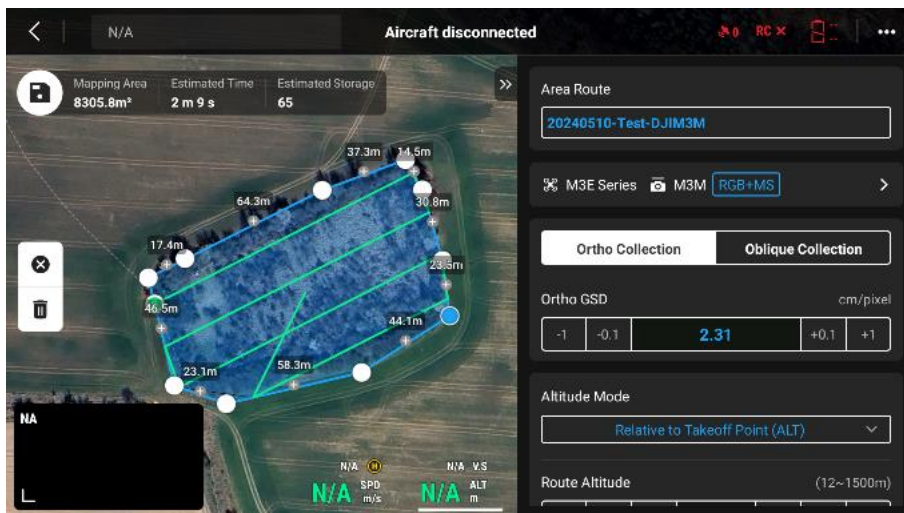
V případě plánování mise přímo v ovladači si uživatel vybere typ mise, který chce vytvořit. Jedná se o *Area Route*, *Linear Route* anebo *Slope Route*. Variantu mise uživatel volí podle typu letu. Pro mapování rozsáhlých území typu les, pole a louka se hodí *Area Route*. Pro sledování liniových staveb, železnice případně inženýrských sítí je naopak vhodný využít *Linear Route*. *Slope Route* je nová funkce, která umožňuje snímání vertikálních ploch. Tento typ mise je vhodné použít pro snímání fasád.

Nastavení samotné mise je velmi intuitivní a pro všechny typy misí podobné. Na následujících snímcích je znázorněn postup a popis jednotlivých funkcionalit. Po kliknutí na typ mise se zobrazí podkladová mapa, nad kterou se kreslí polygon zájmového území (Obrázek 24). V levém horním rohu se vypočítává plocha polygonu. Po kliknutí na modrou fajfku si uživatel vybere model UAV a v případě více sensorů i sensor, kterým chce snímat. Pokud je k ovladači dron již připojen, defaultně vybere přiřazený sensor.



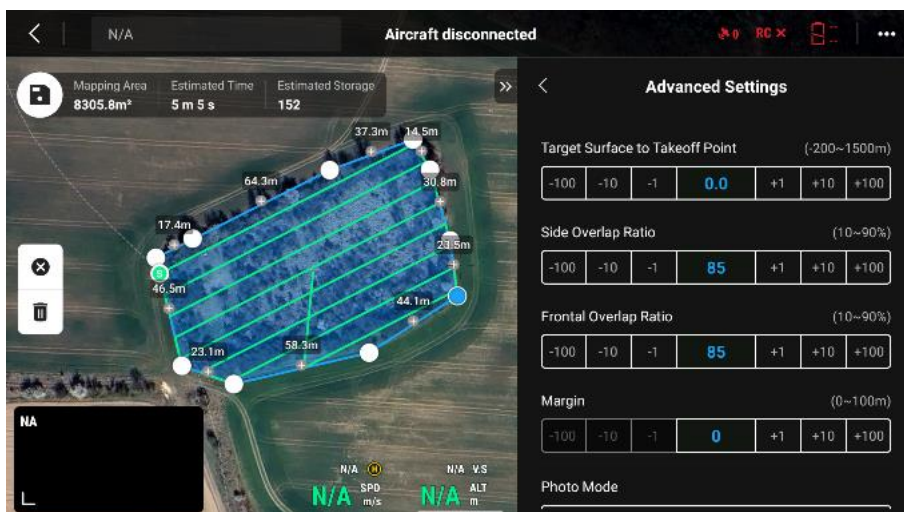
Obrázek 24. DJI Pilot 2 – definování zájmového území mise

Nyní se pilot dostane k podrobnému nastavení samotné mise. Zde vyplní název, pod kterým bude mise dohledatelná a uložena. Dále pak nastavuje letovou hladinu, a to buď pomocí požadovaného rozlišení pixelu (GSD, Ground Sampling Distance) anebo pomocí definované výšky letu (Obrázek 25). Výška letu může být buď relativní k místu vzletu nebo absolutní vůči výškovému modelu. *Safe takeoff altitude* definuje bezpečnou výšku pro let na start mise. Měla by tedy být, stejně jako návratová výška, vyšší, než jsou nejvyšší body v okolí zájmového území. Rychlost a úhel směru letu vzhledem k zájmovému území jsou nastaveny automaticky, uživatel však nepřichází o možnost tyto parametry měnit.



Obrázek 25. DJI Pilot 2 –základní nastavení mise

V záložce Advanced settings pilot nastavuje překryvy (Obrázek 26). Ty by měly být dostatečné pro správný průběh zpracování snímky na PC. Dále se nastavuje margin, tedy přesah přes zájmový polygon. Ten je důležitý pro dosažení optimálních překryvů na okrajích zájmového území. Během celého nastavování se v levém horním rohu přepočítává plocha, odhadovaný čas letu a počet snímků.



Obrázek 26. DJI Pilot 2 –pokročilé nastavení mise

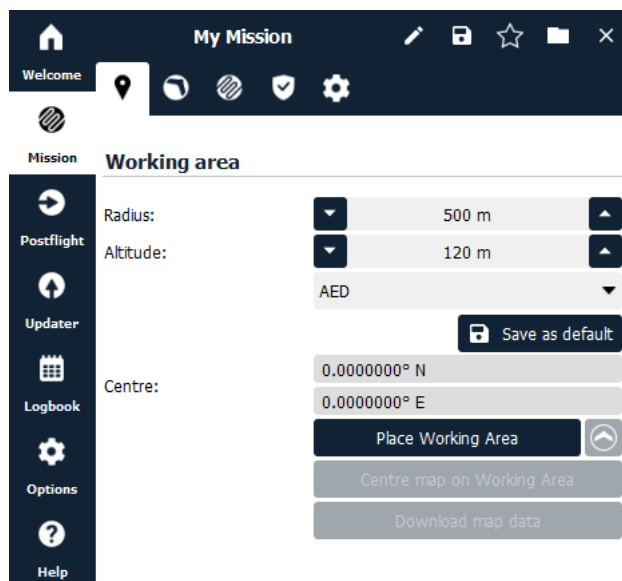
Mise se uloží kliknutím na ikonu diskety. Následně se zobrazí v seznamu všech misí. To je výhodné pro opakování misí v budoucnu.

DJI Ground Station Pro

Jedná se o aplikaci vyvinutou společností DJI pro ovládání dronu ze série Phantom. Specifikem této aplikace je to, že je instalovatelná pouze na zařízení Apple iPad. Přihlášení do aplikace probíhá pomocí přihlašovacích údajů DJI, které jsou využitelné napříč celým portfoliem produktů společnosti DJI. Samotné plánování mise je velmi podobné aplikaci Pilot 2.

eMotion

eMotion je desktopový řídicí aplikace vyvinutý společností senseFly, který je využíván pro plánování a koordinaci letu bezpilotních prostředků eBee, což jsou drony s pevným křídlem. Drony eBee se z povahy konstrukce neřídí jako známější koptéry, tudíž k nim neexistuje žádný ovladač s joysticky. Jejich let probíhá pouze pomocí předem naplánované mise. Dron s řídicím notebookem komunikuje pomocí rádiové vysílačky. Plánování se opět neliší od běžných postupů. V případě eMotion je nicméně více komplexní. Prvním krokem je definování tzv. pracovní oblasti (Obrázek 27), tedy území, v rámci kterého je dronu povoleno létat. Je definováno jako kružnice o daném poloměru s maximální letovou výškou. Pokud by část letu měla probíhat mimo toto území, řídicí aplikace start nepovolí a *working area* se musí předefinovat.



Obrázek 27. Nastavení pracovní oblasti omezující pohyb dronu v systému eMotion

Následuje výběr místa pro vzlet a přistání (Obrázek 28). Je potřeba mít na paměti, že křídlo potřebuje pro vzlet i přistání velkou manévrovací plochu. Není tedy možné umístit místo pro přistání na kraj lesa. Po vypuštění letí dron nejdříve na předem definovaný start. Na něm nastoupá požadovanou výšku a poté přeletí na začátek mise. Po ukončení letí na pozici *home*, odkud započne přistání. Výška pro vzlet by měla být dostatečná pro bezpečný přelet vysokých bodů v krajině v okolí. Směr přistávacího koridoru je třeba nastavit tak, aby v jeho průběhu nebyly žádné překážky a by letadlo přistávalo proti větru. Povrch by měl být co nejvíce rovný. Je třeba se vyvarovat vysoké vegetaci, zoranému poli nebo betonovému parkovišti.



Obrázek 28. Nastavení vzletu a přistání v systému eMotion

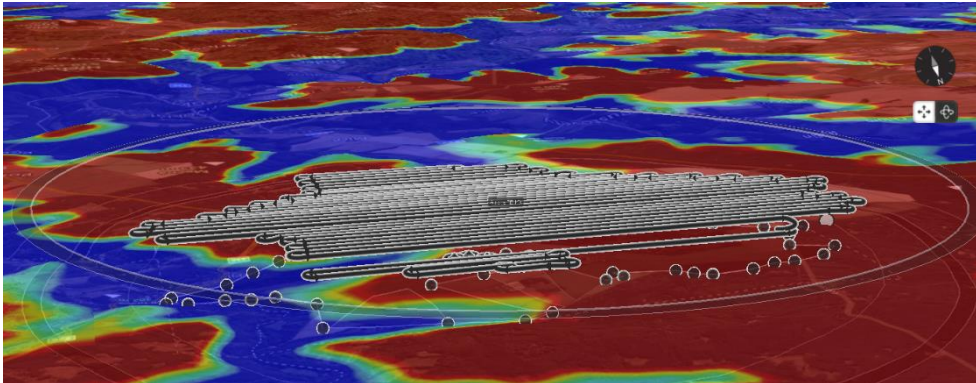
Na další kartě probíhá plánování samotné mise (Obrázek 29). Uživatel si vybere mezi *horizontal* nebo *corridor mapping* podle toho, jaké území mapuje. Oba typy se dají do eMotion nahrát i jako externí soubory. Řídicí aplikace umožňuje plánovat několik pracovních bloků, přičemž každému bloku je možné nastavit jiné parametry a použít jiný sensor. Tím je umožněno obsluhovat například dva drony v jeden okamžik. Po definování polygonu je třeba nastavit základní parametry jako jsou typ senzoru, rozlišení a překryvy. Na základě těchto parametrů se přepočítávají odvozené parametry, např. délka letu, počet fotografií nebo vzdálenost mezi liniemi. Výška letu může být fixně definovaná nebo relativní k digitálnímu výškovému modelu. V případě druhé možnosti řídicí aplikace sama nastaví vzestupné nebo sestupné kružnice v místech, kde to změna terénu vyžaduje.



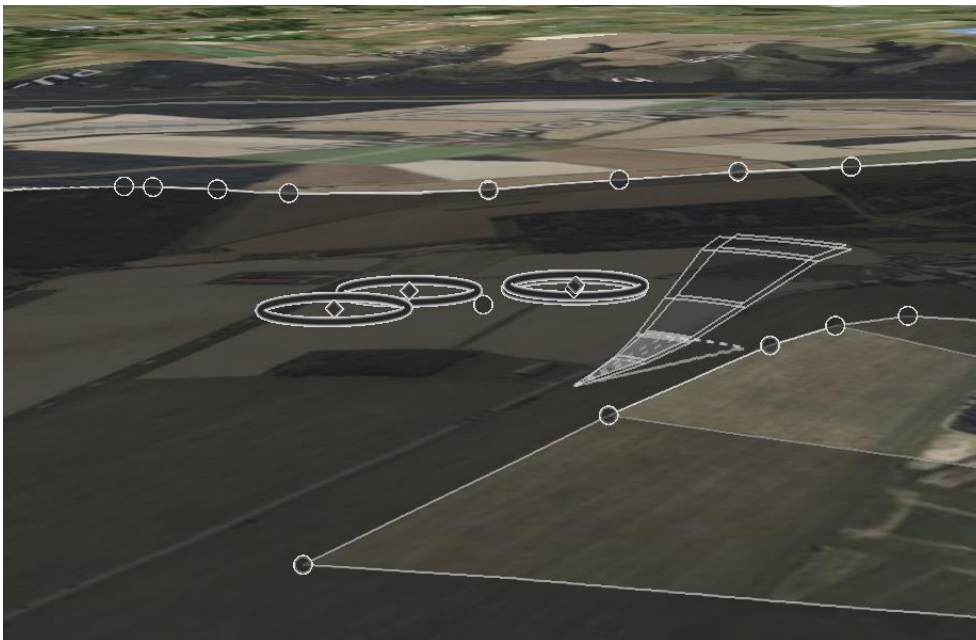
Obrázek 29. Plánování letových bloků v systému eMotion

Posledním podstatným krokem je nastavení bezpečnosti, tedy toho, co se stane v rizikových situacích. V zásadě je třeba nastavit, kdy se má dron vrátit domů. Rizikové situace mohou být silný vítr, ztráta pozemního signálu delší než definovaný čas, slabá výdrž baterie nebo chyba senzoru. Při vypnutí těchto bezpečnostních opatření pilot riskuje ztrátou či poškozením dronu.

Příjemným doplňkem řídicí aplikace eMotion je možnost přepnutí do 3D zobrazení s podkladovou výškovou mapou (Obrázek 30). Lze si tak lépe ověřit, jestli nejsou v zájmovém území vysoké překážky a jestli sestupný koridor (Obrázek 31) pro přistání má dostatečnou vzdálenost od stromů nebo zástavby.



Obrázek 30. Zobrazení digitálního modelu terénu jako podkladové vrstvy při plánování letu v systému eMotion

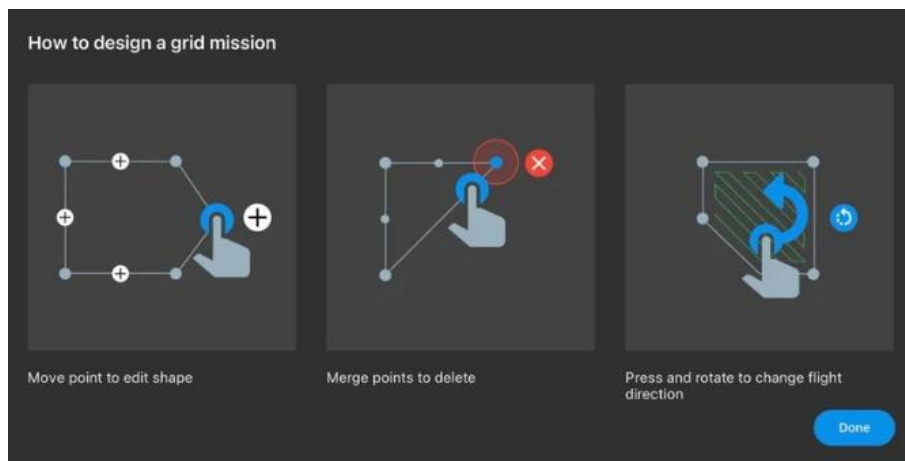


Obrázek 31. Zobrazení sestupného koridoru pro přistání dronu v systému eMotion

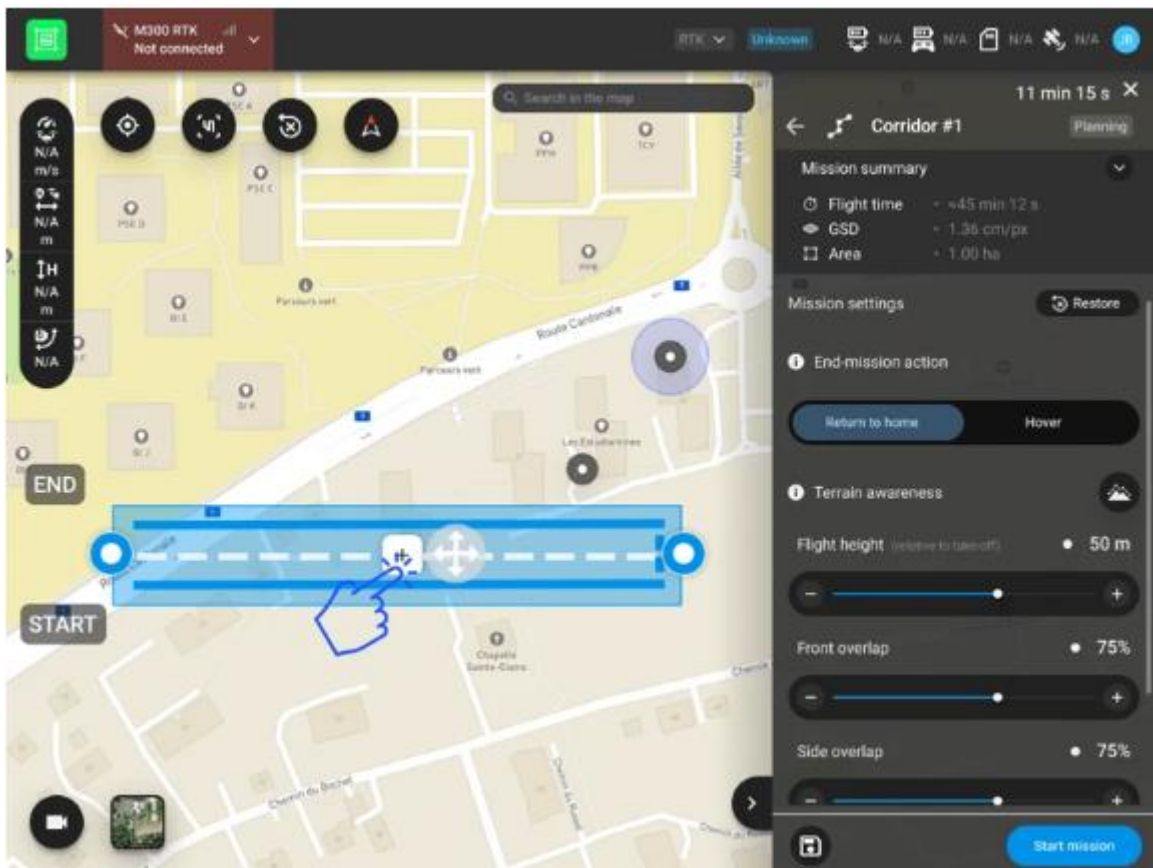
Pix4DCapture

Pix4DCapture je řídicí aplikace, která je k dispozici ve dvou licencích – Discovery a Professional. Discovery je volně dostupná licence, která obsahují 2 základní typy misí. Licence Professional je vázaná na licencovanou řídicí aplikaci z produkce Pix4D. Ta nabízí větší možnosti pro plánování, umožňuje sledování trénu, využití RTK či offline map. Pix4DCapture lze nainstalovat na zařízení s operačním systémem Android i iOS. Zároveň je možné tuto aplikaci nainstalovat na ovladač s integrovaným displejem.

Samotné plánování mise je velmi intuitivní. Pix4D má na svých internetových stránkách velmi dobře zpracovaný manuál. Prvním krokem je výběr typu mise. Nejčastěji s využívá grid. Jedná se o nálet plochy, který je buď proveden jednou pro 2D modelování nebo dvakrát kolmo na sebe pro 3D modelování. Grid je primárně nastaven nad pozicí pilota. Pilot následně grid upraví podle svých požadavků. Aplikace uživatele provádí, aby bylo nastavení co nejjednodušší (Obrázek 32). Následuje nastavení parametrů letu – výška letu, přední a boční překryv, úhel kamery a rychlost letu (Obrázek 33). V horním rohu se aktualizuje čas a GSD. Je doporučeno dodržet přednastavené hodnoty pro překryvy a úhel kamery (Obrázek 34).



Obrázek 32. Pix4DCapture – nápověda pro plánování mise, Zdroj: support.pix4d.com



Obrázek 33. Pix4DCapture – nastavení parametrů mise, Zdroj: support.pix4d.com

Navrženou misi lze spolu s jejími parametry uložit do složky Plán. Klepnutím na Spustit misi se zobrazí kontrolní seznam mise. Pokud jsou všechny kontroly úspěšné, klepne se na Fly mission. Dron opustí manuální režim a provede misi. Během celé mise se zobrazuje odhad času zbývajících do dokončení.

Parameters	Single grid	Double grid
Front overlap	80%	80%
Side overlap	70%	70%
Gimbal pitch	-90°	-70°

Obrázek 34. Pix4DCapture – doporučené hodnoty podélných i příčných překryvů a úhlu kamery, Zdroj: support.pix4d.com

Nenadále situace v průběhu letu (J. Rous)

Za každých okolností je za bezpečný průběh letu zodpovědný pilot. A to i přesto, že se zdánlivě jedná o autonomní let. Během letu může dojít k nenadálým okolnostem. Na některé musí reagovat pilot sám, na jiné má dron přednastavené postupy. V případě náhlé změny počasí, přicházející bouřce či silného větru musí pilot neprodleně misi ukončit a bezpečně s dronem přistát. To vše si musí hlídat sám. Může se stát, že v dronu dojde k technické závadě. Může to být abnormální chování baterie, ztráta signálu mezi pilotem a dronem nebo mechanické poškození. V ten okamžik je již při plánování mise definované, co se má stát. Zpravidla se dron začne vracet na pozici vzletu, kde přistane. Může ale také setrvat na jednom bodě ("viset ve vzduchu"), kdy řízení převezme pilot nebo na daném místě přistát. To není příliš doporučované v případě, kdy pilot nevidí, kam by dron přistál. Nicméně je to nejrychlejší řešení v případě nízké kapacity baterie.

Zpřesnění polohy a výšky (J. Rous)

Naprostá většina bezpilotních prostředků disponuje GNSS přijímačem. Díky tomu je prostředek schopen se orientovat v prostoru, viset ve vzduchu, a hlavně zaznamenávat polohu dronu v čase pořízení snímku. Standardní přijímače využívané nejen v dronech, ale i v mobilních telefonech nedisponují takovou přesností, která je pro následné zpracování potřebná. V závislosti na okolním prostředí, terénu a rušení signálu dosahuje přesnost úrovně jednotek až desítek metrů. Takováto přesnost je absolutně nedostatečná a pro existuje několik metod pro zvýšení polohové a výškové přesnosti. Mezi tyto metody patří diferenciální GPS (DGPS), Real Time Kinematic (RTK) a Post Processed Kinematic (PPK).

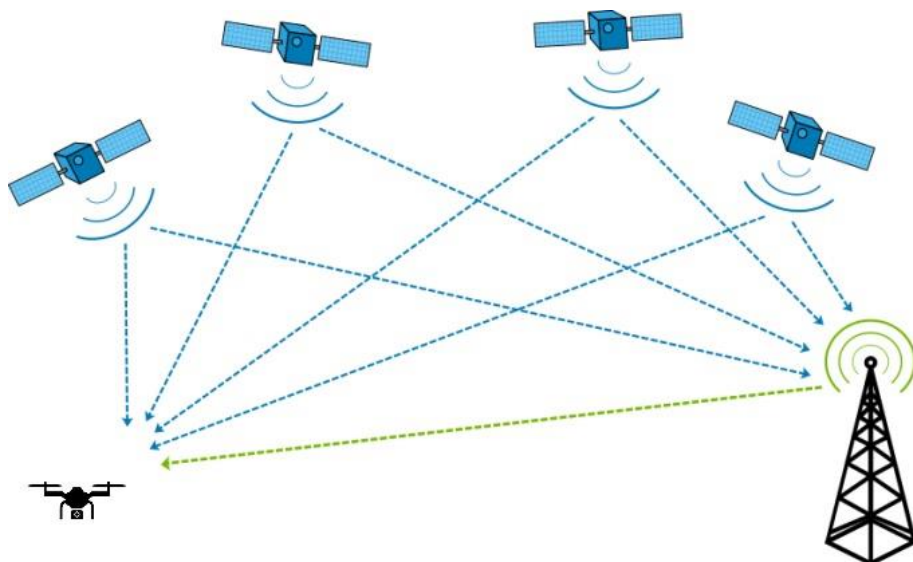
DGPS

Diferenciální GPS, jak už z názvu vyplývá, funguje na základě měření odchylek na známém bodě. Předpokladem pro využití této metody je existence alespoň jednoho další GPS přijímače, pro který jsou známé přesné souřadnice. Jedná se o takzvané referenční stanice. Tyto referenční stanice vyhodnocují odchylky své skutečné polohy od polohy změřené pomocí GPS. Tato odchylka je poté jako korekce distribuována přes protokol NTRIP³⁹ do koncového zařízení (roveru) uživatele (Obrázek 35). V České republice existuje síť vybudovaná ČÚZK⁴⁰ s názvem CZEPOS⁴¹. Využití této sítě je zpoplatněno buď jednorázovými poplatky za čas využívání nebo ročním paušálem. Typicky zlepšuje přesnost GPS měření na 1–3 metry.

³⁹ Networked Transport of RTCM via Internet Protocol

⁴⁰ Český ústav zeměměřičský a katastrální

⁴¹ Česká síť permanentních stanic pro určování polohy



Obrázek 35. Schéma komunikace DGPS

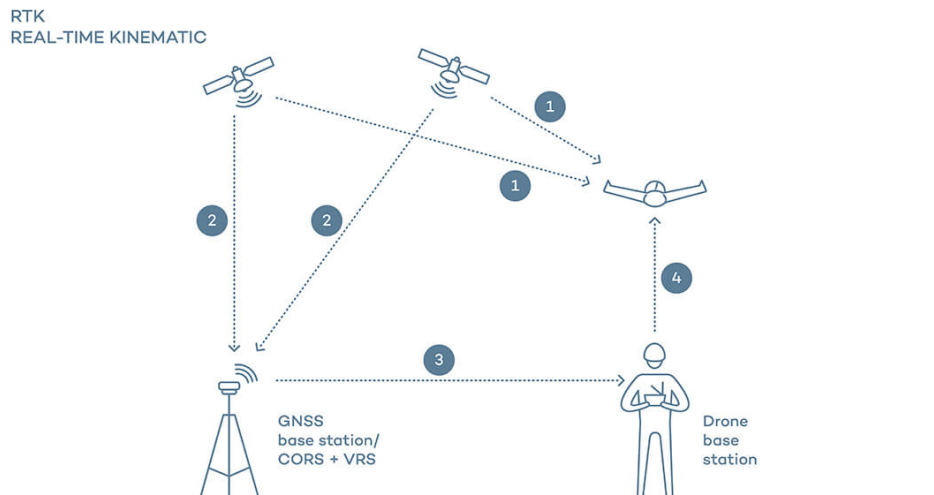
RTK

Real Time Kinematic (RTK) je další metodou využívanou ke zpřesnění polohy. Na rozdíl od tradičních systémů GPS, které spoléhají pouze na data ze satelitů, využívají systémy RTK kombinaci signálů, které přicházejí z referenční sítě stanic (např. CZEPOS) nebo z GNSS přijímače. Tím lze dosáhnout polohové přesnosti v řádech centimetrů (Obrázek 37). Stacionární referenční stanice se známou lokací přijímá satelitní signály a průběžně vypočítává svou polohu. Určuje chyby v signálech a generuje korekce. Tyto korekce jsou v reálném čase odesílány do mobilního přijímače, tzv. roveru, prostřednictvím rádiových, internetových nebo mobilních sítí. Rover využívá signály GNSS a pomocí korekcí zpřesňuje polohu.

Základní princip fungování je velmi jednoduchý. Pro využití RTK potřebujeme GNSS přijímač, který je stacionární. Ten přijímá signál GPS, který je zatížen nepřesností způsobenou při průchodu atmosférou. Druhý přijímač (rover), kterým může být totální stanice, auto nebo například dron, také přijímají nepřesný signál. Je předpoklad, že nepřesnosti v signálech jsou téměř identické a mohou být z výpočtu polohy vyloučeny. Stacionární stanice vysílá informace o poloze do druhého přijímače, který tím svou polohu zpřesní. Maximální vzdálenost mezi stacionární stanicí a roverem se liší podle použitého přijímače. Pro jednobandové to je 10 km a pro vícebandové 60 km.

RTK vyžaduje čtyři stálé komunikační linky pro korekci satelitních lokalizačních dat: 1. linka mezi družicemi a dronem, 2. linka mezi družicemi a stacionární stanicí GNSS nebo sítí CORS/VRS⁴² (*Virtual Reference Station*), 3. linka mezi stacionární stanicí GNSS nebo CORS/VRS a ovladačem dronu a 4. linka mezi ovladačem dronu a dronem (Obrázek 36).

⁴² VRS je technologie, která využívá data z několika fyzických GNSS stanic k vytvoření virtuální referenční stanice blízko uživatele pro zajištění přesných korekcí GPS signálu v reálném čase.



Obrázek 36. Schéma komunikace RTK. Zdroj: wingtra.com

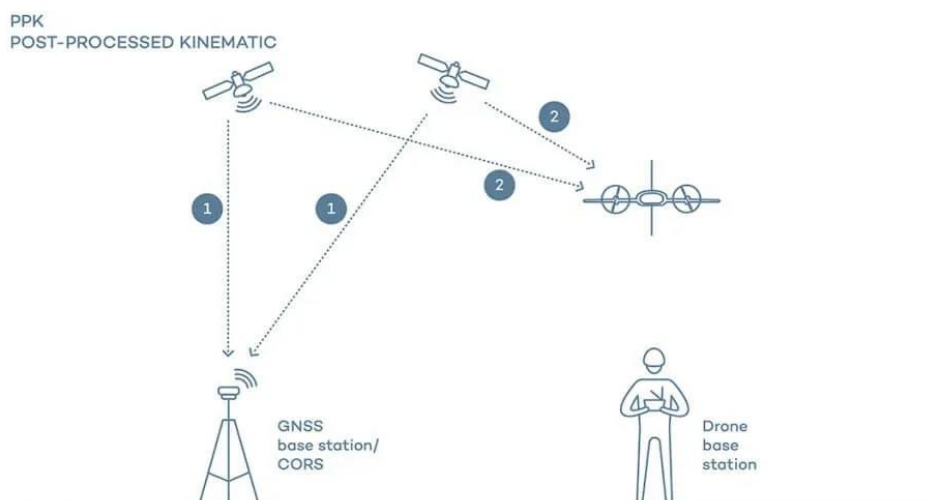
RTK			RTK		
Longitude:	14.303084493 E	0.000000000 E	Latitude:	50.060163750 N	50.123229490 N
Ellipsoidal Height	387.506m	0.000m	Longitude:	14.303069160 E	14.456056868 E
GPS:	7	0	Ellipsoidal Height	384.400m	356.091m
Beidou:	7	0	GPS:	8	11
GLONASS:	5	0	Beidou:	6	10
Galileo:	4	0	GLONASS:	5	9
Signal Strength:			Galileo:	4	8
Standard Deviation:	1.7368103m 1.2367889m 3.6370468m		Signal Strength:		
			Standard Deviation:	0.034546055m 0.026405532m 0.08419806m	

Obrázek 37. DJI Pilot 2 - Směrodatná odchylka před a po připojení RTK

Na první pohled se metody DGPS a RTK zdají velmi podobné. Liší se ovšem způsobem, kterým korekce aplikují. DGPS využívá referenční stanici na známé pevné pozici, která přijímá signály z GPS satelitů. Tato stanice porovnává přijaté signály s očekávanými hodnotami a vypočítává korekční faktory. Tyto korekce jsou pak vysílány k uživatelským přijímačům, které tyto informace využívají k opravě svých měření. RTK také využívá referenční stanici, ale na rozdíl od DGPS pracuje s fázovými měřeními nosných vln GPS signálů, což umožňuje mnohem přesnější korekce. Referenční stanice vysílá korekce v reálném čase přímo k roverům (uživatelským přijímačům), které je aplikují na svá měření. RTK je tedy výrazně přesnější než DGPS, zároveň poskytuje korekce s velmi malým časovým zpožděním, což je klíčové v případě rychle se měnící pozice. Oba systémy mají své specifické použití a výběr mezi nimi závisí na požadované úrovni přesnosti a konkrétním účelu použití.

PPK

PPK neboli Post Process Kinematic, je metodou pro zpřesnění polohy velmi podobnou RTK. Jak již název napovídá, ke zpřesnění nedochází v reálném čase při samotném sběru dat, ale až během jejich zpracování. Výhodou této metody je, že má nižší nároky na komunikaci mezi jednotlivými komponenty. Pro správné fungování je potřeba pouze dvou stabilních spojení (Obrázek 38). 1. linka je mezi stacionární GNSS stanicí a satelity, 2. linka je mezi satelity a dronem. Ztráta signálu je v praxi velmi častá. Během přerušené komunikace nedochází v případě využití RTK ke korekcím. Vzhledem k tomu, že PPK nevyužívá korekce v reálném čase, tak není tolik náchylná na výpadky signálu. Zároveň je jednodušší pro přípravu v terénu a poskytuje přesnější a věrohodnější data. Největší nevýhodou této metody je delší doba zpracování snímků.



Obrázek 38. Schéma komunikace PPK. Zdroj: wingtra.com

7. Náležitosti letové mise, bezpečnostní limity

Postupy a činnosti

Postupy pro běžnou činnost v terénu zahrnují řadu úkonů, které vedou k hladkému průběhu mise. Normální postupy zahrnují kvalitní předletovou přípravu tzv. od stolu, ale i důkladnou předletovou přípravu na místě, tedy stanovení aktuálních místních podmínek. To se týká především zhodnocení meteorologických rizik pro letovou misi, kdy je třeba kontrolovat dohlednost, rychlost a směr proudění vzduchu, spodní základnu mraků a podmínky pro tvorbu námrazy nebo bouřky.

Mimo kontroly dostupnosti a platnosti všech nutných povolení a rozhodnutí, je nutné vybrat místo vzletu a přistání UA vzhledem k lokálním terénním podmínkám. Nutné je vybrat plochy plánované, ale i plochy nouzové. Nouzové plochy slouží k ukončení letu z předem neplánovaných příčin a je nutné je vybrat s ohledem na výskyt nepoučených osob a majetku i dostatečný manipulační prostor.

Před vlastním startem UA je klíčová předletová prohlídka, která se týká především kontroly mechanického stavu všech funkčních celků systému, uchycení pohyblivých částí a užitečného zatížení. Před oživením systému je také vhodné zkontrolovat uložení a kapacitu akumulátoru. Po oživení systému, tj. zapnutí napájecího obvodu, je nutné zkontrolovat stav všech systémů a čidel. Pilot vždy kontroluje úroveň kvality spojení řídicí stanice s UA, příjem telemetrických údajů, teplotu trupu UA a teplotu akumulátoru, kapacitu akumulátoru dle ukazatele na řídicí stanici, počet a kvalitu přijímaného GNSS signálu, funkčnost kompasu a případné další přenášené údaje.

Po důsledné kontrole systémů je možné zahájit vzlet. Před zahájením stoupání je ještě nutná vizuální kontrola osob, zvířat a volně ležících předmětů. Pilot provede vertikální stoupání rychlostí ca $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a provede zavisení UA ve výšce ca 2-3 m AGL. V tuto chvíli je nutná opětovná kontrola všech systémů, a především dostupné kapacity akumulátoru, která se mohla po zatížení snížit či se může projevit vada některých článků. Zároveň je vhodné zkontrolovat funkčnost všech ovládacích prvků včetně užitečného zatížení. Následuje další vertikální stoupání a vlastní letová mise.

Po ukončení mise je vhodné směřovat k místu plánovaného přistání a zároveň klesat rychlostí ca $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Během úkonu je třeba opětovně kontrolovat pohyb osob a zvířat v okolí přistání. Zároveň je potřeba mít jasnou představu o rychlosti a směru proudění vzduchu, které hraje při přistávání významnou roli.

Po přistání je vhodné vypnout a vyndat akumulátor, zkontrolovat mechanický stav všech funkčních celků systému a zapsat misi do letového deníku UA. Možná je kontrola a pořízených snímků stažením z datového nosiče.

Přes důkladnou přípravu může nastat nouzové situace. Může se jednat např. o vysazení motoru, ztrátu stability, pokles napětí, výpadek řídicí stanice a telemetrie, vyřazení člena posádky nebo jiná neočekávaná událost. Pokud je po výskytu nenadále události stroj ovladatelný, pilot směřuje nejkratší cestou na plochu plánovaného přistání (tj. co nejbližší k sobě). Pokud je stroj neovladatelný (např. vysazení motoru či motorů), směřuje pilot stroj na vytipovanou nouzovou plochu či aktivuje padákový systém, je-li dostupný.

V případě výpadku spojení mezi UA a řídicí stanicí přechází stroj do tzv. nouzového režimu (*failsafe*), kdy následuje předem zadanou akci. Typicky se jedná o navrácení do místa vzletu či přímé vertikální přistání. Tento režim je automatický a de-facto autonomní. Pokud dojde k obnovení signálu, je možné postup přerušit a pokračovat v letové misi.

Dále (Příloha 2 – Normální postupy) naleznete kontrolní seznamy (*checklisty*) pro jednotlivé postupy běžné činnosti v terénu s UAS. Seznamy je možné využít při vlastní letové misi a kontrolovat si tak jednotlivé kroky.

Pokud dojde k nehodě letadla, pilot je povinen v souladu s leteckým předpisem L 13 ohlásit nehodu či incident Ústavu pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod⁴³ a Úřadu pro civilní letectví⁴⁴. Kontaktní adresy ÚCL a ÚZPLN pro hlášení letecké nehody (LN) a incidentu (I) jsou uvedeny v AIP GEN 1.1.1 a 1.1.11. Dle okolností je také nutné hlásit nehodu Policie ČR a případně i později oznámit pojišťovně.

Seznam minimálního vybavení

Pro každou letovou misi je nutné s sebou mít základní vybavení, které usnadní hladký průběh mise či pomůže v nouzové situaci. Níže je uveden seznam povinného (tučně) a doporučeného vybavení.

- **Registraci provozovatele, osvědčení pilotů**
- **Doklad o platném pojištění UA**
- **Vydaná stanoviska, rozhodnutí a povolení oprávněnými orgány a ÚCL**
- **Platná ICAO mapa nebo přístup na AisView/DronView**
- **UAS uložený v přepravním boxu**
- **Dostatečný počet akumulátorů pro plánovanou letovou misi**
- **Řídicí stanice pro pilota a případně i operátora**
- **Zvolená užitečná zátěž s příslušenstvím (senzor)**
- **Lékárnička**
- **Hasicí přístroj**
- **Reflexní vesty + případné výstražné cedulky nebo prostředky k označení činnosti**
- Sada náradí, sada náhradních dílů, lepicí pásy
- Anemometr
- Látkový ukazatel směru větru
- Teploměr
- Sluneční brýle
- Dalekohled (lze využít, avšak musí platit režim VLOS)
- Nabíjecí stanice
- Vysílačky pro spojení s piloty
- Přenosný heliport

⁴³ <http://www.uzpln.cz>

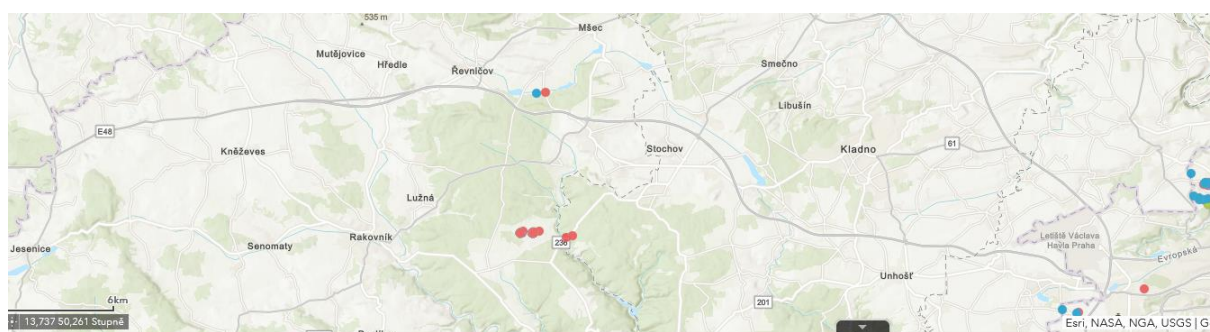
⁴⁴ <https://www.caa.cz>

Zápisy z letu a údržby

Pilot je povinen zaznamenávat informace o letu do deníku letadla. Zapsaná informace musí obsahovat datum letu, jméno pilota, označení letadla, místa a čas vzletu, celkovou dobu letu, druh letové činnosti a potenciální události související s bezpečností letu. Vhodné je doplnit informace o využití baterii a její kapacitě (Obrázek 39). Forma letového deníku není blíže specifikována, může mít podobu papírového deníku či digitální databáze. ÚCL si letový deník může vyžádat, stejně tak si může vyžádat provedení kontroly provozu a letové způsobilosti.

Je třeba si uvědomit, že většina bezpilotních systémů je vybavena GNSS jednotkou. Informace z této jednotky slouží nejenom k určení polohy stroje, ale mohou také sloužit jako záznam o provedeném letu. Informace o místu a čase zpravidla bývají automaticky zaznamenávány a výrobci jsou obvykle dostupné (často jsou data odeslána i bez vědomí pilota). Tyto informace mohou být dostupné lokálním úřadům k řešení provozních přestupků. Toto platí obzvláště u nejrozšířenějších hobby značek (typicky DJI).

Pro bezpilotní systém je také vhodné vést deník údržby. Ten slouží k evidenci činností probíhajících v rámci údržby UAS a je nedílnou součástí provozní dokumentace. Jeho forma není blíže specifikována, ale je vhodné, aby obsahoval i podrobný popis pracovních úkonů, seznam vyměněných dílů apod. V provozní příručce bezpilotního systému jsou zpravidla uvedeny mimo nutných poletových úkonů i servisní intervaly pro jednotlivé funkční celky systému.



The screenshot shows a web-based flight log application. At the top, there is a map of the Stochov region in the Czech Republic, with several flight paths marked by colored dots and lines. Below the map, there is a table with the following columns: date, flight number, aircraft, camera, camera type, whether a pilot was used, pilot name, flight altitude (AGL), takeoff time, flight duration, battery number, battery capacity (percentage), and notes. The table contains seven rows of flight data.

date_fi	Číslo letu	Stroj	Kamera	Kamery	Byl použit pípák?	Pilot vzletu	Výška letu (AGL)	Čas vzlet	Trvání letu	Baterie číslo	Baterie kapacita (přístání)	Poznámka
5/6/2020 12:00 odp.	4	eBeeX	sequoia+		yes	PetKla	300	15:30	0	5	11	Kamera: RedEdge MX, Trvání letu: 65
5/6/2020 12:00 odp.	5	eBeeX	sequoia+		yes	PetKla	300	16:45	0	3	12	Kamera: RedEdge MX, Trvání letu: 63
5/6/2020 12:00 odp.	6	eBeeX	sequoia+		yes	PetKla	300	17:55	35	4	39	Kamera: RedEdge MX
6/1/2020 12:00 odp.	1	eBeePl	sequoia+		yes	HonKom	220	10:15	30	5	20%	
6/1/2020 12:00 odp.	2	eBeePl	sequoia+		yes	HonKom	220	10:50	30	6	20%	
6/4/2020 12:00 odp.	1	Mavic2_Pro	defaultRGB			HonKom	20	10:45	10	2	30%	
6/4/2020 12:00 odp.	1	Mavic2_Pro	defaultRGB			HonKom	40	12:10	15	1	17%	

Obrázek 39. Ukázka elektronického letového deníku.

Bezpečnostní limity a povinnosti

Pro každý prostředek jsou v jeho provozní příručce specifikovány i limity na maximální vzdálenost od pilota či maximální letovou hladinu, které jsou v souladu s platnou legislativou, např. stanovení maximální letové hladiny jako 100 m AGL nebo maximální horizontální vzdálenost od pilota 500 m.

Lze se setkat dvěma základními rolami – piloty. Rozlišit lze pilota velitele a operátora. Jejich funkce nemusí být blíže specifikovány, ale předpokládá se, že pilot velitel řídí let a pilot operátor sleduje telemetrii. Legislativa pracuje též s termínem dálkově řídicí pilot a předpokládá, že za provedení bezpečného letu, včetně předletové přípravy a kontroly, je odpovědná osoba, která bezpilotní letadlo dálkově řídí. Osobou odpovědnou je v tomto případě dálkově řídicí pilot (stanovený provozovatelem UA pro každou misi).

Povinnosti pilota:

- pilot během pojiždění a letu udržuje trvalý vizuální kontakt s UA bez vizuálních pomůcek,
- pilot odpovídá za to, že bezpilotní systém bude používán pouze k účelu, ke kterému byl navržen a vyroben, případně, k němuž byl schválen ÚCL,
- pilot umožní na žádost ÚCL provedení kontroly provozu a letové způsobilosti UA,
- pilot zaznamenává informace o letu do deníku letadla nebo rovnocenného dokumentu,
- pilot nepředá řízení osobě, která není proškolená a nemá adekvátní typ osvědčení,
- pilot provádí předletovou přípravu k zajištění bezpečného letu, spočívající zejména ve zhodnocení místních podmínek a v nastavení odpovídajícího charakteru a doby letu.

Dle specifikací v provozní příručce lze pilotovi či pilotu-veliteli přisoudit další povinnost. Obecně ale platí, že pilot velitel odpovídá za přijetí odpovídajících bezpečnostních opatření, aby v průběhu letu nedošlo k ohrožení bezpečnosti letového provozu, zdraví osob, majetku a životního prostředí. Je také povinen zajistit ochranu UAS před protiprávními činy.

Další činnosti nutné k bezpečnému provozu bezpilotního systému:

- zabezpečit odpovídající poučení všech osob participujících na misi,
- předem vytipovat a zajistit vhodné nouzové plochy,
- zajistit startovací a přistávací plochy tak, aby nedošlo ke kolizi UA s osobami či předměty,
- zajistit, aby se v místě provádění mise vyskytovaly pouze osoby poučené a s vhodnými ochrannými prostředky podle charakteru mise,
- zajistit, aby osoby participující na misi nebyly pod vlivem alkoholu nebo jiných omamných látek a jejich zdravotní stav odpovídal jejich úkolu,
- zajistit dostupnost a připravenost záchranných prostředků jako je hasicí přístroj, lékárnička.

Pilot (pokud nebylo v provozní příručce specifikováno jinak) je také zodpovědný za stav veškerých funkčních celků systému. Proto by se před každým vzletem měla kontrolovat např. mechanické neporušenost celku a mechanický stav všech dalších částí, pevnost uchycení motorů, volnost chodu a vůle každého motoru, zkontrolovat provozní teplotu motorů, akumulátoru i senzorové části atd.

Pilot může být též vlastníkem i provozovatelem UA. V případě využívání UA ve firmách či institucích je obvykle role pilota odlišná od provozovatele. Provozovatelem (a pravděpodobně i vlastníkem) může být právnická osoba, pilotem je vždy osoba fyzická.

Povinnosti provozovatele bezpilotního systému:

- zajistit, že na dronu je uvedeno registrační číslo provozovatele dronu a úplný řetězec registrovaného provozovatele UAS je nahrán do RIDu⁴⁵ (systému identifikace na dálku), pokud je jím bezpilotní letadlo vybaveno;
- vypracovat provozní postupy (písemné postupy se požadují, zaměstnává-li provozovatel dronu více než jednoho pilota);
- ověřit, že v dané oblasti provozu není rádiové rušení, které by mohlo mít vliv na spojení dronu;
- jmenovat pro každý jednotlivý provoz dálkově řídicího pilota (pilota velitele); to je důležité, aby bylo jasné, kdo je osobou odpovědnou za každý let;
- zajistit, že pilot a podpůrný personál provozu dronu jsou seznámeni s uživatelskou příručkou a postupy provozovatele dronu, mají odpovídající odbornou způsobilost;

zajistit, že jsou si osoby zapojené do provozu dronu vědomy rizik spojených s provozem v podkategoriích A2 a A3.

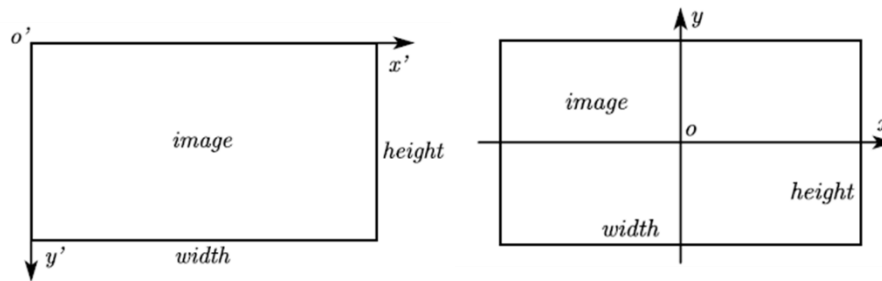
⁴⁵ Remote-ID je systém dálkové identifikace provozovatele a základní telemetrie UA. Od 1. 1. 2024 se jedná o povinnou výbavu UA při provozu ve specifické kategorii.

8. Geometrie snímání

Fotogrammetrie se zabývá odvozením geometrických, radiometrických a sémantických informací o objektu trojrozměrného (reálného) světa odvozené z dvojrozměrné informace (snímku). Fotogrammetrie pracuje obvykle se snímky a jejím cílem je rekonstrukce geometrie tvarů, měření rozměrů a úhlů, určování polohy apod. Snímky jsou pořizovány zpravidla v centrální projekci, kde je středem promítání střed optického systému (objektivu). Pořízením snímku projektujeme realitu. Klíčové je pochopení vztah mezi snímaným objektem, kamerou a snímkem.

Projekce, souřadnicové systémy, parametry orientace

Realita, kamera, snímek i buňky snímku pracují ve svých souřadnicových systémech. Nejbližší vztah mají souřadnicové systémy buňky a snímku (Obrázek 40), kdy je naším cílem převést souřadnice buňky (x' , o' , y') na souřadnice snímku (x , o , y). Transformační klíč je patrný z Rovnice 1.



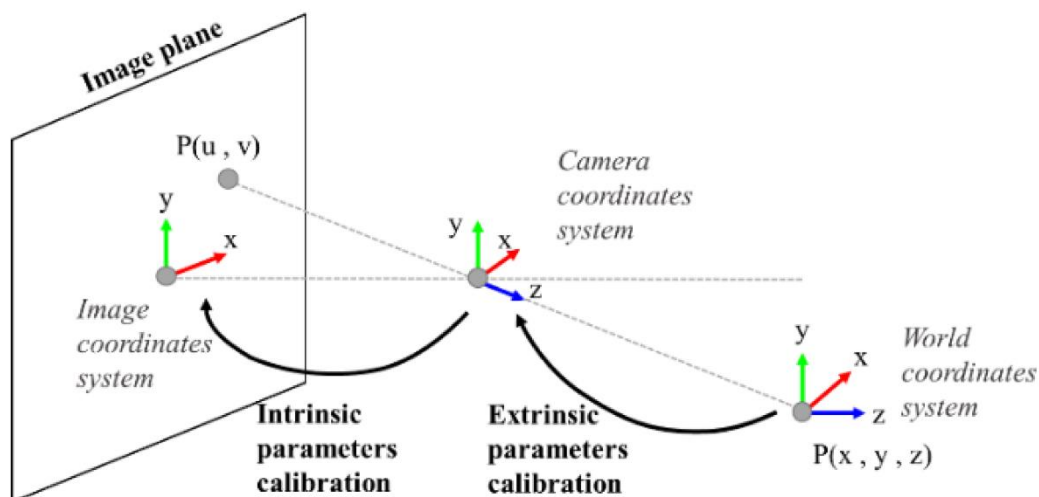
Obrázek 40. Souřadnice geometrického středu. Vlevo souřadnicový systém buňky snímku, vpravo souřadnicový systém snímku.

$$\begin{cases} x = x' - (width + 1) / 2 \\ y = (height + 1) / 2 - y' \end{cases}$$

Rovnice 1. Transformační rovnice mezi souřadnicemi buňky a snímku.

Abychom dokázali propojit objekty na snímku s těmi reálnými, resp. provázat souřadnicové systémy snímku a kamery, musíme odvodit parametry vnitřní orientace. Abychom dokázali projít souřadnicový systém kamery a reality, musíme odvodit parametry vnější orientace. Jinými slovy, abychom dokázali převést dvojrozměrné souřadnice bodu na snímku do trojrozměrného souřadnicového systému reálného světa, musíme odvodit parametry vnitřní i vnější orientace (Obrázek 41).

Parametry vnitřní i vnější orientace je možné znát ještě před zahájením výpočtů, viz kapitola Zpracování dat UAS. Nicméně podstatou zpracování leteckých dat, resp. snímků z UAS je vyrovnání snímků, tedy rekonstrukce parametrů vnitřní a vnější orientace. Pokud známy tyto parametry předem, je možné je využít jako fixní či doporučené proměnné a zpřesnit tak geometrii rekonstruované scény. Chyby ve výpočtu parametrů vnitřní a vnější orientace však mohou vést k nelineárním deformacím modelu a vnášet do výsledku značnou chybu.



Obrázek 41. Geometrický vztah souřadnic bodu v terénu a souřadnic téhož bodu na snímku. Zdroj: 10.3390/app12105024.

Vnitřní orientace snímku

Parametry vnitřní orientace popisují geometrii kamery. V literatuře jsou obvykle označovány jako *interior orientation parameters* (IOP) nebo *intrinsic camera parameters*. Souvisí se snímkem jako takovým, resp. definuje geometrii svazku uvnitř kamery. Parametry vnitřní orientace jsou klíčové pro vyrovnání snímků a obvykle se uvádějí jako:

- konstanta kamery (ohnisková vzdálenost, *focal length*),
- poloha hlavního bodu (*image point coordinates*),
- parametry geometrické distorze (obvykle radiální a tangenciální), případně faktor měřítka.

V případě měřičských (fotogrammetrických) kamer jsou tyto parametry předem známy. V případě UA senzorů se tyto parametry obvykle odhadují v průběhu vyrovnání. Vnitřní orientaci senzorů je možné odvodit ve speciálním software pomocí vícenásobných záběrů standartních terčů připomínajících šachovnici, a to na obrazovce i fyzicky v interiéru (exteriéru). Ve většině software je pak možné takto zjištěné parametry vložit jako předdefinované a volitelně jako fixní. Základní prvky vnitřní orientace znázorňuje Obrázek 43 – ohnisko kamery f , polohu hlavního bodu p , resp. jeho posun od středu x_p, y_p .

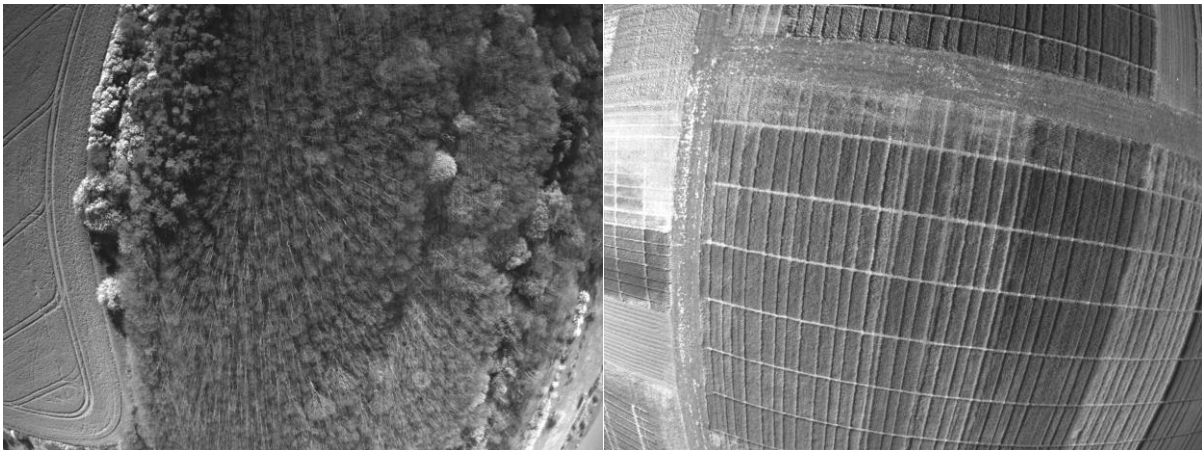
Distorze optického systému

Distorze optické soustavy představuje významné geometrické zkreslení snímku. Teoreticky se jedná o systematickou chybu, kterou lze popsat (a kompenzovat) matematickým modelem. Tento model by měl objasnit korelaci mezi souřadnicemi obrazového bodu a systematickou chybou. Vzhledem ke komplexnosti modelovaného vztahu je v praxi nutné vybrat omezený počet vhodných proměnných, které co nejefektivněji budou modelovat systematické chyby. Výběr proměnných by měl odrážet fyzikální podstatu zkreslení. Existuje již mnoho modelů, které dokáží kompenzovat geometrická zkreslení ve snímku, např. Ebnerův model⁴⁶.

Systematické geometrické vady objektivu úzce souvisí s vnitřní orientací snímku. Projev takových vad (distorzí) je významnější u nízkonákladových neměřičských kamer (případ většiny UA senzorů).

⁴⁶ Ebner H. Self-calibrating block adjustment, *Bildmessung und Luftbildwesen*, vol. 44: 128-139, 1976.

Zjednodušeně lze říci, že distorze můžeme dělit na radiální a tangenciální. Radiální distorze je způsobena odlišným úhlem vstupujícího a vystupujícího svazku – způsobené vlastní geometrií použitých čoček. Radiální distorze může nabývat negativních (soudkovitost, Obrázek 42) i pozitivních (poduškovitost) hodnot, případně jejich kombinací. Tangenciální distorze je způsobena nepřesnou centrací optického systému, projevuje se jako stlačení (komprese) buněk směrem od ortogonálního úhlu (nadiru). Jinými slovy, paprsek procházející středem optického systému nebude přímkou, nýbrž křivkou. Oproti radiální distorzi se kompenzace tangenciální distorze vzhledem ke své inherentní složitosti často zanedbává.



Obrázek 42. Enormní projev negativní radiální distorze optiky. Směrem od středu snímku dochází ke zvětšujícímu se kruhovému zkreslení. Snímky byly pořízeny pomocí UA, 80-100 m AGL, multispektrální kamera (zobrazen 1 kanál).

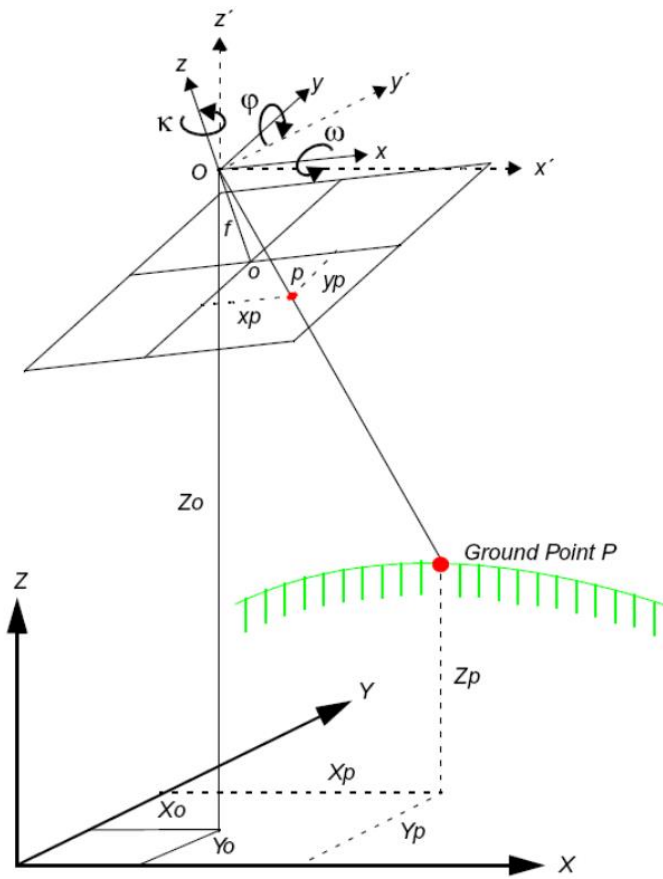
Vnější orientace snímku

Parametry vnější orientace souvisí s rotací a translací snímku. Poloha svazku je obvykle vyjádřena šesti parametry (Obrázek 43) – třemi souřadnicemi středu optického systému X_0 , Y_0 , Z_0 a úhlová orientace snímku ω , ϕ , κ (rotace os x , y , z). Prvky vnější orientace mohou být před vyrovnáním snímků neznámé, často vstupují do procesu vyrovnání jako parametry pořízené GNSS a IMU jednotkami na palubě.

Významnými prvky, který nepřímo souvisí s vnější orientací, resp. s geometrií a georeferencí mračna, jsou vlíčovací body. Využitím vlíčovacích bodů (*Ground Control Points*, GCPs) vnášíte do modelu dodatečnou informaci o známé poloze některých bodů, která může být využita k optimalizaci geometrie modelu, resp. ke zpřesnění svazkového vyrovnání. Informace z GCP lze efektivně využít dodatečně po svazkovém vyrovnání k jeho vyladění (*Alignment optimization*). Zahrnutí GCP do procesu zpracování dat vyžaduje znalost základních principů měření⁴⁷. Rozmístění vlíčovacích bodů v terénu je vhodné provádět rovnoměrně napříč celou zájmovou oblastí.

⁴⁷ Bolkas, D. (2019). Assessment of GCP number and separation distance for small UAS surveys with and without GNSS-PPK positioning. *Journal of Surveying Engineering*, 145(3), 04019007.

Štroner, M., Urban, R., Seidl, J., Reindl, T., & Brouček, J. (2021). Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs. *Remote Sensing*, 13(7), 1336.



Obrázek 43. Prvky vnitřní a vnější orientace. Zdroj: <https://web.pdx.edu>.

Transformace obrazových souřadnic

Cílem je převést dvojrozměrné souřadnice bodu na snímku na trojrozměrné souřadnice kartografického zobrazení (Obrázek 41). Abychom toho dosáhli, musíme vyřešit Rovnice 2, která představuje velmi zjednodušený model:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Rovnice 2. Převod dvojrozměrné souřadnice (u, v) na trojrozměrnou (X, Y, Z).

kde s je faktor měřítka, K parametry vnitřní orientace, $[R \ t]$ parametry vnější orientace. Vyjádření parametrů vnitřní a vnější orientace vyjadřuje Rovnice 3,

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Rovnice 3. Výpočet parametrů vnější orientace.

kde f_x, f_y jsou ohniskové vzdálenosti v pixelech, c_x, c_y souřadnice hlavního bodu, γ parametry distorze, r parametry rotační matice, t translační vektor.

Vztah reálných objektů na Zemi a obrazových bodů lze odvodit za předpokladu kolinearity. Tato podmínka předpokládá, že všechny obrazové body a jejich odpovídající body objektu na zemi jsou na přímce (poměry úseček jsou stejné). Kolineární rovnice pak slouží jako matematický základ pro centrální projekční zobrazování, viz Rovnice 4.

$$\begin{cases} x - x_0 - \Delta x = -f_x \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \\ y - y_0 - \Delta y = -f_y \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} \end{cases}$$

Rovnice 4. kolineární rovnice vztahu obrazových a reálných bodů.

kde jsou

x, y souřadnice obrazového bodu v souřadnicovém systému snímku x, o, y ,

x_0, y_0 souřadnice hlavního bodu v souřadnicovém systému snímku x, o, y ,

f_x, f_y ohnisková vzdálenost;

$\Delta x, \Delta y$ kompenzace systematické chyby distorzí kamery,

X_A, Y_A, Z_A souřadnice bodu objektu odpovídající obrazovému bodu,

X_S, Y_S, Z_S souřadnice projekčního centra v kartografických souřadnicích,

$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ elementy rotační matice – úhlové parametry ω, φ, κ ,

přičemž

$$\begin{cases} a_1 = \cos\varphi \cdot \cos\kappa \\ a_2 = -\cos\varphi \cdot \sin\kappa \\ a_3 = -\sin\varphi \\ b_1 = \cos\omega \cdot \sin\kappa - \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa \\ b_2 = \cos\omega \cdot \cos\kappa + \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa \\ b_3 = -\sin\omega \cdot \cos\varphi \\ c_1 = \sin\omega \cdot \sin\kappa + \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa \\ c_2 = \sin\omega \cdot \cos\kappa - \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa \\ c_3 = \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{cases}$$

9. Zpracování dat UAS

Využitím obyčejných digitálních senzorů a správné techniky pořizování snímků s vysokými překryvy, lze získat ucelenou mozaiku a digitální model povrchu snímaného území. V případě plošného mapování je modelem myšlen především povrch či terén území, v případě objektového snímání vzniká 3D model a textura jakéhokoli objektu. Metoda zpracování snímků s vysokými překryvy lze aplikovat mimo UA i na pozemní (či jakékoli jiné) snímání. V případě plošného mapování (např. mapování krajinného pokryvu) lze proceduru, resp. výstupy označit jako 2D (mozaika) a 2.5D (model), zatímco při snímání objektů (např. významného krajinného prvku) lze proces výstup jako 3D (model s texturou). Ona 0.5 dimenze navíc udělá z modelu povrchu model objektu, čímž získáme mimo horizontální struktury koruny stromu i její vertikální strukturu.

Počítačové zpracování takových snímků je často označováno jako tzv. *Structure-from-Motion* (SfM). Tato metoda pochází z oboru počítačového vnímání světa (*computer vision*) a její význam spočívá v rekonstrukci tvaru ze snímaného pohybu. SfM se využívá jako alternativa klasické fotogrammetrie a lze ho označit jako kvazi-fotogrammetrickou metodu. Řadou uživatelů je celý proces rekonstrukce snímků do podoby mozaiky a modelu chybně označován jako Structure-from-Motion. SfM má v celém výpočtu nenahraditelnou roli, avšak jedná se o metodu vyrovnání snímků.

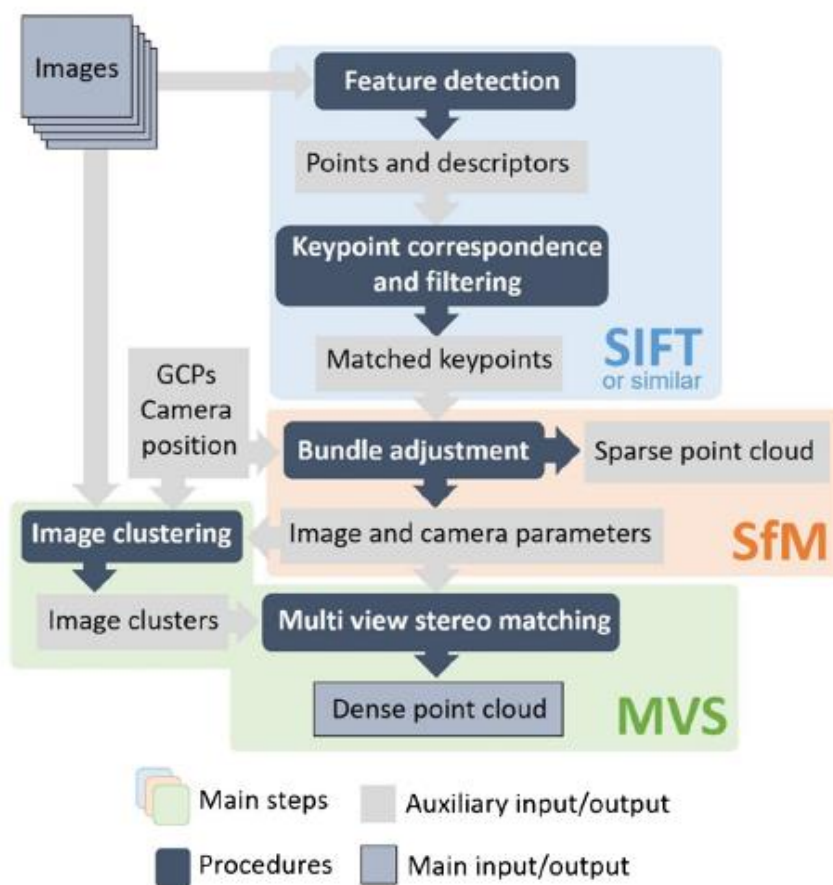
Celý proces lze rozdělit do pěti typických základních kroků, a to nalezení klíčových bodů (*feature detection*), vypočítání pozice a orientace snímků (*bundle adjustment*), vytvoření hustého bodového mračka (*multi-view stereo matching*), tvorba digitálního modelu (*interpolation*), ortorektifikace snímků a tvorba bezešvé mozaiky (*mosaicking*), viz také (Obrázek 44). V některých případech se však může pracovní postup lišit. První dva kroky (*feature detection*, *bundle adjustment*) jsou kritické, další kroky se liší v závislosti na typu dat, a především požadavcích na výstupy. Interpolaci a mozaikování můžou v procesu nahradit např. vytváření tzv. *mesh* a textury.

Jak je patrné níže (Obrázek 44) do procesu mohou vstupovat ještě *Camera positions* (část nebo všechny parametry vnější orientace snímku) a GCPs (vlíčovací body). Obojího lze využít s výhodou pro zpřesnění geometrie a georeference finálních výstupů. Parametry vnější orientace jsou obvykle záležitostí GNSS a IMU jednotek, které parametry měří za letu a ukládají do metadat každého pořízeného snímku. Vlíčovací body mají i přes využití metody zpřesňování polohy v reálném čase (např. RTK) stále nezastupitelný význam pro vytváření správné geometrie rekonstruované scény.

Za dílčími kroky procesní linky mohou v různých software stát odlišné algoritmy⁴⁸. Software, který dokáže rekonstruovat 3D scénu z 2D vstupních dat se nazývá jako *image-matching* (nikoli SfM). Takových existuje celá řada (viz Zpracování snímků), liší se nejenom algoritmy, ale i přístupem k uživateli (*user-friendliness*), možností uživatele zasáhnout do procesu (*blackboxing*) schopností zpracovat data různého původu a různých vlastností nebo otevřeností licence.

⁴⁸ Shalaby, A., Elmogy, M., & El-Fetouh, A. A. (2017). Algorithms and applications of structure from motion (SfM): A survey. *Algorithms*, 6(06).

Klodt, M., & Vedaldi, A. (2018). Supervising the new with the old: learning sfm from sfm. In *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)* (pp. 698-713).



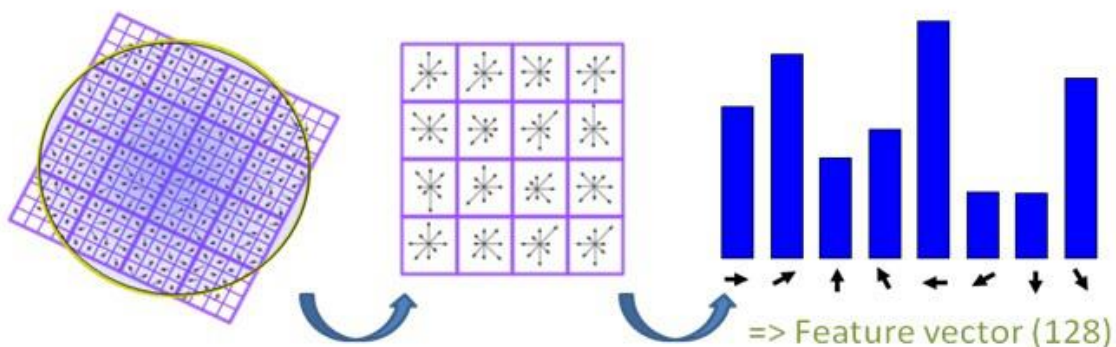
Obrázek 44. Schematický postup zpracování snímků do podoby bodového mračka. SIFT se uplatňuje pro hledání klíčových bodů, SfM zatupuje výpočet vnitřní a vnější orientace snímků a MVS tvoří finální bodové mračno.
 Zdroj: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>.

Identifikace prvků na snímku – SIFT

Pro rekonstrukci tvarů z překryvů mezi snímky je v prvním kroku potřeba najít množství tzv. klíčových bodů. K tomu slouží algoritmy počítačového vidění, které dokáží na snímcích identifikovat a popsat prvky, které lze následně využít pro párování snímků. Důležité je, aby algoritmus zvládl najít dostatečný počet spolehlivých prvků – tedy takových, které lze popsat i na snímcích s odlišným měřítkem, rotací, osvitem apod. Jedním z takových algoritmů je Scale Invariant Feature Transform (SIFT). Algoritmus lze využít např. pro tvorbu panoramatických fotografií z jednotlivých snímků, ovšem také pro krok k rekonstrukci prostorové scény. Invariantní zde znamená, že dokáže identifikovat robustní prvky nezávisle na změnách měřítka, orientaci, osvitu, šumu, kontrastu, a především změně úhlu pohledu a distorzím snímku. SIFT najde na každém snímku velké množství potencionálních bodů (stovky, tisíce, desetitisíce). Odfiltruje nedůvěryhodné prvky a zbytek prvků následně popíše deskriptorem – 128 rozměrným vektorem vypočítaným na základě obrazových gradientů v okolí prvku (Obrázek 45). Invariantní deskriptor bude stejný, resp. velmi podobný při nalezení shodného prvku na rozdílných sousedních (překrývajících se) snímcích.

Při hledání potencionálních bodů (*keypoints*) dochází k identifikaci bodů ve všech částech snímku, ovšem obrazové hrany (tj. přechodové hrany mezi plochami v obraze) a homogenní plochy jsou považovány za nedůvěryhodné, proto dochází k jejich filtraci. Hrany v tomto případě nemusí reflektovat lidské vnímání, jedná se o hrany v počítačovém vidění. Ty mohou být stálé, ale mohou i vznikat a zanikat v důsledku změny úhlu pohledu, osvitu apod. Detekce hran probíhá s využitím derivací jasových funkcí obrazu – hledáme pixely, kde se podstatně mění jas snímku. U homogenních ploch roste nejistota při výpočtu gradientů.

Hledání potencionálních bodů probíhá pomocí dvojího rozostření snímku Gaussovou funkcí a jeho následného odečtení, čímž dojde k odhalení lokálních extrémů snímku – pixely s větší či menší hodnotou v porovnání se sousedy v pohybujícím se okně o určitém počtu pixelů, tzv. kernelu. V 3x3 okně dojde k proložení trojrozměrné kvadratické funkce a podle jejího tvaru se odfiltrují nedůvěryhodné prvky (např. hrany). Zbylé prvky se popíší velikostí a orientací, v okolí prvku se vypočítají gradienty. Ty se počítají pro každý pixel v okně prvku 16x16 pixelů. Každý pixel má gradient s hodnotou velikosti a orientace. Oblast se rozdělí na 4x4 čtverce, ve kterých se spočítá histogram gradientu směru (Obrázek 45). Hledání sousedních snímků je pak hledáním nejpodobnějších vektorů euklidovskou vzdáleností, čímž dochází ke stanovení relativní orientace snímků. Na rozdíl od klasického leteckého snímkování není třeba mít snímky seřazené a držet uniformitu.

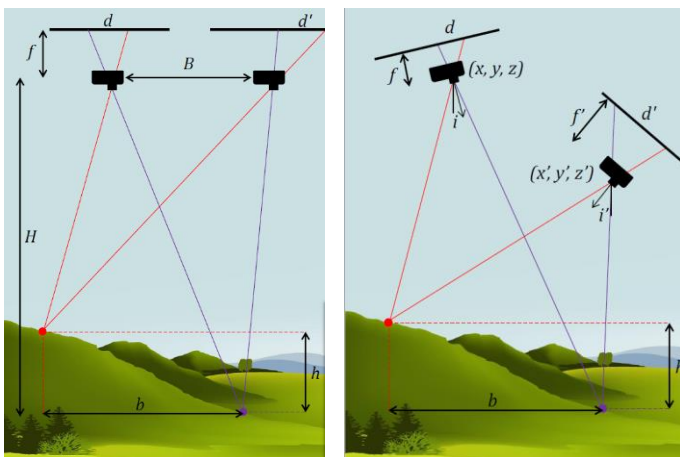


Obrázek 45. SIFT. Vypočítání gradientů velikosti a orientace v okně 16x16 pixelů, detail oblasti 4x4 pixely s popsányými gradienty, a výpočet histogramu gradientu. Zdroj: <https://gilscvblog.com/2013/08/18/a-short-introduction-to-descriptors>.

Výpočet parametrů snímků a kamery – SfM

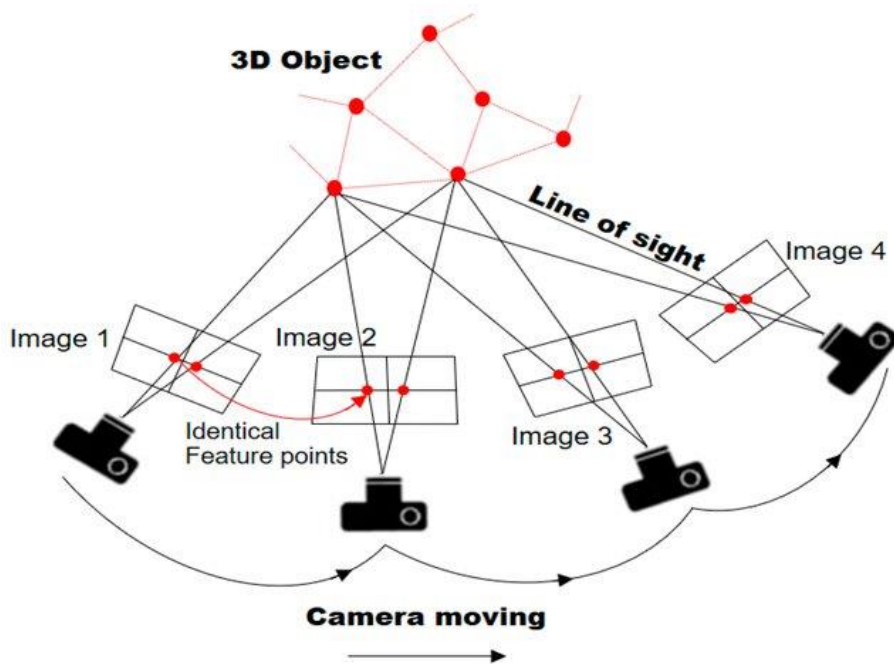
Klasická stereoskopická fotogrammetrie vychází z metod uzpůsobených pro lidské (binokulární) vnímání (Obrázek 46). Tradiční stereofotogrammetrie předpokládá známou výšku H , fokální vzdálenost f a vzdálenost mezi snímky B . Princip spočívá v měření vzdálenosti mezi identifikovanými prvky na sousedících snímcích d , d' a počítá relativní pozice prvků b , h . *Structure from Motion* je technika blízká fotogrammetrii využívající jak principu binokulárního vnímání, tak i předpokladu, že hloubka objektu (3D struktura) může být vnímána díky pohybu objektu nebo pozorováním objektu z různých úhlů (Obrázek 47). Toho může být využito právě pro rekonstrukci 3D objektů z částečně překrývajících se 2D snímků. Oproti stereofotogrammetrii SfM nevyžaduje informaci o pozici a orientaci snímků, důslednou uniformitu v překryvech snímků a parametry kalibrace kamery (vnitřní orientace). Principem je identifikace shodných prvků na snímcích a měření jejich vzájemných vzdáleností na snímcích d , d' (Obrázek 46). Poté jsou parametry snímků jako souřadnice (x, y, z) a (x', y', z') , orientace (i, i') , fokální vzdálenosti (f, f') a relativní pozice prvků (b, h) vypočítány pomocí tzv. **blokového vyrovnání svazků** (*bundle block adjustment*). SfM je stěžejním krokem v rekonstrukci objektů využívající klíčové body (viz SIFT) a pomocí svazkového vyrovnání počítá absolutní polohu svázaných bodů (*tie points*), čímž mimoděk vytváří tzv. řídké bodové mračno (*sparse point cloud*).

Vstupem do svazkového vyrovnání jsou relativní orientace snímků (výstup ze SIFT), které slouží jako odhad vstupních parametrů. Cílem vyrovnání je určení parametrů vnitřní a vnější orientace včetně prostorových souřadnic, u kterých je minimalizována vzdálenost mezi polohou pozorovaných a předpokládaných snímkových bodů (*reprojection error*). K tomu se využívá množství nelineárních rovnic metodami nejmenších čtverců. Proces začíná definováním lokálního (arbitrárního) souřadnicového systému dle nejhodnější dvojice snímků, přičemž každý snímek obsahuje klíčové body detekované i na sousedních snímcích. Tím jsou do lokálního souřadnicového systému připojovány další snímky a po každé iteraci je provedeno svazkové vyrovnání. Výstupy SfM jsou umístěné v měřítku a mají prostorovou referenci (z palubní GNSS jednotky a/nebo pozemních vlíčovacích bodů).



Obrázek 46. Tradiční stereofotogrammetrie (vlevo) a Structure from Motion (vpravo). Zdroj: Edwin Nissen, 2017.

Řídké bodové mračno je primární a kritický produkt celé procesní linky, všechny další výstupy jsou již deriváty. V praxi to znamená, pokud nemáme kvalitní rekonstrukci parametrů vnitřní i vnější orientace, resp. geometricky správné bodové mračno, nemá smysl pokračovat v dalších krocích zpracování dat.



Obrázek 47. Rekonstrukce objektu pomocí SfM. Patrný je výskyt identifikovaného prvku na několika sousedních snímcích.
Zdroj: 10.3390/rs16010072.

Tvorba zahuštěného orientovaného bodového mračna – MVS

Multi-View Stereo (MVS) zahušťuje řídké bodové mračno. MVS bylo oproti jiným stereo přístupům navrženo tak, aby se dokázalo vypořádat s velmi vysokým množstvím snímků a se snímky s odlišnými úhly záběru. To ovšem vyžaduje velkou schopnost škálování vstupních dat (tj. schopnost přechodu mezi měřítky snímků). Cílem MVS je rekonstruovat kompletní prostorový model objektu zájmu s využitím vstupních snímků o známé poloze. Oproti SfM tak tvorba bodového mračna pomocí MVS předpokládá již známou vnitřní i vnější orientaci vstupních snímků. MVS funguje obecně špatně pro lambertovské povrchy, tedy takové s dokonalým rozptylem světla (tj. bez zrcadlového odrazu). V takovém případě je pro MVS náročné scénu rekonstruovat (typicky např. interiéry). Rekonstruovat geometrie scény lze s využitím hloubkových map, bodových mračen nebo polygonových sítí (*mesh*).

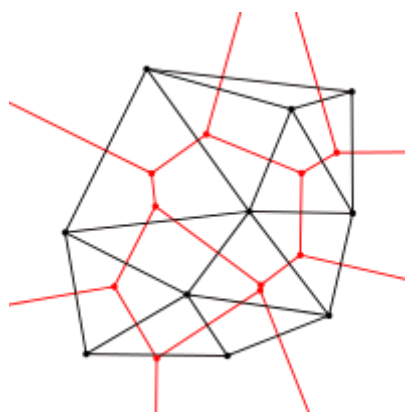
Celý proces MVS se obvykle skládá z několika dílčích algoritmů, přičemž princip je vždy podobný. Povrch objektu je rekonstruován pomocí expanze z řídkého mračna bodů, kde probíhá iterativní produkování nových sousedních ploch vedle těch stávajících, dokud není dosaženo úplné a husté pokrytí snímané scény. Vzniklé plochy pak prochází filtrací, která odstraní chybně položené body a zvýší spojitost vzniklého povrchu. Typickým příkladem jsou algoritmy od dr. Yasutaka Furukawa známé jako CMVS-PMVS. Clustering Views for Multi-View Stereo (CMVS) bere výstup ze SfM a zprostředkovává výběr obrazů s podobnými scénami a vytváří z nich multi-stereo projekci do shluků (*clusters*). Krok je využíván především ke snížení nároků na výpočetní kapacity. Patch-based Multi-View Stereo (PMVS) generuje dodatečné body do bodového mračna. Výhodou algoritmu je rekonstrukce pouze rigidních objektů, algoritmus tak odfiltruje nejasné např. pohybující se objekty. Filtrování nerigidních objektů je obvykle označováno jako *ghost-filtering*.

Rekonstrukce povrchu

Po vytvoření 3D orientovaného bodového mračna je možné přistoupit k rekonstrukci povrchu. Algoritmů pro rekonstrukci povrchu existuje celá řada, nicméně pro zpracování dat UAV jsou typické dva přístupy rekonstrukce povrchu chaotických množin bodů, a to Delaunayho triangulace a Poissonova rekonstrukce, a další metody bodové prostorové interpolace.

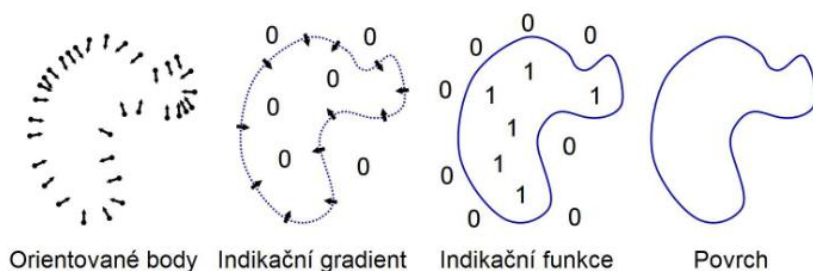
Delaunayho triangulace rozdělí MVS body množinou Thiessenových polygonů – šestiúhelníků. Splněny musejí být dvě podmínky, a to každý polygon obsahuje právě jeden bod a zároveň jsou ostatní body uvnitř polygonu blíže tomuto bodu než kterémukoliv jinému bodu. Algoritmus vytváří co možná nejvíce rovnostranné trojúhelníky tak, že vezme tři body a proloží jimi kružnici. Trojúhelník, který nebude obsahovat žádný bod, bude tvořit ve výsledné polygonální síti jeden polygon, viz Obrázek 48. Další podmínkou může být poměr mezi průměrnou vzdáleností nejbližších sousedních bodů a délkou hran potencionálního polygonu. Delaunayho triangulace je de-facto interpolací množiny bodů, která vytváří tzv. nepravidelnou trojúhelníkovou síť (Triangulated Irregular Network – TIN, Nepravidelná trojúhelníková síť).

TIN je polyedrický (mnohostěnný) model. Jeho výhodou je fakt, že hrany trojúhelníků jsou vedeny po singularitách a spojnice vrcholů trojúhelníků by tak měly co nejlépe kopírovat linie, na kterých dochází k výrazným změnám terénní plochy. Teoreticky má tak TIN větší přesnost a věrohodněji rekonstruuje nehomogenní povrchy, jeho struktura automaticky obsahuje informace o sklonu a směru tohoto sklonu.



Obrázek 48. Delaunayho triangulace, vytvořené trojúhelníky (černě) a Thiessenovy polygony (červeně).

Poissonova rekonstrukce povrchu je založena na principu, kdy v rámci rekonstrukce povrchu neprovádí operaci iterativně nad jednotlivými body, ale uvažuje najednou celou množinu bodů. To může přinášet odolnost vůči šumu a nerovnoměrnému rozložení bodů. Základní postup se skládá z výpočtu normál jednotlivých bodů, aproximace indikačního gradientu, odvozením této funkce z gradientu a samotné extrakce povrchu, viz Obrázek 49.



Obrázek 49. Kroky Poissonova rekonstrukce povrchu

Tvorba digitálního modelu obvykle využívá interpolační metody vážené inverzní vzdálenosti (*Inverse Distance Weighting*, IDW), která využívá váženého průměru. Tedy hodnota interpolovaného bodu se počítá jako vážený průměr hodnot bodu z okolí, kdy okolním bodům bodu je přiřazena váha nepřímo úměrná vzdálenosti od interpolovaného bodu. Metoda se obvykle využívá při nadírovém snímkování krajiny, má však tendenci vytvářet lokální maxima, proto je často nutná filtrace a klasifikace bodového mračka. Dobrým zdrojem ke studiu prostorové interpolace je mj. Mitas et Mitasova (1999)⁴⁹. Je také potřeba brát v úvahu fakt, že většina komerčních software neuvádí přesné informace o využívaných metodách a algoritmech, je proto možné, že může docházet k úpravám zmíněných metod případně k jejich kombinaci.

⁴⁹ http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/papers/mitas_mitasova_1999_2005.pdf

Shrnutí postupu

Každý komerční software využívá obvykle svoje vlastní, resp. přizpůsobuje si známé algoritmy. Procesní linka zpracování UA dat bude však většinou stejná, a to identifikace klíčových obrazových prvků, tvorba řídkého bodového mračna, jeho dohuštění a rekonstrukci povrchu. Dílčí výstupy jsou pak obvykle v podobě bodového mračna (*sparse cloud*), zahuštěného mračna (*dense cloud*), polygonové sítě (*mesh*) či interpolovaného mračna a textury či mozaiky (Obrázek 50). Níže je uveden přehled základních kroků při zpracování dat z bezpilotních prostředků a konkrétní příklady odpovídajících metod a algoritmů.

- Identifikace prvků v obraze a párování klíčových bodů
 - SIFT
- Svazkové vyrovnání a tvorba základního bodového mračna (SfM)
 - Bundler
- Tvorba orientovaného hustého mračna bodů (MVS)
 - CMVS+PMVS
- Rekonstrukce povrchu a tvorba textury
 - Delaunayho triangulace



Obrázek 50. Kroky zpracování dat UAS na příkladu Libosadu v kampusu ČZU. Řídké mračno bodů SfM (vlevo nahoře), zahuštěné bodové mračno (obarvené) MVS (vpravo nahoře), triangulace bodů, resp. polygonová síť (vlevo dole) a na modelu vytvořená textura (vpravo dole).

Zpracování snímků – konkrétní příklady postupů

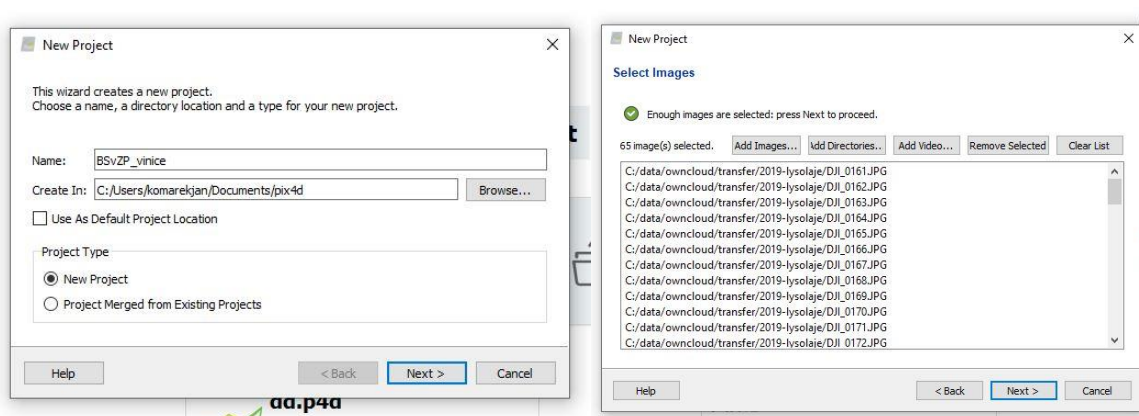
Existuje celá řada software pro zpracování dat UA, komerčních i open-source. Mezi nejznámější *image-matching* software bezpochyby patří Agisoft Metashape (od roku 2006), Pix4DMapper (od 2011). Na trh přišlo opožděně v roce 2016 i řešení od ESRI v podobě Drone2Map for ArcGIS, které převzalo interface Pix4D i většinu jeho funkcí. Od té doby se ESRI marně snaží dohnat vývoj a implementovat do Drone2Map svoje výpočetní jádra. V roce 2016 přišel na trh i slovenský software Reality Capture, který má však poměrně vysoký potenciál. Stran open-source či freeware software je třeba zmínit francouzský [MicMac](#), ale i např. [visualsfm](#), [bundler](#), [colmap](#) nebo [openmvs](#).

Pix4DMapper

Profesionální software ze švýcarské dílny poblíž městečka Lausanne. Pod značkou Pix4D se v dnešní době skrývá již celá řada specializovaných nástrojů pro desktopové, cloudové i mobilní platformy. Nejznámějším produktem je Pix4DMapper, který se zabývá zpracováním snímků pomocí SfM-MVS metod. Oblíbená je i volně dostupná aplikace Pix4DCapture pro plánování letu v terénu.

Pix4DMapper vyžaduje pro svůj plnohodnotný provoz komerční licenci, ale umožňuje i 15denní plnohodnotný trial⁵⁰, případně verzi Discovery, která uživatele limituje v tvorbě výstupů. Pix4D disponuje podrobným a velmi užitečným webovým manuálem⁵¹. Instalace Pix4D na disku je okolo 1 GB.

Workflow software je uživatelsky velmi přívětivé a celý proces probíhá skrze průvodce. Začíná se založením projektu a načtením vstupních snímků (Obrázek 51). V dalším kroku je třeba zkontrolovat informace, které pocházejí z EXIF⁵² vstupních snímků, především pak souřadnicový referenční systém (*Spatial Reference System* – SRS). Metadata lze importovat z externího souboru či je fotek naopak vyexportovat (Obrázek 52). Upravit v tomto kroku lze také model kamery a případně nastavit známé parametry vnitřní orientace (*Edit camera model*). Ve vyobrazené tabulce lze také ručně upravit parametry vnější orientace, případně nastavit jejich kvalitu. V dalším kroku je třeba definovat výstupní souřadnicový systém. Tento krok je třeba volit s ohledem na vstupní informace a případné využití vlíčovacích bodů tak, aby docházelo k co nejméně transformacím a nimi spojeným deformacím.

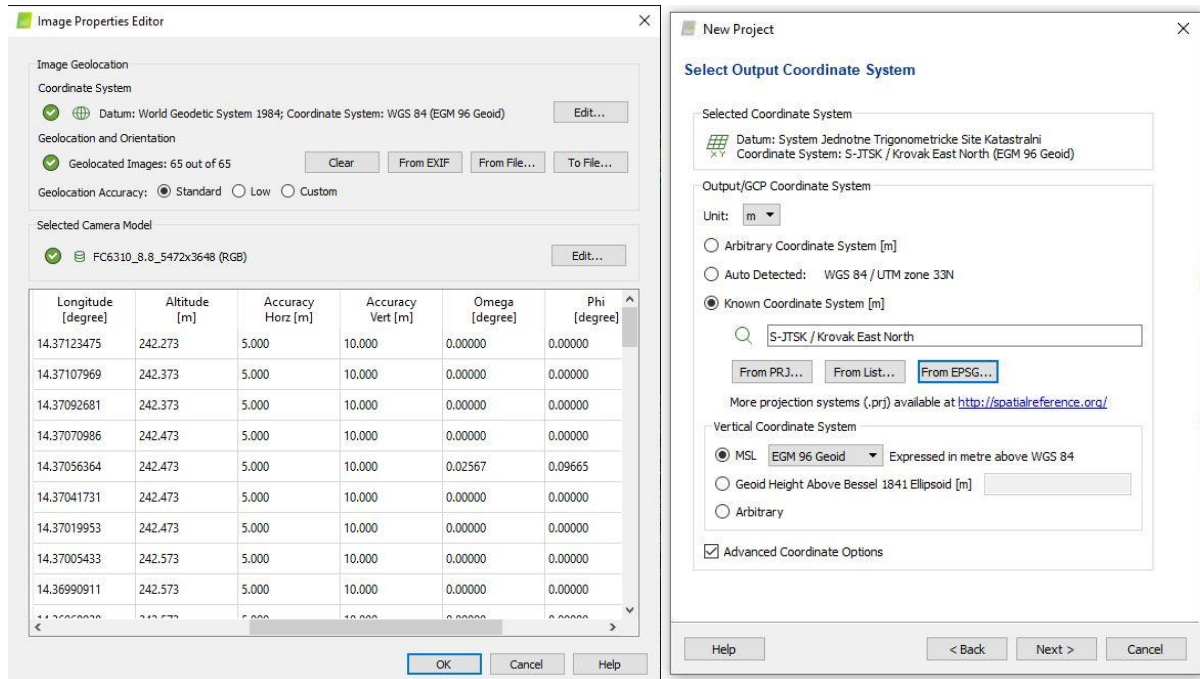


⁵⁰ <https://www.pix4d.com/try-software>

⁵¹ <https://support.pix4d.com/hc/en-us>

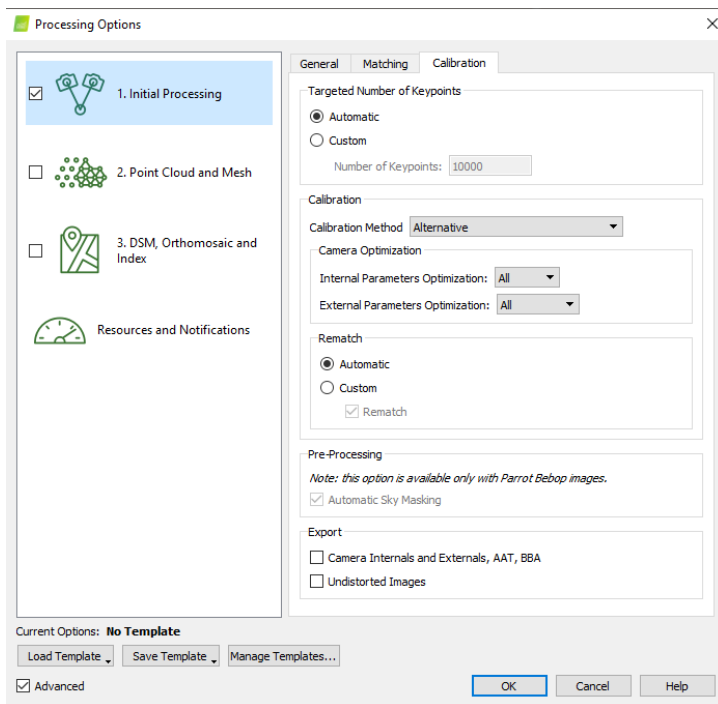
⁵² Formát metadat digitálního snímku – např. datum a čas pořízení snímku, parametry nastavení senzoru, geotag.

Obrázek 51. Pix4DMapper – vytvoření nového projektu, volba vstupních snímků.



Obrázek 52. Pix4DMapper – kontrola metadat, volba vstupního SRS (vlevo) a volba výstupního SRS (vpravo).

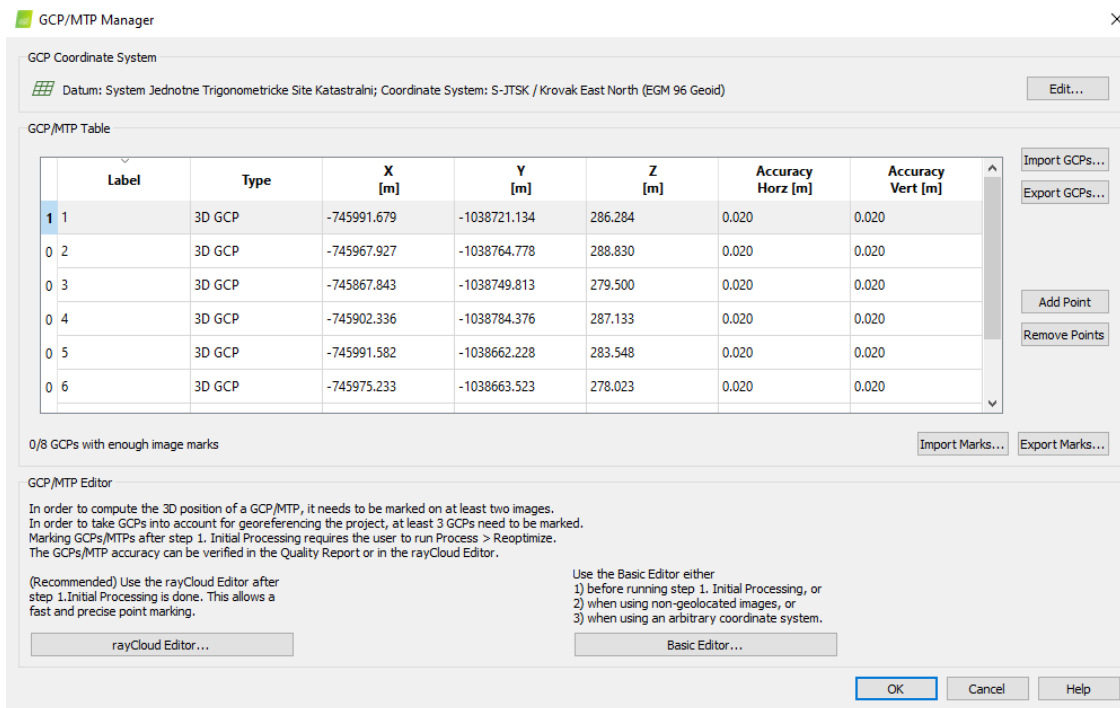
Po dokončení průvodce se uživateli zobrazí mapové okno s umístěním snímků (za předpokladu, že vstupní data obsahují geotag – souřadnice snímků získané z palubní GNSS). V levé dolní části je nyní třeba otevřít možnosti zpracování (*Processing Options*). Ty jsou rozděleny do třech kroků (1) tvorba bodového mračna pomocí SfM, (2) zahuštění mračna pomocí MVS a tvorba trojúhelníkové sítě, (3) tvorba výstupů. V prvním kroku se volí vstupní rozlišení snímků (Obrázek 53), v případě běžných senzorů je vhodné ponechat rozlišení 1, tj. originální nepřevzorkované. Dle typu senzoru lze snímkům uměle snížit kvalitu převzorkováním na 1/2, 1/4, 1/8, nebo naopak zvýšit na dvojnásobek. Nastavit lze dále také konkrétní parametry vyrovnání snímků, kalibrační metodu apod.



Obrázek 53. Pix4DMapper – možnosti zpracování.

Ve stejném okně lze pro software vyčlenit (omezit) RAM, CPU i GPU. K nárůstu RAM dojde při načtení vstupních snímků a poté při vytváření výstupů. Výkon CPU i GPU bude významně narůstat kolísat dle zvolených parametrů při odlišných výpočetních operacích. Pokud počítač disponuje dedikovanou GPU, je vhodné ji pro tyto výpočty využít.

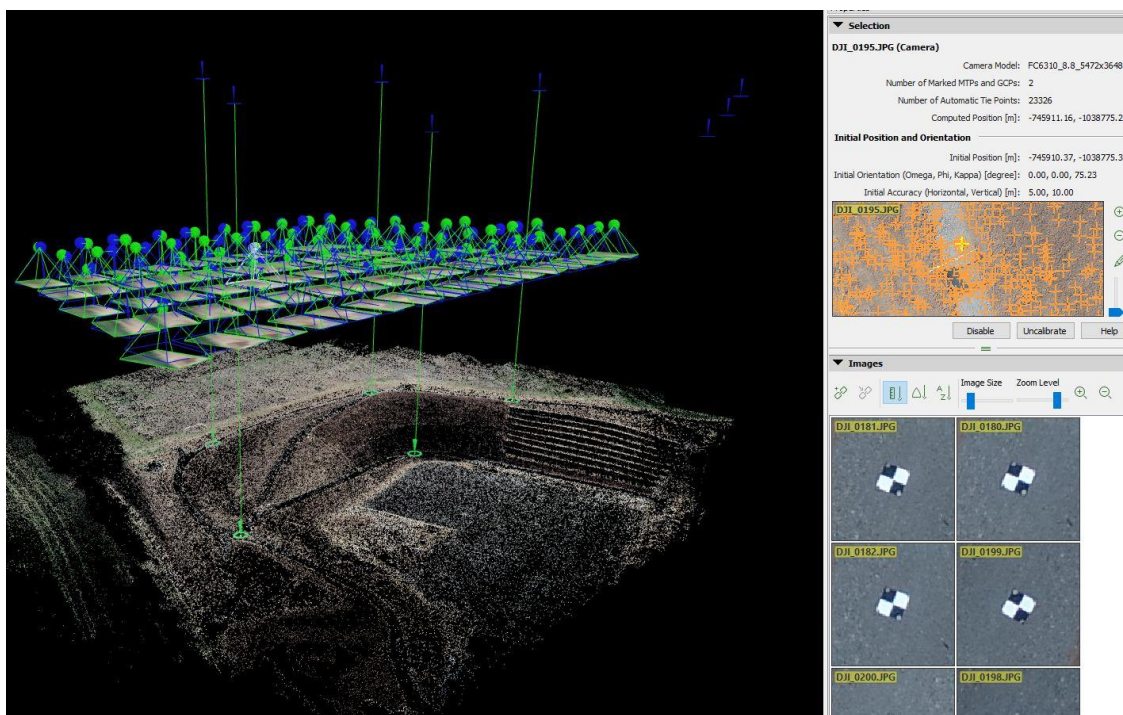
Po potvrzení nastavení je ještě zapotřebí aktivovat vlevo dole panel *Processing*, kde musí být zaškrtnutý zvolený krok a poté stačí zvolit *Start*. V mapovém okně budou následně barevně problikávat puntíky symbolizující polohu snímku. Odlišné barvy znamenají hledání klíčových bodů a jejich následné párování (svazkové vyrovnání). Po vytvoření bodového mračka je třeba vložit a označit vlíčovací body. K tomu slouží v horní části ikona terče – *GCP/MTP Manager*. Nástroj očekává nahrání textového souboru (csv), ve kterém budou sloupce v logické struktuře – id, x, y, z apod. (Obrázek 54). Je třeba dbát na záměnu os, správně nastavený SRS, záměnu desetinné tečky a čárky, či oddělovače. Skrze nástroj *rayCloud Editor* je pak třeba přiřadit konkrétním místům na fotkách příslušné body.



Obrázek 54. Pix4DMapper – nahrání vlíčovacích bodů pomocí textového souboru.

Zpřesnění polohy po vyrovnání pomocí vlíčovacích bodů (tzv. zalícování) je vhodné provádět až po svazkovém vyrovnání pomocí nástroje *rayCloud Editor*, avšak v případě, kdy je velký nesoulad mezi souřadnicemi ze snímků a na zemi změřenými je možné využít funkce *Basic Editor*, kde si ručně označit bod na několika málo snímcích a poté pokračovat s přesným umístěním v *rayCloud Editor*. Pokud jste velmi přesně určili polohu bodu na min. 4 snímcích, je možné využít automatického dohledání bodu na ostatních snímcích, tzv. *Automatic Marking* (Obrázek 55). Na obrázku níže je patrná vstupní (modře) a vypočítaná (zeleně) vnější orientace snímků, stejně také jsou patrné polohy vlíčovacích bodů – modře načtené souřadnice, zeleně umístěné.

V Pix4DMapper je panel vlevo, který funguje obdobně jako správce vrstev v systémech GIS a CAD. Lze si vypnout a zapnout vrstvy, které potřebují pro daný krok. Zároveň je možné částečně měnit jejich symbolologii.



Obrázek 55. Pix4DMapper – Umístování vlíčovacích bodů pomocí rayCloud Editor.

V dalším kroku je nutné provést přepočítání polohy s ohledem na umístění vlíčovacích bodů, tzv. *Reoptimize* (záložka *Process*). Poté lze přistoupit k zahuštění mračna (technikou MVS), tj. krok 2 v *Processing Options*. Zde se opět volí měřítko. To není nutné v tomto případě nastavovat na originální, nýbrž zpravidla se velikost rozlišení degraduje na $\frac{1}{2}$ nebo $\frac{1}{4}$. Zvolit lze také exporty mračna do textových souborů či tvorbu tzv. Mesh (tj. de-facto Triangulated Irregular Network nebo také 3D model). Bodové mračno lze klasifikovat (tj. přiřadit bodům třídy), což je zásadní krok pro tvorbu digitálního modelu terénu. Po důsledné kontrole mračna je možné přistoupit k tvorbě rastrových výstupů – ortomapy a modelu povrchu/terénu.

Všechny aktivované možnosti výstupů jsou automaticky exportovány v logické struktuře do složky s projektem. Pokud pracujete s multispektrálními daty nebo si chcete výstupy jenom přizpůsobit, je možné využít funkce *Mosaic Editor*, která funguje jako rastrová kalkulačka. Zásadním výstupem, který by se neměl v žádném případě opomíjet je *Quality report* (záložka *Processing*). V něm lze získat informace o kvalitě a důvěryhodnosti vašich výstupů, ale i základní informace o projektu jako takovém. Dozvědět se lze např. nasnímanou rozlohu území, průměrné prostorové rozlišení (tzv. *Ground Sampling Distance*), počet vyrovnaných snímků, počet klíčových bodů, dostanete náhled ortomozaiky a modelu povrchu (Obrázek 56). Dále je možné se dozvědět informace o překryvech snímků, spočítaných parametrech vnější orientace, parametry vnitřní orientace po svazkovém vyrovnání nebo informace o relativní či absolutní polohové chybě atd.

Husté bodové mračno či Mesh lze použít jako podklad pro tvorbu ortomozaiky a digitálního modelu povrchu. Při tvorbě DSM je kritickým krokem filtrace mračna⁵³. Pro porozumění *Quality report* je vhodné prostudovat návod⁵⁴.

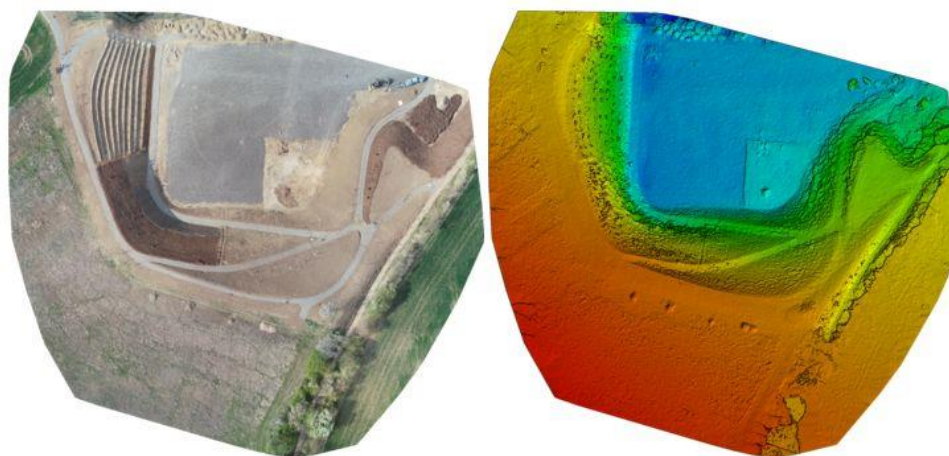
⁵³ <https://home.czu.cz/komarekjan/pix4d-surface-smoothing>

⁵⁴ <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558689>

Quality Check

🔍 Images	median of 48491 keypoints per image
🔍 Dataset	65 out of 65 images calibrated (100%), all images enabled
🔍 Camera Optimization	0.25% relative difference between initial and optimized internal camera parameters
🔍 Matching	median of 23514.2 matches per calibrated image
🔍 Georeferencing	yes, no 3D GCP

🔍 Preview



Obrázek 56. Pix4DMapper – náhled na Quality report.

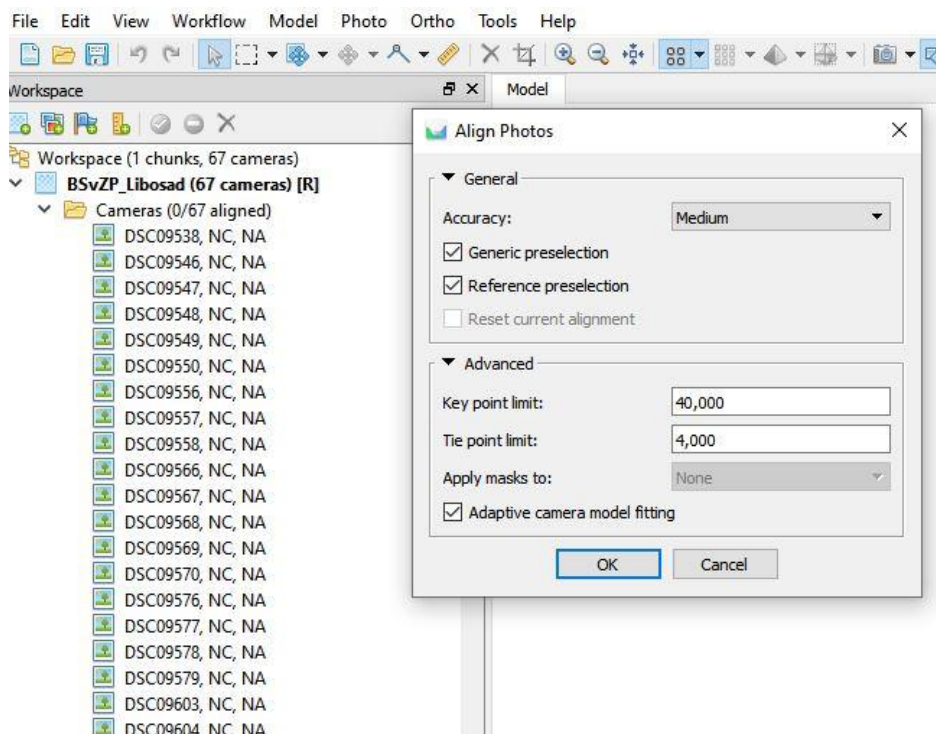
Závěrem lze konstatovat, že Pix4DMapper je uživatelsky přívětivý image-matching software, který dokáže zpracovat viditelná, multispektrální i termální UA data. Jeho výhody spočívá především v možnosti vytváření šablon (*templates*), ve kterých je možné si nadefinovat vlastní parametry procesní linky. Nevýhodou je pak nemožnost řetěžit výpočty za sebe, v jedné instanci je možné provádět jeden výpočet. Je tu však možnost omezit v instanci využití hardware a pustit různé instance s různými výpočty, ty lze pak pustit najednou. Slabinou Pix4D je také jeho předpoklad, že vstupní data musejí mít geografický souřadnicový systém (data z UA obvykle mají ESPG 4326), možnosti zpracovávat data v arbitrárním systému jsou velmi omezené. Pix4D také lépe funguje pro nadir a off-nadir snímky, pokud zpracováváte data pořízená na zemi, budou vaše možnosti opět velmi limitované.

Agisoft Metashape

Agisoft jsou spolu s Pix4D nejznámějšími producenty celosvětově využívaných komerčních software pro SfM-MVS zpracování snímků. Agisoft je ruská firma sídlící v Petrohradu, jejíž nejznámější produkt je software Metashape (dříve PhotoScan). Agisoft se distribuuje ve verzi Standard a Pro, přičemž možný je přístup skrze Python API. Metashape běží na Windows, macOS i Linuxu.

Metashape vyžaduje pro svůj plnohodnotný provoz komerční licenci, ale umožňuje i 30denní plnohodnotný trial, případně demo verzi, která uživatele limituje v tvorbě výstupů a uložení projektu. Agisoft dává uživatelům velkou podporu v podobě manuálů, tutoriálů a testovacích dat⁵⁵. Cena licencí jsou pro zajímavost k nahlédnutí i u českého distributora G4D⁵⁶.

Workflow je podobné jako u Pix4D, akorát je méně ve stylu průvodce a umožňuje tak mít větší kontrolu nad zpracováním dat (zároveň tak ale vyžaduje po uživateli alespoň základní orientaci ve workflow). Vše začíná nahráním snímků, hledáním klíčových bodů a svazkovým vyrovnáním (Obrázek 57). Možností *Accuracy* se v tomto případě myslí kvalita vstupních snímků ve smyslu použití jejich originálního či převzorkovaného rozlišení (stejně jako u Pix4D). Možnosti pre-selektce nám umožňují zrychlit párování klíčových bodů ve dvou režimech: (a) *Reference* – pokud je z geotagu dostupná souřadnice pořízeného snímku je možné tuto informaci využít a algoritmu tak říci, které snímky by spolu měly sousedit; nebo (b) *Generic* – párování proběhne nejprve na převzorkovaných snímcích, čímž dojde k vytipování a předurčení sousedních snímků. Obě možnosti proces urychlují, ale vždy záleží na typu a kvalitě vstupních snímků, někdy mohou vést pre-selektce naopak k obtížím.

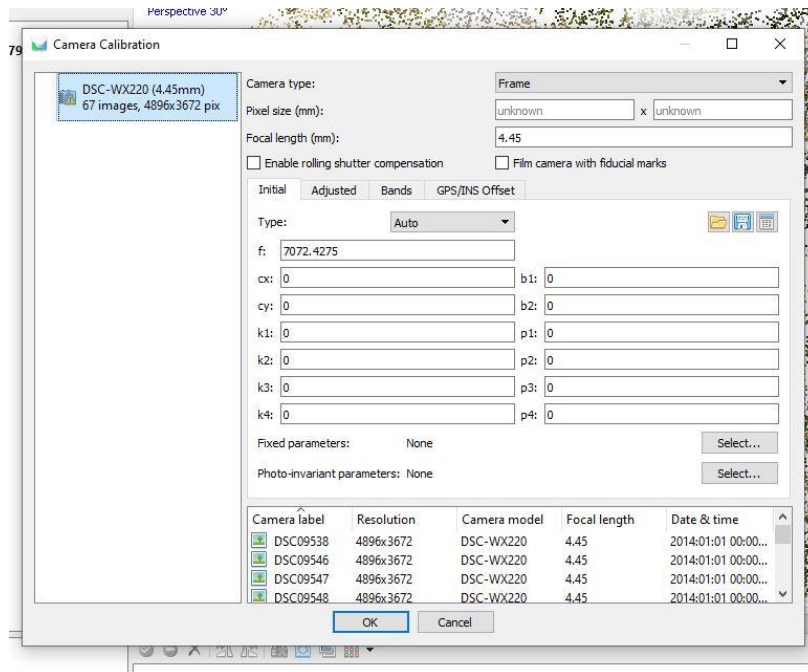


Obrázek 57. Metashape – nahrání snímků a jejich vyrovnání.

⁵⁵ <https://www.agisoft.com/support>

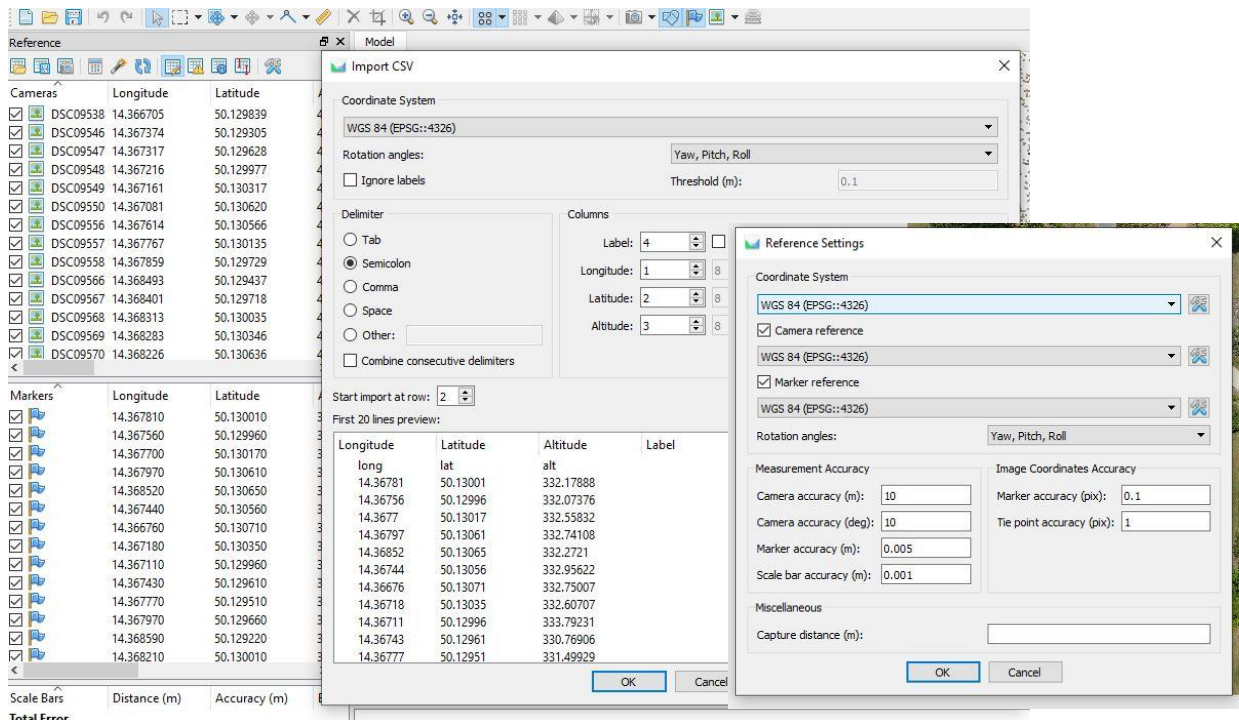
⁵⁶ <http://www.metashape.cz>

Před zahájením vyrovnání snímků je možné zkontrolovat informace z metadat snímků (EXIF) v záložce Reference dole. Pokud jsou známy parametry vnitřní orientace použité kamery, je vhodné parametry zadat ještě před zahájením výpočtu v záložce *Tools* nahoře (Obrázek 58).



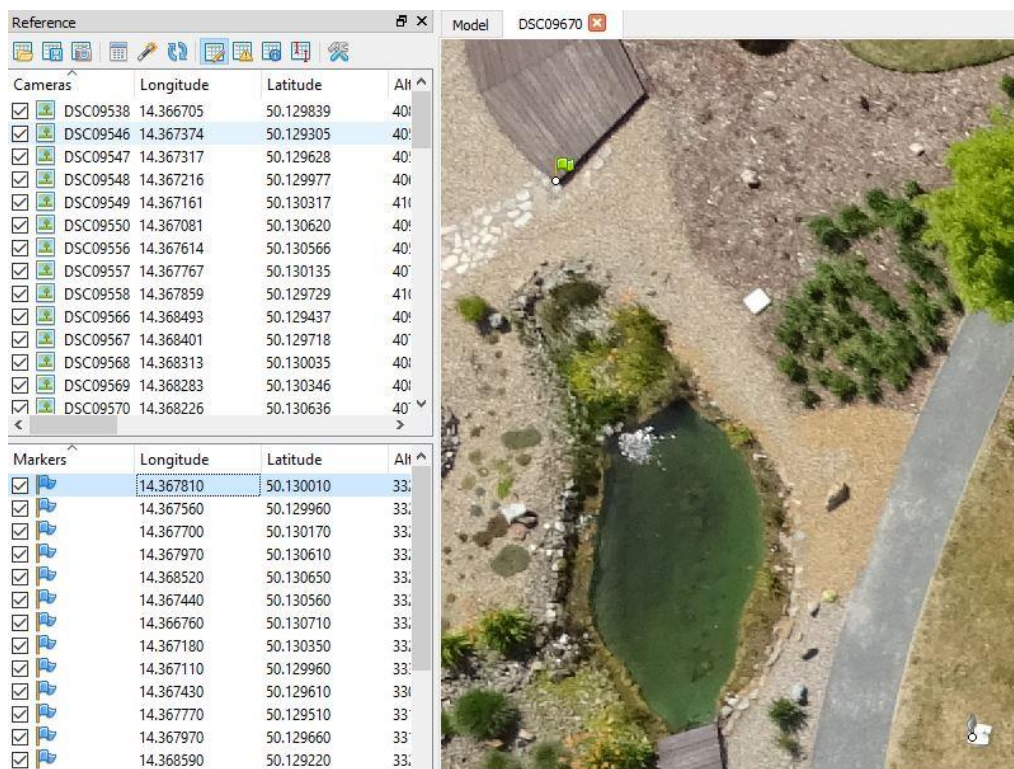
Obrázek 58. Metashape – zadání parametrů vnitřní orientace.

Po svazkovém vyrovnání je třeba nahrát vlčovací body. To se dělá v záložce Reference dole. Očekává se opět textový dokument s jasně definovanými sloupci. Metashape umožňuje při importu manipulovat s pořadím sloupců nebo např. volit použitý oddělovač (Obrázek 59). Důležité je nastavit patřičný souřadnicový referenční systém. Pokud se souřadnicové systémy snímků a vlčovacích bodů neshodují, je nutné tuto skutečnost důsledně nastavit v *Reference Settings* (ikona klíče a kladívka nahoře). Zde je také možné nastavit všem bodům kvalitu parametrů vnější orientace určené pomocí GNSS modulu, přesnost zaměření vlčovacích bodů – GCP (*Marker accuracy* v metrech) a přesnost vašeho určení bodu ve snímku (*Marker accuracy* v pixelech).



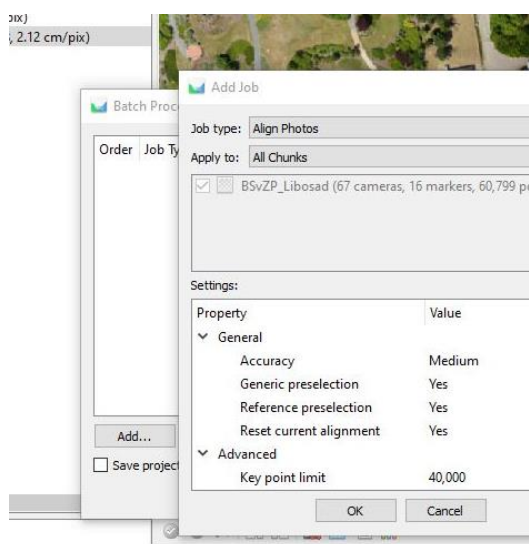
Obrázek 59. Metashape – import vlíčovacích bodů.

Umístování vlíčovacích bodů do fotek probíhá přiřazením pixelu snímku danému vlíčovacímu bodu. Pro snazší orientaci je vhodné si vyfiltrovat fotky, na kterých by hledaný bod mohl být. To je možné např. pomocí funkce *Filter Photos by Markers* – pravé tlačítko na marker (umístovaný bod). Dole v panelu *Photos* pak už zůstanou jenom ty fotky, na kterých by se mohl hledaný bod vyskytovat (filtrování probíhá dle porovnání souřadnic snímku a markeru, tj. pokud se hodně liší, funkce nemusí mít vypovídající hodnotu). Neumístěné body, resp. odhad jejich polohy, budou na snímku zobrazeny šedivým symbolem. Ten je možné vzít a přetáhnout na odpovídající polohu (*drag&drop*). Vámi umístěný bod bude mít podobu vlajky (Obrázek 60). Pokud není šedý symbol přítomný, je možné umístit bod pomocí kliku pravého tlačítka myši na zamýšlenou polohu a zvolit *Place marker* (pokud jsou souřadnice bodu nahrany) nebo *Add marker* (pokud vytvářím zcela nový bod). Po umístění bodů je nutné zkontrolovat prostorovou odchylku v panelu *Reference* a provést aktualizaci polohy bodového mračna – v tomto případě tzv. *Update Transform* (ikona dvou šipek nahoře). Poté by se měla významně snížit vypočítaná prostorová chyba. Body, které jsou zaškrtnuté vstupují do výpočtu optimalizace polohy, body bez zaškrtnutí fungují jako tzv. kontrolní. To znamená, že nebudou vstupovat do výpočtů, ale budou využity pro vypočítání výsledných polohových odchylek, tj. ke kontrole výsledků.



Obrázek 60. Ukázka umístování vlíčovacích bodů v Metashape.

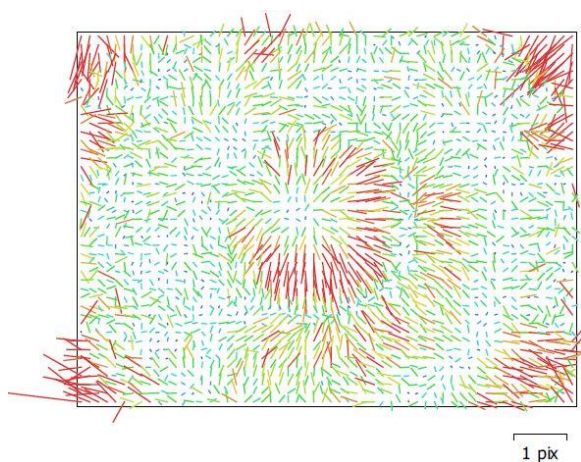
Po aktualizaci polohy s využitím vlíčovacích bodů je vhodné využít nástroje *Optimize Cameras*, který aktualizuje také vnitřní a vnější parametry svazkového vyrovnání. Poté je možné přistoupit k dohuštění bodového mračna, tvorbě trojúhelníkové sítě (*Mesh*), a tvorbě digitálnímu modelu povrchu a ortorektifikované mozaiky (všechny kroky jsou dostupné z menu *Workflow*). Pokud jste obeznámeni s optimálním procesem tvorby výstupů či pracujete s více datovými sadami naráz, je možné využít zřetězení jednotlivých kroků pomocí nástroje *Batch Processing* (Obrázek 61).



Obrázek 61. Metashape – zřetězení jednotlivých operací.

Metashape disponuje řadou pokročilých funkcí jako je např. klasifikace bodového mračka, kalibrací barev vstupních snímků včetně vyvážení bílé barvy nebo rastrovou kalkulačkou (vše dostupné ze záložky *Tools* nahoře). V případě, že potřebujete radiometricky korigovaný snímek je zde také dostupná funkce pro výpočet povrchové odrazivosti s využitím informací o albedu patřičného materiálu a informace z osvitového senzoru (irradiance).

Stejně jako v Pix4D je i zde nutným výstupem report o učiněných procesech a kvalitě výstupů (*File-Export-Generate report*). Report shrnuje všechny procesy, které jste během zpracování využili a rekapituluje všechna uživatelem definovaná nastavení a parametry. Zároveň poskytuje informace o dané lokalitě (rozloha, počet snímků, překryvy, GSD apod.), parametry vnitřní a vnější orientace a v neposlední řadě kvalitu geometrie svazkového vyrovnání a prostorovou kvalitu výstupů. Report také obsahuje informaci o geometrickém zkruslení optiky objektivu (Obrázek 62).



Obrázek 62. Metashape – odvozené geometrické zkruslení optického systému.

Všechny výstupy v levém panelu *Workspace* (bodové mračko, digitální model, ortomozaiku) lze vyexportovat do běžných obrazových formátů a pracovat s nimi v dalších software. Exporty lze snadno provést skrze pravé tlačítko myši či menu *File-Export*). Při exportu je třeba si dát pozor na zvolený SRS a případný geometrický posun.

Metashape je univerzální image-matching software, který dokáže zpracovávat data pořízená pod jakýmkoli úhlem včetně dat snímaných ze země i dat bez informace o poloze snímků. Dílčí algoritmy jsou obvykle součástí *blackboxingu*⁵⁷, avšak uživateli je dána možnost parametrizace. Každý dílčí výstup je možné zkontrolovat a případně upravit. Metashape obsahuje i řadu pokročilých nástrojů na klasifikaci bodového mračka, výpočty plocha a kubatur, nástroje *ghost-filtering* (odmaskování nerigidních objektů), *hole-filling* apod. Vedle Metashape Agisoft poskytuje aplikaci Viewer, která umožňuje uživatelům bez licence prohlížet výstupy výpočtů. Zajímavým nástrojem je také volná aplikace De-Lighter, která umožňuje lépe pracovat se světlem, resp. stíny v generovaných výstupech⁵⁸. Všechny produkty Agisoftu jsou multiplatformní.

⁵⁷ Postup výpočtu definovaný implementovaný v software bez možnosti uživatele znát detaily výpočtu.

⁵⁸ <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158376-agisoft-texture-de-lighter-general-workflow>

Zdroje praktických informací

Letecká informační služba, veškeré nutné informace pro plánování:

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

Letecká informační příručka – AIP:

https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm.

Příručka pro lety za viditelnosti – VFR:

<https://aim.rlp.cz/vfrmanual/index.html>.

Plán využití vzdušného prostoru – AUP:

<http://aup.rlp.cz>.

Mezinárodní virtuální letecká organizace, divize ČR:

<https://cz.ivaao.aero>

Rozdělení oblastí FIR v Evropě:

<https://www.eurocontrol.int/publication/flight-information-region-firuir-charts-2019>.

Další informace týkající se vysvětlení prostorů, frazeologie atd.:

<https://www.airguru.cz>.

Získání odborné způsobilosti k obsluze radiostanice – Český telekomunikační úřad:

<https://www.ctu.cz/prukazy-zkousky>.

Počasi pro plánování letu (sportovní létání):

<http://portal.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/letecke>.

Meteorologické informace Řízení letového provozu – METAR, TAF:

<http://meteo.rlp.cz>.

Meteorologická terminologie vydaná ČHMÚ:

<http://portal.chmi.cz/predpovedi/predpovedi-pocasi/ceska-republika/meteorologicka-terminologie>.

Dekódování METAR:

<https://www.airguru.cz/clanky-back/metar>.

Letecká komunikace:

<https://www.liveatc.net>.

Agisoft Knowledge Base:

<https://www.agisoft.com/support/tutorials/>.

Odborné zdroje informací

Aeronautical Information Management – Letecká informační služba Řízení letového provozu ČR.
Dostupná na: <https://aim.rlp.cz>.

Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.

Dvořák, P. (2017). *Letecká meteorologie*. ISBN: 978-80-7573-014-5.

Furukawa Y., Hernández, C. (2015). Multi-View Stereo: A Tutorial, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*: Vol. 9: No. 1-2, pp 1-148.

Chakhvashvili, E., Machwitz, M., Antala, M., Rozenstein, O., Prikaziuk, E., Schlerf, M., Naethe, P., Wan, Q., Komárek, J., ... & Rascher, U. (2024). Crop stress detection from UAVs: best practices and lessons learned for exploiting sensor synergies. *Precision Agriculture*, 1-29, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-024-10168-3>.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.

Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*. Vol. 2. Ieee, 1999.

Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, 1(2), 481-492.

Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606.

Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., ... & Zhuang, R. (2020). Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 12(6), 1001.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1. SCHÉMA PROUDĚNÍ – BERNOULLIHO TEORÉM. PRŮMĚR S_1 JE VĚTŠÍ NEŽ S_2 A PROTO RYCHLOST PROUDĚNÍ v_1 JE NIŽŠÍ NEŽ v_2 A TLAK P_1 JE VĚTŠÍ NEŽ TLAK P_2	14
OBRÁZEK 2. PROUDĚNÍ VZDUCH KOLEM PROFILU KŘÍDLA LETADLA. PROUDĚNÍ VZDUCHU RYCHLOSTÍ v_1 A TLAKEM P_1 POD PROFILEM KŘÍDLA (MODŘE), v_2 A P_2 NAD PROFILEM (ČERVENĚ). ÚHEL NÁBĚHU A JE ÚHLEM TĚTIVY A SMĚRU PŘITÉKAJÍCÍHO VZDUCHU, S NARŮSTAJÍCÍM ÚHLEM DOCHÁZÍ K VYŠŠÍMU OHYBU SVAZKŮ PROUDNIC VZDUCHU. SMĚR PŘITÉKAJÍCÍHO VZDUCHU JE ZLEVA. UPRAVENO DLE HTTPS://ELSPEDO.CZ	15
OBRÁZEK 3. WINGLETY NA KŘÍDLECH. VLEVO PŘÍPAD BEZ, VPRAVO S WINGLETEM. ORANŽOVĚ JE NAZNAČEN VZNIKLÝ VZDUŠNÝ VÍR, ZELENEĚ VZTLAK, ŠEDĚ KOMPENZACE TLAKU. ZDROJ: HTTPS://WWW.FACC.COM	15
OBRÁZEK 4. DŮSLEDEK NEWTONOVA POHYBOVÉHO ZÁKONA. VE SMĚRU VYSTUPUJÍCÍCH SVAZKŮ VZDUCHU VZNIKÁ SÍLA F_1 (AKCE) A V OPAČNÉM SMĚRU NA NÍ PŮSOBÍ AKCE F_2 (REAKCE), KTERÁ ZPŮSOBUJE VZTLAK KŘÍDLA (ČERVENĚ). SMĚR PŘITÉKAJÍCÍHO VZDUCHU JE ZLEVA. UPRAVENO DLE HTTPS://ELSPEDO.CZ	16
OBRÁZEK 5. OSY POHYBU LETADLA SE ZNÁZORNĚNÝMI SMĚROVÝMI OVLÁDACÍMI PRVKY A TYPY POHYBU.	17
OBRÁZEK 6. PROTISMĚRNÝ CHOD SOUSEDNÍCH ROTORŮ ZABRAŇUJE SVÉVOLNÉ ROTACI STROJE NA MÍSTĚ.....	18
OBRÁZEK 7. OSY POHYBU ROTOROVÝCH UA, SMĚR POHYBU STROJE JE VE SMĚRU Kladné OSY X.....	18
OBRÁZEK 8. ŘÍZENÍ KOPTÉR ZMĚNOU TAHU JEDNOTLIVÝCH VRTULÍ: (A) KLOPENÍ, (B) KLONĚNÍ, (C) ZMĚNA KURZU, (D) ZMĚNA LETOVÉ HLADINY. ŠIPKA URČUJE SMĚR ORIENTACE STROJE.	19
OBRÁZEK 9. SCHÉMA FUNKČNÍCH CELKŮ DRONU. UPRAVENO DLE 10.1145/3093241.3093251.	21
OBRÁZEK 10. SCHÉMA PALUBNÍ ELEKTROINSTALACE POZEMNÍHO VÍCE-ROTOROVÉHO VRTULNÍKU. ESC = ELECTRONIC SPEED CONTROLLER (REGULÁTOR OTÁČEK), VPS = VISUAL POSITIONING SYSTÉM (DOPLŇKOVÁ ČIDLA TELEMETRIE), LED = LIGHT EMITTING DIODE (DIODY).	25
OBRÁZEK 11. ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM, ZDROJ: HTTPS://WWW.RADIO2SPACE.COM/COMPONENTS-OF-ELECTROMAGNETIC-SPECTRUM/	26
OBRÁZEK 12. OBLAČNOST OBLOHY V OSMINÁCH UDÁVANÁ POMOCÍ SYMBOLŮ. SYMBOLY POPOŘADĚ REPREZENTUJÍ: JASNO, JASNO, SKORO JASNO, MALÁ OBLAČNOST, POLOJASNO, OBLAČNO, OBLAČNO, SKORO ZATAŽENO, ZATAŽENO. POSLEDNÍ SYMBOL INDIKUJE, ŽE OBLAČNOST NELZE ROZETNAT. ANGLICKÉ TERMÍNY FEW – A FEW (CLOUDS), SCT – SCATTERED, BKN – BROKEN, OVC – OVERCAST VYUŽIVÁ MEZINÁRODNÍ LETECKÁ METEOROLOGIE A JSOU I SOUČÁSTÍ ZPRÁV METAR/TAF.....	29
OBRÁZEK 13. VRSTVY A TYPY OBLAČNOSTI. ZDROJ: HTTPS://CZ.IVA0.AERO	30
OBRÁZEK 14. PROVOZ PODKATEGORIE A1. ZDROJ: HTTPS://WWW.FLYNEX.IO	34
OBRÁZEK 15. PROVOZ PODKATEGORIE A2. ZDROJ: HTTPS://WWW.FLYNEX.IO	35
OBRÁZEK 16. PROVOZ PODKATEGORIE A3. ZDROJ: HTTPS://WWW.FLYNEX.IO	35
OBRÁZEK 17. POHYB UA V ŘÍZENÉM OKRSKU. ZDROJ: LETEJTEZODPOVEDNE.CZ	38
OBRÁZEK 18. VERTIKÁLNÍ ČLENĚNÍ VZDUŠNÉHO PROSTORU ČR. ZDROJ: HTTPS://AIM.RLP.CZ	40
OBRÁZEK 19. LETECKÁ MAPA ICAO S VYZNAČENÝMI LETIŠTI (ŠEDÁ KRUŽNICE S DRÁHOU, ČERVENÁ KRUŽNICE ZNAČÍ PŘIŘAZENÝ NOTAM), ZAKÁZANÉ/OMEZENÉ/NEBEZPEČNÉ PROSTORY (ČERVENÉ VYPLNĚNÉ POLYGONY), A DOČASNĚ VYHRAZENÉ/REZERVOVANÉ PROSTORY (ČERVENÉ A HNĚDÉ POLYGON, V PŘÍPADĚ JEJICH VÝPLNĚ DOŠLO K PŘIŘAZENÍ AUP), PROSTORY KOLEM ŘÍZENÝCH LETIŠŤ (MODŘE A FIALOVÉ POLYGONY). ZDROJ: HTTPS://AISVIEW.RLP.CZ	41
OBRÁZEK 20. SCHÉMATICKÉHO ČLENĚNÍ VZDUŠNÝCH PROSTORŮ.....	42
OBRÁZEK 21. NÁHLED DO APLIKACE DRONVIEW S PATRNÝMI GRIDY.	44
OBRÁZEK 22. PŘEKRYVY LETECKÉHO SNÍMKOVÁNÍ (VLEVO), LETOVÉ LINIE ZA HRANICE ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ (VPRAVO).....	47
OBRÁZEK 23. ZMĚNA FOOTPRINT SNÍMKU PŘI ZMĚNĚ LETOVÉ HLADINY PŘI STEJNÉM FOV. ZDROJ: 10.1109/JSEN.2018.2850856.	48
OBRÁZEK 24. DJI PILOT 2 – DEFINOVÁNÍ ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ MISE.....	49
OBRÁZEK 25. DJI PILOT 2 –ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ MISE.....	50
OBRÁZEK 26. DJI PILOT 2 –POKROČILÉ NASTAVENÍ MISE.....	50
OBRÁZEK 27. NASTAVENÍ PRACOVNÍ OBLASTI OMEZUJÍCÍ POHYB DRONU V SYSTÉMU eMOTION.....	51
OBRÁZEK 28. NASTAVENÍ VZLETU A PŘISTÁNÍ V SYSTÉMU eMOTION.....	52
OBRÁZEK 29. PLÁNOVÁNÍ LETOVÝCH BLOKŮ V SYSTÉMU eMOTION.....	52
OBRÁZEK 30. ZOBRAZENÍ DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU JAKO PODKLADOVÉ VRSTVY PŘI PLÁNOVÁNÍ LETU V SYSTÉMU eMOTION ...	53
OBRÁZEK 31. ZOBRAZENÍ SESTUPNÉHO KORIDORU PRO PŘISTÁNÍ DRONU V SYSTÉMU eMOTION.....	53
OBRÁZEK 32. PIX4DCAPTURE – NÁPOVĚDA PRO PLÁNOVÁNÍ MISE, ZDROJ: SUPPORT.PIX4D.COM	54

OBRÁZEK 33. PIX4DCAPTURE – NASTAVENÍ PARAMETRŮ MISE, ZDROJ: SUPPORT.PIX4D.COM	55
OBRÁZEK 34. PIX4DCAPTURE – DOPORUČENÉ HODNOTY PODÉLNÝCH I PŘÍČNÝCH PŘEKRYVŮ A ÚHLU KAMERY, ZDROJ: SUPPORT.PIX4D.COM	55
OBRÁZEK 35. SCHÉMA KOMUNIKACE DGPS	57
OBRÁZEK 36. SCHÉMA KOMUNIKACE RTK. ZDROJ: WINGTRA.COM.....	58
OBRÁZEK 37. DJI PILOT 2 - SMĚRODATNÁ ODCHYLKA PŘED A PO PŘIPOJENÍ RTK	58
OBRÁZEK 38. SCHÉMA KOMUNIKACE PPK. ZDROJ: WINGTRA.COM.....	59
OBRÁZEK 39. UKÁZKA LETOVÉHO DENÍKU.	62
OBRÁZEK 40. SOUŘADNICE GEOMETRICKÉHO STŘEDU. VLEVO SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM BUŇKY SNÍMKU, VPRAVO SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM SNÍMKU.	65
OBRÁZEK 41. GEOMETRICKÝ VZTAH SOUŘADNIC BODU V TERÉNU A SOUŘADNIC TÉHOŽ BODU NA SNÍMKU. ZDROJ: 10.3390/APP12105024.	66
OBRÁZEK 42. ENORMNÍ PROJEV NEGATIVNÍ RADIÁLNÍ DISTORZE OPTIKY. SMĚREM OD STŘEDU SNÍMKU DOCHÁZÍ KE ZVĚTŠUJÍCÍMU SE KRUHOVÉMU ZKRESLENÍ. SNÍMKY BYLY POŘÍZENY POMOCÍ UA, 80-100 M AGL, MULTISPEKTRÁLNÍ KAMERA (ZOBRAZEN 1 KANÁL).	67
OBRÁZEK 43. PRVKY VNITŘNÍ A VNĚJŠÍ ORIENTACE. ZDROJ: HTTPS://WEB.PDX.EDU.	68
OBRÁZEK 44. SCHEMATICKÝ POSTUP ZPRACOVÁNÍ SNÍMKŮ DO PODOBY BODOVÉHO MRAČNA. SIFT SE UPLATŇUJE PRO HLEDÁNÍ KLÍČOVÝCH BODŮ, SFM ZATUPUJE VÝPOČET VNITŘNÍ A VNĚJŠÍ ORIENTACE SNÍMKŮ A MVS TVOŘÍ FINÁLNÍ BODOVÉ MRAČNO. ZDROJ: HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S40725-019-00094-3.	72
OBRÁZEK 45. SIFT. VÝPOČÍTÁNÍ GRADIENTŮ VELIKOSTI A ORIENTACE V OKNĚ 16X16 PIXELŮ, DETAIL OBLASTI 4X4 PIXELY S POPSANÝMI GRADIENTY, A VÝPOČET HISTOGRAMU GRADIENTU. ZDROJ: HTTPS://GILSCVBLOG.COM/2013/08/18/A-SHORT-INTRODUCTION-TO-DESCRIPTORS.....	73
OBRÁZEK 46. TRADIČNÍ STEREOFOTOGRAMMETRIE (VLEVO) A STRUCTURE FROM MOTION (VPRAVO). ZDROJ: EDWIN NISSEN, 2017.	74
OBRÁZEK 47. REKONSTRUKCE OBJEKTU POMOCÍ SFM. PATRNÝ JE VÝSKYT IDENTIFIKOVANÉHO PRVKU NA NĚKOLIKA SOUSEDNÍCH SNÍMCÍCH. ZDROJ: 10.3390/RS16010072.....	75
OBRÁZEK 48. DELAUNAYHO TRIANGULACE, VYTVOŘENÉ TROJÚHELNÍKY (ČERNĚ) A THIESSENOVY POLYGONY (ČERVENĚ).....	77
OBRÁZEK 49. KROKY POISSONOVA REKONSTRUKCE POVRCHU.....	77
OBRÁZEK 50. KROKY ZPRACOVÁNÍ DAT UAS NA PŘÍKLADU LIBOSADU V KAMPUSU ČZU. ŘÍDKÉ MRAČNO BODŮ SFM (VLEVO NAHOŘE), ZAHUŠTĚNÉ BODOVÉ MRAČNO (OBARVENÉ) MVS (VPRAVO NAHOŘE), TRIANGULACE BODŮ, RESP. POLYGONOVÁ SÍŤ (VLEVO DOLE) A NA MODELU VYTVOŘENÁ TEXTURA (VPRAVO DOLE).	78
OBRÁZEK 51. PIX4DMAPPER – VYTVOŘENÍ NOVÉHO PROJEKTU, VOLBA VSTUPNÍCH SNÍMKŮ.	80
OBRÁZEK 52. PIX4DMAPPER – KONTROLA METADAT, VOLBA VSTUPNÍHO SRS (VLEVO) A VOLBA VÝSTUPNÍHO SRS (VPRAVO).	80
OBRÁZEK 53. PIX4DMAPPER – MOŽNOSTI ZPRACOVÁNÍ.	81
OBRÁZEK 54. PIX4DMAPPER – NAHRÁNÍ VLÍCOVACÍCH BODŮ POMOCÍ TEXTOVÉHO SOUBORU.....	82
OBRÁZEK 55. PIX4DMAPPER – UMISŤOVÁNÍ VLÍCOVACÍCH BODŮ POMOCÍ RAYCLOUD EDITOR.	83
OBRÁZEK 56. PIX4DMAPPER – NÁHLED NA QUALITY REPORT.	84
OBRÁZEK 57. METASHAPE – NAHRÁNÍ SNÍMKŮ A JEJICH VYROVNÁNÍ.....	85
OBRÁZEK 58. METASHAPE – ZADÁNÍ PARAMETRŮ VNITŘNÍ ORIENTACE.....	86
OBRÁZEK 59. METASHAPE – IMPORT VLÍCOVACÍCH BODŮ.....	87
OBRÁZEK 60. UKÁZKA UMISŤOVÁNÍ VLÍCOVACÍCH BODŮ V METASHAPE.....	88
OBRÁZEK 61. METASHAPE – ZŘETĚZENÍ JEDNOTLIVÝCH OPERACÍ.	88
OBRÁZEK 62. METASHAPE – ODVOZENÉ GEOMETRICKÉ ZKRESLENÍ OPTICKÉHO SYSTÉMU.....	89

Příloha 2 – Normální postupy

Normální postupy		UA: ID:	
Činnost	Položka	Stav	
Předletová příprava – plánování letu	Podmínky provozu v místě letu	ICAO Mapa	Aktuální
		Třída vzdušného prostoru	Vyhovující
		AIP	Zkontrolováno
		Prostory – AISview, AUP, UUP	Zkontrolováno
		NOTAM	Zkontrolováno
	METEO	Předpověď CHMI	Vyhovující
		LIS	Bez výstrah
		METAR nejbližšího letiště	Vyhovující
		TAF nejbližšího letiště	Vyhovující
		Meteo-radar	Vyhovující
		Dohlednost	Vyhovující, nad 800 m
		Základna mraků	Vyhovující, 150 m AGL
		Vítr	Vyhovující, 6-8 m/s
		Venkovní teplota	Vyhovující, 22-25 °C
	Elektromagnetické jevy	Geomagnetické pole země	V normě
		Sluneční aktivita	V normě
	Letová způsobilost	Kontrola dokladů UAS a posádky	Platné, úplné
		Kontrola počtu hodin do prohlídky UAS	Vyhovuje
Zdravotní stav	Zhodnocení zdravotního stavu posádky	Vyhovuje	
Normální postupy		UA: ID:	
	Položka	Stav	
Seznam vybavení (minimální vybavení je uvedeno tučně)	Doklady k UAS, doklady pilotů	Vyhovující, uložené	
	UAS	Zajištěn, uložen	
	Akumulátory	Nabity, uloženy	
	Nabíječka	Zajištěna, uložena	
	Generátor napětí (+palivo), prodlužovací kabely	Zajištěny, uloženy	
	Řídicí stanice	Zajištěna, uložena	
	Pracovní počítač, zdroj	Zajištěn, uložen	
	Vysílač pilota velitele	Zajištěn, uložen	
	Vysílač pilota operátora	Zajištěn, uložen	
	Monitor FPV se stativem, FPV brýle	Zajištěno, uloženo	
	Sada náradí a náhradních dílů	Zajištěno, uloženo	
	Anemometr/ Látkový ukazatel směru větru + teploměr	Zajištěno, uloženo	
	Záchrané prostředky: Lékárníčka, hasící přístroj	Zajištěno, uloženo	
	Mobilní telefony všech pracovníků	Zajištěny	
	Výstražné tabulky, páska, reflexní vesty, přílby	Zajištěno, uloženo	
	Dalekohled	Zajištěn, uložen	
	Požadovaná užitečná zátěž s příslušenstvím	Zajištěna, uložena	
	Vysílačky pro piloty	Zajištěny, uloženy	
	Letecká radiostanice	Zajištěna, uložena	

Normální postupy		UA:	
		ID:	
Činnost	Položka	Stav	
Předletová příprava na místě	METEO v místě	Venkovní teplota	Mezi 10 až 40 °C
		Dohlednost	Nad 800 m
		Síla větru	Do 10 m/s
		Základna mraků	Nad 50 m AGL
		Bez podmínek pro tvorbu námrazy	Splněno
	Vzdálenosti	Obhlídka terénu	Zabezpečeno
		Vzdálenost od nepoučených osob	Bezpečná, dle kategorie
		Vzdálenosti od majetku	Bezpečná, dle kategorie
		Ochrana osobních údajů	Zabezpečeno
	Trasa letu	Naplánována trasa letu na místě	Vhodná, bez kolizí
		Kontrola kapacity akumulátoru pro let	Proveden
	Zhodnocení místa	Nouzová plocha	Vybrána, zajištěna
		Řídicí stanoviště	Vybráno, zajištěno
		Návrat na místo startu	Bez kolize
		Viditelnost UA po dobu letu	Dosažitelné
	Komunikace se spolupracovníky	Poučení pracovníků	Provedeno
		Poučení zúčastněných	Provedeno
		Zdravotní stav pracovníků	Vyhovující
	Komunikace se stanovištěm letových provozních služeb	Frekvence letové radiostanice	Nastavena
	Ostatní provoz	Sledování provozu	Bez provozu
	Záchranné prostředky	Mobilní telefon	Funkční, nabitý
		Lékárnička	Zajištěna
		Hasící přístroj	Zajištěn
Startovací plošina	Startovací plošina	Vybrána, zajištěna	
Akumulátor	Stav	Nezapojen, nepoškozen	
Předletová prohlídka	Celkový stav	Umístění	Vyhovující
		Kontrola stavu a upevnění částí	Vyhovující
		Neoprávněná modifikace	Nenastala
	Motorové gondoly	Povrch	Bez trhlin
		Upevnění motoru	Bez vůle
		Stavu motoru	Čistý bez poškození
		Upevnění vrtule	Bez vůle
		Stav vrtule	Čistý bez poškození
	Podvozek	Uchycení podvozku	Pevné
		Stav podvozku	Bez poškození
	Užitečný náklad	Typ, počasí	V souladu
		Uchycení	Vyhovující
	Padákový systém	Mechanický stav a uchycení	Vyhovující

Normální postupy		UA:	
		ID:	
Činnost		Položka	Stav
Před oživením	Komunikace	Pozemní stanice	Zapnuta
		ATIS	Přiját
		TWR Letové povolení	Povoleno
		Nastavení frekvencí	Nastaveno
	Vložení akumulátoru	Hlavní vypínač	Vypnut
		Akumulátor vložen a zajištěn	Vložen a zajištěn
	Užitečný náklad	Stav	Zajištěn
	Startovací plošina	Zabezpečení	Zabezpečena
		Volnost prostoru	Volný
		Přesun UA na plošinu	Přesunut
	Padákový systém	Zajištění systému	Zajištěn
	Řídící soustava	Vysílač pilota velitele	Zapnuto
		Vysílač pilota operátora	Zapnuto
		Stav baterií vysílačů	Vyhovující
		Vysílač pilota– přípust'	Plyn stažen na 0 %
Vysílač pilota– nastavení letového režimu		Zapnuto	
Oživení	Řídící soustava	Hlavní vypínač	Zapnuto
		Akustický signál začátku kalibrace	Proběhl
		Párování vysílače pilota velitele a přijímače	Spárováno
		Úroveň signálu vysílače pilota	Vyhovující
		Data z telemetrie	K dispozici
	Kontrola akumulátoru	Teplota akumulátoru	Pod 50 °C
		Rozdíl teplot v trupu a okolí	Pod 10 °C
		Kapacita akumulátoru	Dostatečná pro let
	Užitečné zatížení	Stav	Upevněn
		Stav	Oživen a připraven
	GPS	Stav	Připravena ke vzletu
	Kompas	Kalibrace kompasu	Zkalibrován
	Před startem	Čas	Zapsán
		Volnost prostoru	Volno
		Síla a směr větru	Do 10 m/s
Odjištění záchraného padákového systému		Odjištěn	
TWR povolení ke vzletu		Povoleno	
Signalizace startu		Proveden	

Normální postupy		UA:	
		ID:	
Činnost		Položka	Stav
Vzlet	Vzlet a svislé stoupání	Vertikální rychlost	Ca 2-3 m/s
		Vis ve výšce 2-3 m AGL	Proveden
		Kontrola letu	Bez vibrací a hluku
		Kontrola užitečného zatížení	Upevněn a funkční
	Akumulátor	Kapacita	Dostatečná
Na finále	Komunikace	Signalizace přistání	Proveden
	Poloha	Finální bod	Dosažen
	Meteo podmínky	Síla a směr větru	Do 10 m/s
	Prostor	Startovací plošina	Zabezpečena
Volnost prostoru		Volno	
Přistání	Sestup	Vertikální rychlost	S ohledem na užitečné zatížení
		Dosednutí	Přípustí
		Rotory	Zastaveny
		Čas	Zapsán
		TWR hlášení	Ukončení činnosti
	Teploty	Regulátory	V povolené mezi
Akumulátor		V povolené mezi	
Po přistání	Vypnutí	Hlavní vypínač	Vypnut
		Zajištění padákového systému	Zajištěn
		Užitečné zatížení	Vypnuto, zajištěno
		Vysílač pilota velitele	Vypnut
		Vysílač pilota operátora	Vypnut
	Servisní stanoviště	Přenos UAS	Dokončen
		Akumulátor	Vyjmuto a uloženo
		Drak a komponenty UAS	Očištěny
		Zápis do deníku	Proveden
Příprava na transport	Akumulátory	Umístění	Všechny mimo UA
		Teplota	Vyhovující
		Bezpečné uložení	Uloženo
	Nabíjecí soustava	Nabíječky	Vypnuty, uloženy
		Generátor napětí (+palivo)	Vypnut, zajištěn
	Padákový systém	Kontrola zajištění	Zajištěn
	Řídící soustava	Vysílač pilota velitele	Vypnut, uloženo
		Vysílač pilota operátora	Vypnut, uloženo
	Užitečné zatížení	Data	Zajištěna
		Umístění	Zajištěno v boxu
	FPV	Umístění	vypnuto, v boxu
		Řídící stanoviště	Stav
			Záchranné prostředky
	Plošiny	Startovací/servisní plošina	Zajištěna, uložena
UA	Umístění	Zajištěno	
	Doklady	Uloženy	

Název: Provoz bezpilotních letadel
Podnázev: Praktické aspekty provozu, plánování letu a zpracování dat
Autoři: Jan Komárek, Jiří Rous
Vydavatel: Česká zemědělská univerzita v Praze
Určeno pro: posluchače ČZU
Vydání: první, elektronické
Rok vydání: 2024
ISBN: 978-80-213-3383-3
Licence: Creative Commons CC BY-NC 4.0





Fly safe!