

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Aplikace dronů ve výškovém měření

Bakalářská práce

Autor:	Adam Hubálovský
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika
Vedoucí práce:	RNDr. Bc. Němec Radek, Ph.D.

Hradec Králové

květen 2023



Zadání bakalářské práce

Autor:	Adam Hubálovský
Studium:	S18FY004BP
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika
Název bakalářské práce:	Aplikace dronů ve výškovém měření
Název bakalářské práce AJ:	Drone application in aerial measurement
Zadávací pracoviště:	Katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta
Vedoucí práce:	RNDr. Bc. Radek Němec, Ph.D.
Oponent:	Ing. Petr Voborník, Ph.D.
Datum zadání závěrečné práce:	4.4.2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval, pod vedením vedoucího práce samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne 10.05.2023

Podpis studenta:

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářská závěrečná práce je uložena v souladu s rektorským výnosem č. 13/2017 (Řád pro nakládání s bakalářskými, diplomovými, rigorózními, disertačními a habilitačními pracemi na UHK).

V Hradci Králové dne 10. 05. 2023

Podpis studenta:

Poděkování

Rád bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce RNDr. Bc. Radku Němcovi, Ph.D. za hodnotné rady a odborné vedení této práce a Výzkumnému a šlechtitelskému ústavu za možnost spolupráce na měření.

Anotace

HUBÁLOVSKÝ, Adam. *Aplikace dronů ve výškovém měření*. Hradec Králové, 2023. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Bc. Němec Radek, Ph.D. 51 s

Bakalářská práce se zabývá využitím dronů ve výškovém měření. Cílem práce bylo zjistit způsoby leteckého měření za pomoci dronů a následně realizovat letecké multispektrální měření. Praktická část byla realizována ve Výzkumném a šlechtitelském ústavu Holovousy.

Klíčová slova

Letecké měření, drony, výškový monitoring, multispektrální snímání

Annotation

HUBÁLOVSKÝ, Adam. Application of drones in height measurement. Bachelor thesis at the Faculty of Science, University of Hradec Králové. Thesis supervisor RNDr. Bc. Němec Radek, Ph.D. 51 p

The bachelor thesis deals with the use of drones in aerial measurement. The aim of the thesis was to find out the methods of aerial measurements using drones and then to realize aerial multispectral measurements. The practical part was carried out in the Research and Breeding Institute Holovousy.

Keywords

Aerial measurements, drones, altitude monitoring, multispectral sensing

Obsah

Úvod	10
1 Cíle práce.....	11
2 Typy dronů pro výškové měření	12
2.1 Více-rotorové drony	12
2.1.1 Konstrukce.....	12
2.1.2 Elektronika.....	13
2.1.3 Pohon.....	13
2.1.4 Baterie	13
2.1.5 Výhody	14
2.1.6 Nevýhody	14
2.1.7 Využití.....	14
2.2 Křídlaté drony.....	16
2.2.1 Konstrukce.....	16
2.2.2 Pohon	16
2.2.3 Letový čas.....	16
2.2.4 Výhody	16
2.2.5 Nevýhody:.....	17
2.2.6 Využití pro letecký monitoring:.....	17
2.2.7 Shrnutí křídlatých dronů	18
2.3 Hybridní drony	18
2.3.1 Konstrukce.....	18
2.3.2 Pohon.....	19
2.3.3 Výhody	19
2.3.4 Nevýhody	19
2.3.5 Využití pro letecký monitoring.....	20
2.3.6 Shrnutí.....	20

2.4	Právní a bezpečností rizika provozu dronů.....	21
3	Fyzika letu	22
3.1	Základy aerodynamiky	22
3.2	Mechanika letu více-rotorových dronů.....	24
3.3	Stabilizace a řízení dronů	25
4	Způsoby leteckého měření.....	28
4.1	Fotogrammetrie	28
4.2	LiDAR.....	29
4.3	Multispektrální snímání.....	30
5	Praktická část	32
5.1	Metodologie praktického měření	32
5.2	Výběr a stavba dronu	33
5.3	Plánování a provedení měření.....	36
5.4	Zpracování a analýza dat	40
5.5	Poučení pro příští projekt	42
6	Závěr	45
	Reference.....	46
	Seznam tabulek a obrázků	51

Úvod

Drony, jejich stavbou, létáním a filmováním se zabývám již od prvního ročníků střední školy. Za tu dobu jsem vyzkoušel množství různých typů, od křídlatých po více rotorové, od úplně autonomních po plně manuálně řízené. Také jsem několik více rotorových dronů postavil.

Před několika lety se mi naskytla příležitost vyzkoušet letecké měření pomocí multispektrální kamery RedEdge MX, která snímá v červeném, modrém, zeleném, "red edge" a blízkém infračerveném spektru (NIR). Měření bylo zamýšleno pro výzkum ovocných stromů ve výzkumném a šlechtitelském ústavu v Holovousích.

Bakalářská práce se dělí na dvě části. První, teoretická část se zabývá úvodem do problematiky leteckého monitoringu pomocí dronů a stručným popisem aktuálních technologií a jejich využitím. Dále se zabývá stručnou teorií letu a různými způsoby leteckého monitoringu. V praktické části se zabývám samotnou stavbou, nastavováním, testováním a uváděním do provozu-schopného stavu quadcopter pro přesné multispektrální monitorování ovocného sadu ve Výzkumném a šlechtitelském ústavu v Holovousech.

1 Cíle práce

Mým úkolem bylo postavit více-rotorový dron, který bude schopný autonomně snímat stromy pomocí multispektrální kamery, za účelem vytvoření fotogrammetrické mapy. Se samotnou fotogrammetrickou mapou následně pracovali kolegové z katedry biologie. Zabýval jsem se konstrukcí dronu z uhlíkových kompozitů. Dále jsem zkoumal nastavení letového profilu pro snímání s maximálním rozlišením, v kontextu letového času, změny meteorologických podmínek a bufferu kamery. Nastavoval jsem a počítal vhodné parametry autonomní mise pro možnost opakovaného, rychlého a kvalitního záznamu multispektrálních dat. Cíl bakalářské práce vychází z výše uvedeného úkolu.

Cílem bakalářské práce je:

1. Popsat stavbu více-rotorového dronu, který bude schopný autonomně snímat stromy pomocí multispektrální kamery, za účelem vytvoření fotogrammetrické mapy;
2. Zjistit, jak dosáhnout kvalitního, opakovatelného a autonomního sběru leteckých multispektrálních dat, pro další vyhodnocování.

Dále se v praktické části zamýšlím nad možnostmi stavby nového dronu pro zvýšení letového času z původních 12 minut až na 52 minut. Zvýšením přesnosti navigace a přikládám seznam vhodných komponent pro další verze.

2 Typy dronů pro výškové měření

Kapitola, včetně podkapitol byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)

Drony, neboli bezpilotní létající systémy, se stávají stále oblíbenějšími nástroji pro výšková měření a fotogrametrii, díky jejich schopnosti získávat detailní data z nedostupných míst. V oblasti výškového měření se používají tři základní typy dronů: více-rotorové, křídlaté a hybridní. Více-rotorové drony disponují větším počtem rotorů a jsou ideální pro nízké a pomalé lety, které umožňují získání snímků vysokého rozlišení. Křídlaté drony mají pevná křídla a díky své rychlosti, většímu dosahu a době letu jsou vhodné pro mapování rozsáhlých ploch. Hybridní drony kombinují výhody obou předchozích typů, což jim umožňuje využít stabilní let více-rotorových dronů a zároveň dosáhnout většího dosahu a rychlosti letu jako křídlaté drony. Výběr vhodného dronu závisí na konkrétních požadavcích a omezeních daného projektu, jako jsou terén, velikost mapované oblasti a požadavky na rozlišení snímků.

2.1 Více-rotorové drony

Více-rotorové drony jsou typem bezpilotních létajících systémů, které využívají více rotorů pro generování vztlaku a pohyb. Jejich konstrukce se skládá z několika klíčových prvků, jako jsou rámy, motory, vrtule, elektronické regulátory otáček (ESC), řídicí jednotky, senzory a baterie.

2.1.1 Konstrukce

Konstrukce více-rotorových dronů se liší podle počtu rotorů, přičemž nejběžnějšími variantami jsou čtyři (quadcoptery), šest (hexacoptery) a osm (octocoptery) rotorů. Rámy těchto dronů mohou být vyrobeny z různých materiálů, jako je plast, hliník, karbonové kompozity nebo kombinace těchto materiálů.

Rámy více-rotorových dronů jsou navrženy tak, aby minimalizovaly hmotnost a maximalizovaly pevnost a tuhost. Materiály, jako jsou karbonové kompozity, nabízejí vynikající poměr pevnosti k hmotnosti, zatímco hliníkové a plastové rámy jsou obvykle lehčí a levnější. Rámy se často skládají z centrální desky, na kterou jsou

upevněny všechny ostatní komponenty, a ramen, která spojují motory a vrtule s centrální deskou.

2.1.2 Elektronika

Řídící jednotka (flight controller, FC) více-rotorových dronů je základním prvkem, který zajišťuje stabilitu a ovladatelnost dronu. Řídící jednotka zpracovává data z různých senzorů, jako jsou gyroskopy, akcelerometry, GPS moduly, barometry a další, a řídí motory prostřednictvím elektronických regulátorů otáček (ESC). ESC je klíčovým prvkem, který řídí rychlost otáčení motorů a tím i let dronu. Každý motor má svůj vlastní ESC. Moderní řídicí jednotky zpracovávají data pomocí pokročilých algoritmů, jako jsou PID regulátory a Kalmanovy filtry, které zajišťují plynulý a stabilní let.

2.1.3 Pohon

Více-rotorové drony používají elektromotory ke generování tahu, který je potřebný k udržení dronu ve vzduchu. Elektromotory jsou bezkartáčové (brushless) motory, které nabízejí vyšší účinnost, delší životnost a menší potřebu údržby oproti kartáčovým (brushed) motorům. Výkon motorů je dán jejich velikostí, provozním napětím dronu a jejich charakteristickými otáčkami na volt (kv). Na elektromotory jsou přímo upnuty vrtule, vyrobené většinou z uhlíkových kompozitů nebo tvrzeného plastu. Výběr vhodné kombinace motorů a vrtul závisí na velikosti dronu, hmotnosti a jeho požadovaném výkonu a charakteristice letu. Platí, že motory s nižšími otáčkami a většími vrtulemi jsou efektivnější, reakce na řízení je nicméně pomalejší a méně ostrá. To ale není nevýhodou například při monitoringu. Motory s většími otáčkami a menšími vrtulemi se používají u malých, akrobatických dronů. Při výběru vhodného motoru vycházíme z datasheetů výrobce a většinou navrhujeme tak, aby při 50% výkonu motoru jeho tah byl při použití n motorů $1/n$ hmotnosti celého dronu včetně vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a baterií.

2.1.4 Baterie

Výběr vhodné baterie je klíčový pro dosažení maximálního letového času. Kapacita baterie se standardně pro menší, „costumer“ drony uvádí v miliampere-hodinách (mAh), a vyšší kapacita znamená delší dobu letu. Nicméně, vyšší kapacita také

znamená vyšší hmotnost, která zvyšuje zatížení dronu a snižuje jeho délku letu. Optimalizace velikosti baterie je tedy kompromisem mezi letovým časem a hmotností. U menších dronů se standardně používají LiPol (Lithium-Polymer) či LiIon (Lithium-Ion) baterie o nominálním napětí 11,1V a s kapacitou okolo 4000mAh. U větších dronů se používají baterie o nominálním napětí alespoň 22,2V, s kapacitou od 6000mAh.

2.1.5 Výhody

Výhodou vícerotorových dronů je jejich schopnost zůstat a viset na jednom místě a provádět pomalé a přesné manévry. Další výhodou je jejich VTOL schopnost. Vícerotorové drony mají schopnost svislého vzletu a přistání (VTOL – Vertical Takeoff and Landing). Tato schopnost se hodí pro práci v náročném terénu a podmínkách. To je ideální pro úkoly, jako je průzkum, monitorování, záchranářské mise, inspekce infrastruktury, zemědělské aplikace nebo filmování. Díky modulární konstrukci lze na více-rotorové drony snadno připevnit různé druhy nástrojů a senzorů, což zvyšuje jejich flexibilitu a širokou škálu použití. Například multispektrální kamery, LiDAR, kamery s velkým zoomem, IR kamery, senzory měření plynů. Výhodou dronu je jejich levný a ekologický provoz, bezpečnost personálu, který je obsluhuje a velikost.

2.1.6 Nevýhody

Ve srovnání s křídlatými drony mají vícerotorové některé nevýhody, jako například kratší dobu letu (pohybující se okolo 10-30 minut), omezenou rychlost a dolet. Tento faktor může být limitující pro inspekce a výškové měření velkých ploch. Velkou nevýhodou je bezpečnost dronů. V případě selhání některého z rotorů většinou dochází ke ztrátě kontroly a pádu dronu. To u křídlatých dronů většinou nehrozí. Ty generují letem přirozený vztlak a při ztrátě výkonu motorů tzv. klouzají. I při chybě ovládací elektroniky je u křídlatých dronů, při správné konstrukci šance neřízeného doklouzání na zem. U více-rotorových dronů při chybě elektroniky následuje volný pád z oblohy.

2.1.7 Využití

Více-rotorové drony jsou využívány pro letecký monitoring díky svým výhodám v preciznosti řízení, VTOL schopnostem a variabilitě užitečného zatížení. Jejich

použití zahrnuje monitorování životního prostředí, zemědělský průzkum, mapování a geodetické měření, inspekce infrastruktury, průzkum a záchranné operace a vizuální záznam.

Zemědělství

Více-rotorové drony umožňují přesné a detailní zemědělské průzkumy, což pomáhá zemědělcům optimalizovat hnojení, zavlažování, sklizeň a ochranu proti škůdcům. Na rozdíl od křídlatých dronů (viz kapitola 2.2) jsou tyto drony používány pro monitorování menších ploch, z nižší výšky, kde nás zajímá kvalitativní, a ne kvantitativní pohled na úrodu, či jednotlivé rostliny. Díky jejich pomalé rychlosti letu může být snímání prováděno z nízké výšky, s vysokým rozlišením a velkou přesností. Této vlastnosti jsem využíval při monitoringu sadů ve výzkumném ústavu v Holovousech.

Mapování a geodetické měření

Více-rotorové drony mají většinou snímací zařízení upevněné na tzv. gimbalu. Gimbal stabilizuje snímací zařízení ve třech osách a umožňuje její vertikální náklon. Díky této vlastnosti (na rozdíl od křídlatých dronů, které mají většinou kameru upevněnou pevně dolů), může více-rotorový dron snímat i prudké svahy, či vertikální plochy a tvořit přesné mapy a geodetické modely budov, pozemních dolů a dalších oblastí.

Inspekce infrastruktury

Více-rotorové drony se využívají při využití zoom kamer pro inspekce větrných elektráren či mostů. Lze je osadit infračervenou kamerou pro inspekce tepelných poškození u izolátorů kabelů vysokého napětí a solárních elektráren, či tepelných úniku u budov. Samozřejmě jsou i další využití jako měření kvality ovzduší, radiace a dalších.

Průzkum a záchranné operace

Využití více-rotorových dronů může zahrnovat hledání a záchranu lidí, sledování vývoje katastrofických situací, jako jsou požáry, záplavy či zemětřesení, a poskytování důležitých informací o situaci na místě pro týmy záchranných služeb.

Multimédia

V médiích a reklamě se více-rotorové drony stali velice oblíbenými zařízeními pro natáčení filmů, televizních pořadů a reklam, díky schopnosti získat jedinečné záběry z různých úhlů a výšek.

2.2 Křídlaté drony

Křídlaté drony, také známé jako fixed-wing (s pevným křídlem) nebo letounové drony, jsou typem bezpilotního letounu, který má pevná křídla a vypadá podobně jako konvenční letadlo. Křídlaté drony mají aerodynamický tvar, který zajišťuje stabilitu a plynulost letu díky vztlakové síle generované průtokem vzduchu kolem křídel.

2.2.1 Konstrukce

Křídlaté drony se skládají z trupu, pevných křídel, ocasních ploch a jednoho nebo více motorů. Trup je hlavní část dronu a obsahuje většinu elektroniky, senzorů, řídicích systémů a baterií. Křídla zajišťují vztlakovou sílu a otáčení podél podélné osy, zatímco ocasní plochy slouží ke stabilizaci a řízení podél příčné a svislé osy.

2.2.2 Pohon

Dron může být poháněn pomocí elektromotorů nebo spalovacích motorů, které pohání vrtule. Elektromotory jsou často výhodnější pro menší drony a nabízejí tichý provoz, snadnou údržbu a menší ekologickou stopu. Spalovací motory jsou obvykle výkonnější a mohou poskytnout delší dobu letu a vyšší nosnost, ale mají i nevýhody, jako jsou vyšší hlučnost, složitější údržba a znečištění životního prostředí.

2.2.3 Letový čas

Křídlaté drony mají obvykle delší dobu letu než více-rotorové drony. Díky aerodynamickému tvaru a účinnému využití vztlakové síly mohou křídlaté drony dosahovat doby letu až několik hodin. Doba letu závisí na velikosti, pohonu a kapacitě baterie či nádrží. Pravidlem je, že čím větší dron, tím delší doba letu.

2.2.4 Výhody

1. Delší doba letu: Křídlaté drony mají delší dobu letu, což umožňuje pokrýt větší oblasti během jednoho letu.

2. Větší rychlost a dosah: Křídlaté drony mohou dosahovat vyšších rychlostí a dálkových vzdáleností, což je dělá ideálními pro průzkumné a monitorovací úkoly.
3. Vyšší nosnost: Křídlaté drony mohou nést těžší náklad než více-rotorové drony, což umožňuje přepravovat více senzorů a vybavení, či větší baterie nebo více paliva.
4. Efektivní energetické využití: Díky aerodynamickému tvaru a vztlakové síle křídel jsou křídlaté drony energeticky podstatně efektivnější než více-rotorové drony.

2.2.5 Nevýhody:

1. Větší nároky na start a přistání: Křídlaté drony vyžadují vzletovou a přistávací dráhu nebo speciální zařízení pro start a přistání, jako jsou katapulty nebo sítě.
2. Složitější řízení: Řízení křídlatých dronů je složitější než řízení více-rotorových dronů, protože vyžaduje znalosti o letové mechanice a aerodynamice.
3. Menší manévrovací schopnosti: Křídlaté drony nemají takovou schopnost pohybovat se ve vzduchu jako více-rotorové drony, což může být nevýhodou při sledování pohyblivých objektů nebo precizním průzkumu a monitoringu. Křídlaté drony nedokážou „zaviset“ v prostoru jako více-rotorové.

2.2.6 Využití pro letecký monitoring:

Křídlaté drony jsou využívány pro letecký monitoring díky svým výhodám v doletu, rychlosti a nosnosti. Jejich použití zahrnuje monitorování životního prostředí, zemědělský průzkum, mapování a geodetické měření, inspekce infrastruktury, průzkum a záchranné operace.

Zemědělství

Křídlaté drony umožňují rychlé a přesné zemědělské průzkumy, což pomáhá zemědělcům optimalizovat hnojení, zavlažování, sklizeň a ochranu proti škůdcům. Na rozdíl od více-rotorových dronů (viz kapitola 2.1) jsou tyto drony používány pro monitorování velkých ploch z větší výšky, kde nás nezajímá konkrétní rostlina nebo strom, nýbrž celkový pohled na pole nebo sad. Toto je důsledkem určité minimální rychlosti letounu pro zachování vztlaku a z toho vyplývající nezbytné výšky letu pro minimalizaci „motion blur“ při snímání.

Mapování a geodetické měření

Díky vyšší rychlosti, doletu a nosnosti mohou křídlaté drony snadno a rychle pokrýt velké oblasti a shromáždit data pro vytvoření map nebo digitálních modelů terénu.

Inspekce infrastruktury

Křídlaté drony se využívají pro inspekce liniové technické infrastruktury (ropovody, plynovody, teplovody). S jejich pomocí lze detekovat poškození, zjišťovat potřebu údržby a minimalizovat rizika pro pracovníky. Využití pro monitoring liniové infrastruktury vychází z jejich letové charakteristiky.

Průzkum a záchranné operace

Křídlaté drony mohou být využity pro hledání a záchranu osob, monitorování katastrofických událostí, jako jsou požáry, záplavy nebo zemětřesení, a poskytování informací o situaci na místě pro záchranné týmy.

2.2.7 Shrnutí křídlatých dronů

Křídlaté drony nabízejí řadu výhod pro letecký monitoring a průzkum, díky svým aerodynamickým vlastnostem, většímu doletu a nosnosti. Jejich schopnost rychle a efektivně pokrýt rozsáhlé oblasti je neocenitelná pro monitorování životního prostředí, zemědělství, inspekce infrastruktury a záchranné operace. I když mají některé nevýhody, jako jsou složitější řízení a nároky na start a přistání, jejich výhody často převažují nad těmito omezeními a činí je ideální volbou pro mnoho úkolů leteckého monitoringu.

2.3 Hybridní drony

Hybridní drony, které kombinují vlastnosti křídlatých dronů a multi-rotorových dronů, nabízejí unikátní schopnosti v oblasti bezpilotních létajících systémů. Tento druh dronu se snaží využít výhod obou konstrukčních typů a minimalizovat jejich nevýhody.

2.3.1 Konstrukce

Konstrukce hybridních dronů zahrnuje pevná křídla pro efektivní let na delší vzdálenosti a multi-rotorový systém pro vertikální vzlet a přistání (VTOL) a případnou možnost viset.

2.3.2 Pohon

Hybridní drony jsou poháněny kombinací elektrických motorů a akumulátorů. Elektrické motory pohánějí multi-rotorový systém pro vertikální vzlet a přistání. Aby mohli tyto drony po vertikálním startu přejít do letu, musí mít buď další motor s vrtulí, které fungují jako u klasického letadla, nebo systém naklápění motorů a vrtulí, které byly použity pro vertikální vzlet. V dostatečné výšce dojde za stálého tahu motorů k jejich naklopení do dopředné, letové pozice a hybridní dron postupně přejde do letového režimu.

2.3.3 Výhody

Dlouhý letový čas: Díky kombinaci pevných křídel a multi-rotorového systému mohou hybridní drony dosáhnout delších letových časů než čistě multi-rotorové drony.

VTOL schopnosti: Vertikální vzlet a přistání umožňuje hybridním dronům operovat v různých prostředích a situacích, kde klasické křídlaté drony nemůžou – kde například nemají přistávací dráhu.

Stabilita a ovladatelnost: Multi-rotorový systém poskytuje větší stabilitu a manévrovací schopnosti než křídlaté drony, což umožňuje hybridním dronům provádět složitější úkoly a operace.

2.3.4 Nevýhody

Větší složitost: Hybridní drony mají složitější konstrukci, což ztěžuje údržbu a opravy. Dále to celkově zvyšuje řídicího systému a ovládání.

Vyšší náklady: Kombinace křídel a multi-rotorového systému zvyšuje náklady na výrobu těchto dronů.

Nemožnost zavěšení určitého užitečného zatížení: Pod více-rotorové drony se velice často zavěšují 3-osé stabilizátory, tzv gimbal, na které se upíná užitečné zařízení (různé druhy převážně kamer atd). Tyto gimbal, však nejsou aerodynamické – u více-rotorových dronů to nevadí, vzhledem k jejich charakteru letu. Pod křídlatý dron standardní gimbal není, právě z důvodu aerodynamického, není vhodné zavěšovat. Tedy jsme u křídlatých dronů omezeni na specifické, aerodynamické

gimbaly, nebo pouze určité druhy zatížení. Tuto nevýhodu sdílí tyto hybridy s křídlatými drony.

2.3.5 Využití pro letecký monitoring

Hybridní drony mají stejná využití, jako křídlaté drony. Hodí se však do trochu jiných provozních situací. Typicky se jedná o situace, kde není možné zajistit dlouhou a bezpečnou přistávací dráhu.

Přírodní katastrofy

Tyto drony mohou být vyslány do oblastí postižených přírodními katastrofami, záplavami, požáry nebo zemětřeseními, aby poskytly důležité, až životně důležité informace o rozsahu škod a potřebných zdrojích. Díky leteckému pohledu poskytují nadhled.

Bezpečnost a záchranné operace

Hybridní drony mohou být využity pro sledování a záchranné mise, kde je potřeba rychlého nasazení, stability a dlouhého letového času.

Geografický průzkum a mapování

Hybridní drony mohou být využity pro geografický průzkum a mapování terénu, to je užitečné pro geology, archeology, stavební inženýry a urbanisty. Díky svým schopnostem mohou tyto drony snadno pokrýt velké plochy a poskytovat přesné údaje o topografii a geologických strukturách. Obzvláště výhodné jsou tyto hybridní drony při geografickém průzkumu velmi složitých struktur.

Komunikace a přenos dat

Hybridní drony mohou fungovat jako dočasné komunikační uzly nebo přenosové stanice pro datové sítě, zejména v oblastech s omezeným pokrytím nebo během krizových situací. Jejich schopnosti jim umožňují rychle a efektivně přenášet signály mezi různými body. Jejich dlouhá výdrž a možnost startu z malého prostoru je dělá ideálním uzlem při krizové situaci.

2.3.6 Shrnutí

Více-rotorové drony se s hybridními nedají moc srovnávat, stále se jedná o dva rozdílné nástroje, pro dva odlišné scénáře provozu. Na druhou stranu, hybridní dron

může plně zastoupit křídlatý dron a ne naopak. To znamená, že je důležité zvážit ideální řešení pro konkrétní situaci.

2.4 Právní a bezpečnostní rizika provozu dronů

Podkapitola byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (9) (10)

Je třeba zajistit, vzdělávat a dbát důraz na to, aby byla práce s drony, a jejich provoz v souladu se zákony a nařízeními týkajícími se ochrany soukromí, bezpečnosti a životního prostředí. Je důležité zvažovat potenciální rizika spojující se s bezpečností a zneužitím těchto technologií, jako jsou například špionáž, terorismus nebo ztráta kontroly nad dronem.

Vzhledem k těmto rizikům je nezbytné, aby byly drony provozovány zodpovědně a v souladu s pravidly a regulacemi stanovenými státy a mezinárodními organizacemi. V EU se civilní provoz dronů řídí PROVÁDEČÍM NAŘÍZENÍM KOMISE (EU) 2019/947 a NAŘÍZENÍM KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) 2019/945.

Tyto nařízení zahrnují letové scénáře, při kterých je či není potřeba řádné školení pilotů, implementace bezpečnostních protokolů a kontrolních mechanismů.

Jako celek představují drony slibnou technologii, která přináší značné výhody v různých oblastech. Při správném řízení rizik a dodržování etických a právních zásad mohou drony přispět k lepšímu pochopení našeho světa a řešení řady globálních problémů.

3 Fyzika letu

Kapitola, včetně podkapitol byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23)

3.1 Základy aerodynamiky

Aerodynamika se zabývá studiem pohybu vzduchu a jeho interakcí s pevnými objekty, jako jsou letadla, automobily, stavební konstrukce a další. Aerodynamické síly a principy hrají klíčovou roli ve vývoji a návrhu letadel, automobilů a dalších pohyblivých objektů, protože mají významný dopad na výkon, stabilitu a účinnost těchto systémů.

V aerodynamice se často pracuje s několika základními veličinami a koncepty, jako jsou tlak, hustota, teplota, rychlost a viskozita vzduchu. Tyto veličiny jsou důležité pro analýzu aerodynamických jevů a pro návrh a optimalizaci systémů, které interagují s proudícím vzduchem.

Jedním z klíčových principů aerodynamiky je Bernoulliho rovnice, která popisuje vztah mezi tlakem, rychlostí a výškou v idealizovaném, nestlačitelném a neviskózním toku. Z Bernoulliho rovnice vyplývá, že s rostoucí rychlostí toku vzduchu, klesá statický tlak. Tento princip je základem pro vysvětlení zdvihové síly, která umožňuje letadlům vzlétnout a udržet se ve vzduchu.

Dalšími základními koncepty v aerodynamice jsou síly působící na objekty v proudu vzduchu, jako jsou odpor, vztlak, tlačná síla a boční síla. Odpor je síla, která působí proti směru pohybu objektu a zpomaluje ho. Vztlak je síla působící kolmo na směr proudu vzduchu. Dynamický vztlak je důsledkem odporu tekutiny při pohybu tělesa. Vztlak společně se zdvihovou silou umožňuje objektům, jako jsou letadla, vzlétnout a udržet se ve vzduchu. Tlačná síla je síla, která působí ve směru pohybu objektu a překonává odpor, zatímco boční síla je síla působící kolmo na směr pohybu objektu a ovlivňuje jeho boční stabilitu a ovladatelnost.

Experimentální metody zahrnují zkoušky ve větrných tunelech a zkoušky ve volném prostředí, které umožňují měřit aerodynamické síly, tlaky a rychlosti kolem objektů při různých podmínkách. Větrné tunely jsou zařízení, ve kterých proudí vzduch

kolem modelu nebo reálného objektu, což umožňuje studovat jeho aerodynamické chování a optimalizovat jeho tvar a konfiguraci. Během zkoušek ve volném prostředí, jako jsou letové zkoušky letadel nebo testy automobilů, se měří aerodynamické síly a parametry přímo na objektu, což umožňuje ověřit a upřesnit výsledky získané z matematických modelů a simulací.

Aerodynamika hraje zásadní roli v mnoha oblastech inženýrství a vědy, jako je letecký a kosmický průmysl, automobilový průmysl, energetika, meteorologie, sport a biologie. V leteckém a kosmickém průmyslu je aerodynamika základem pro návrh a vývoj letadel, raket, dronů a satelitů, které musí být schopny efektivně a bezpečně létat ve vzduchu nebo procházet atmosférou. V automobilovém průmyslu je aerodynamika klíčová pro snižování odporu, zlepšování stability a ovladatelnosti vozidel a snižování spotřeby paliva a emisí. V energetice se aerodynamika používá pro návrh a optimalizaci větrných turbín, které využívají energii pohybujícího se vzduchu pro výrobu elektrické energie. V meteorologii a klimatologii se aerodynamické principy a modely používají pro studium atmosférických jevů, větrů, proudění a turbulencí, což je klíčové jevy pro předpověď počasí a analýzu klimatických změn.

Ve sportu se aerodynamika používá k optimalizaci výkonu sportovců a sportovního vybavení, například při návrhu závodních kol, plaveckých oděvů, lyží nebo kluzáků. V biologii a biomechanice se aerodynamické principy a metody používají k analýze a porozumění pohybu a letu živých organismů, jako jsou ptáci, hmyz nebo netopýři, a k návrhu biomimetických systémů a technologií inspirovaných přírodou.

Mezi aktuální výzkumná témata patří vývoj pokročilých matematických modelů a numerických metod pro simulaci reálných toků s vysokou přesností a nízkou výpočetní náročností, výzkum nových materiálů a konstrukčních principů pro snížení hmotnosti a odporu objektů, studium vzdušného proudu a turbulencí v extrémních podmínkách, jako jsou hypersonické rychlosti nebo nízkotlaké prostředí, a vývoj nových technologií pro řízení a ovládání aerodynamických sil.

3.2 Mechanika letu více-rotorových dronů

Mechanika letu dronů se zabývá studiem principů a jevů, které ovlivňují pohyb dronů ve vzduchu.

Více-rotorové drony se skládají ze dvou nebo více rotujících motorů, které pohání vrtule. Každý motor s vrtule pracuje nezávisle, ale všechny fungují společně pro generování vztlaku, který umožňuje dronu vzlétnout a udržet se ve vzduchu. Pohyb a stabilita dronu jsou kontrolovány pomocí řídicího systému, který zahrnuje řídicí jednotku a senzory. Klíčovým principem mechaniky letu dronů je výběr správných motorů, vrtulí, akumulátorů a dalších komponentů, které umožňují dronu dosáhnout požadovaných výkonových charakteristik, jako jsou rychlost, letová doba, nosnost a stabilita.

Při analýze a návrhu dronů je důležité porozumět základním aerodynamickým silám, které na ně působí, jako jsou vztlak, odpor a momenty. Vztlak je síla generovaná rotujícími vrtulemi, která působí proti gravitaci a umožňuje dronu vzlétnout a udržet se ve vzduchu. Odpor je aerodynamická síla, která působí proti směru pohybu dronu a způsobuje jeho zpomalení. Momenty jsou rotující síly, které ovlivňují náklon, směr a rotaci dronu.

Řídicí jednotka zpracovává informace ze senzorů a vydává příkazy k motorům, které regulují otáčky vrtulí a generují potřebné síly a momenty pro dosažení požadovaného pohybu a polohy dronu. Tento řídicí systém pracuje v reálném čase a kompenzuje vnější rušivé vlivy, jako je vítr, turbulence nebo změny zatížení.

Jedním z klíčových aspektů mechaniky letu dronů je stabilita, schopnost dronu udržet svou polohu a orientaci při různých podmínkách a manévrech. Stabilita dronu může být pasivní nebo aktivní. Pasivní stabilita je zajištěna vhodným návrhem a konfigurací dronu, rozmístěním motorů, těžištěm a aerodynamickým tvarem. Aktivní stabilita je zajištěna řídicím systémem, který monitoruje polohu a orientaci dronu a aktivně reguluje motory a vrtule pro udržení stability.

Mechanika letu dronů také zahrnuje studium jejich výkonových charakteristik, jako je rychlost, letová doba, nosnost, dolet a energetická účinnost. Tyto charakteristiky závisí na řadě faktorů, jako jsou konfigurace dronu, velikost a výkon motorů,

kapacita akumulátorů, hmotnost a aerodynamické vlastnosti. Pro optimalizaci výkonu dronů je důležité najít rovnováhu mezi těmito faktory a zohlednit omezení a požadavky dané aplikace.

3.3 Stabilizace a řízení dronů

Stabilizace zajišťuje, že dron zůstává rovnovážný a v pohybu podle uživatelova záměru, zatímco řízení zahrnuje navigaci dronu podél určené trajektorie. Pro dosažení stabilizace a řízení dronů jsou používány různé principy, technologie a algoritmy, které jsou následně integrovány do systému řízení letu.

Aerodynamické síly a momenty generované rotory dronu jsou klíčové pro udržení vztlaku a stability dronu. Rychlost otáčení rotorů se reguluje pomocí elektronického regulátoru otáček (ESC), který je řízen řídicí jednotkou (FC – flight controller).

FC zpracovává data ze senzorů – gyroskopů, akcelerometrů, magnetometrů, barometrů a GPS, aby získala informace o náklonu, úhlovém zrychlení, rychlosti, výšce, poloze a orientaci vzhledem ke světovým stranám. FC také přijímá signály z dálkového ovladače. Řídicí jednotka také řídí dron při autonomních misích.

Na základě těchto informací používá FC různé algoritmy řízení, například proporcionální-integrální-derivační (PID) regulátory, pro výpočet potřebných změn v rychlosti otáčení rotorů.

Řízení dronu se provádí pouze za pomoci změn otáček motorů. Tyto změny otáček zapříčiňují rozdíly vztlaků na konci ramen a tím změny náklonu dronu. Standardní letové drony se ovládají v několika různých ovládacích režimech

Acrobatický mód

Akrobatický režim využívá ke stabilizaci pouze gyroskopy, bez ovládacího příkazu z dálkového vysílače dron zůstává v náklonu, ve kterém skončil v momentě vycentrování ovládacích páček.

Attitude mode (Stabilize)

Dron využívá ke stabilizaci gyroskop a akcelerometr. Díky tomu po uvolnění ovládacích kniplů řídicí jednotka vyrovná dron do vodorovné pozice. Dron tedy není

vůči zemi v úhlu a tím netvoří tah do strany a je pouze unášen větrem a proudy vzduchu.

Gyroskop poskytuje informace o úhlové rychlosti, to znamená, jak rychle se dron otáčí kolem jednotlivých os (osy X, Y a Z, resp. pitch, roll a yaw). Tyto informace umožňují řídicí jednotce monitorovat a kompenzovat nechtěné rotace dronu. Gyroskop sám o sobě nemůže poskytnout informace o absolutní orientaci dronu ve vztahu vůči zemi.

Akcelerometr měří lineární zrychlení dronu ve třech osách (X, Y a Z). To zahrnuje nejen vnější síly působící na dron, ale také zrychlení v důsledku gravitace. Vodorovná poloha dronu lze určit měřením zrychlení směrem vzhůru způsobeného gravitací, to akcelerometr měří jako konstantní zrychlení směrem vzhůru (9,81m/s). Pokud by byl dron ve volném pádu, akcelerometr by měřil zrychlení 0 m/s.

Altitude hold

Altitude hold režim přidává kletovým výpočtům ještě data z barometru pro určování výšky. Řídicí jednotka je tedy schopna automaticky udržovat absolutní výšku vůči povrchu. Akcelerometr by teoreticky mohl měřením zrychlení ve vertikálním směru poskytovat informace o změnách výšky, ale v praxi je toto ovlivněno vibracemi, šumem a dalšími rušivými faktory. Tyto nežádoucí účinky vedou k chybným odhadům výšky a následně i k neúspěchu v udržení konstantní výšky.

Akcelerometr neměří absolutní výšku, ale pouze zrychlení. Aby řídicí jednotka získala informace o výšce z akcelerometru, musela by integrovat zrychlení dvakrát. První integrace by poskytla rychlost a druhá integrace by poskytla výšku. Při každé integraci se akumulují chyby a šum, což vede k nejistotě a nepřesnosti v odhadu výšky v průběhu času. Tento jev se nazývá "drift".

Barometr měří atmosférický tlak, který se mění s výškou. Pomocí barometru může řídicí jednotka získat přímé měření absolutní výšky dronu, což je mnohem přesnější a spolehlivější než odvozené měření z akcelerometru. Barometr navíc není ovlivněn vibracemi a šumem stejným způsobem jako akcelerometr, což zlepšuje jeho schopnost udržovat konstantní výšku.

GPS módy

Ve většině automatických letových režimů se využívá GPS k určování polohy. K určování přesné polohy se samozřejmě mohou používat i další senzory, jako LiDAR nebo optické rozeznávání prostředí. Standardem je však družicové navádění.

GPS funguje na principu triangulace mezi pozemním přijímačem a družicemi. Systém se skládá ze sítě družic, které obíhají Zemi ve velmi vysokých oběžných drahách (přibližně 20 200 km). Tyto družice jsou rozmístěny tak, aby většinu času byly viditelné alespoň čtyři družice z jakéhokoli bodu na Zemi. Pokud dron umí „poslouchat“ i družice jiných systémů, např. GLONASS (ruský navigační systém), Galileo (evropský navigační systém) a BeiDou (čínský navigační systém), není nestandardní a mám to běžně ozkoušené, aby dron určoval polohu pomocí 15-18 družic.

Každá družice vysílá signál obsahující informace o své aktuální poloze a čase. Signál je vyslán na nízké frekvenci, to umožňuje jeho šíření skrze atmosféru a dosah až na zemský povrch. GPS přijímač na zemi zachytává tyto signály od několika družic současně.

Pro určení polohy potřebuje GPS přijímač signály alespoň od čtyř družic. Přijímač vypočítá časový rozdíl mezi přijetím signálu a časem, kdy byl signál vyslán družicí. Tento časový rozdíl se následně přepočítá na vzdálenost od každé družice. Čím více družic je použito, tím přesnější je určení polohy.

4 Způsoby leteckého měření

Kapitola, včetně podkapitol byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30)

4.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie se zabývá měřením a interpretací fotografií a obrazových dat za účelem vytváření 2D nebo 3D modelů objektů a scén. Fotogrammetrií je možné tvořit mapy, nebo i 3D modely objektů. Tato metoda je často používána v oblastech jako geodézie, kartografie, architektura, archeologie, geologie a ochrana životního prostředí.

Fotogrammetrie využívá principů geometrie, optiky a stereoskopie pro analýzu a získání informací o geometrických vlastnostech objektů a scén na základě fotografických snímků. Fotogrammetrický proces zahrnuje několik kroků, mezi které patří plánování, sběr dat, zpracování obrazových dat a analýza výsledků.

Plánování zahrnuje výběr vhodného zařízení pro pořizování snímků, stanovení vhodných parametrů pro snímání (rozlišení, pohledový úhel, přeletová výška, snímané spektrum) a plánování trajektorie letu pro získání potřebného překryvu snímků.

Sběr dat probíhá pomocí fotogrammetrického zařízení, které pořizuje fotografie z různých úhlů a pozic. Důležitým parametrem je překryv snímků, který umožňuje vytvoření stereoskopických párů snímků pro další zpracování. Překryv je obvykle 60-80 %, což zajišťuje dostatečné množství dat pro získání přesných měření.

Zpracování obrazových dat zahrnuje kalibraci kamery (aplikování např. korekčních LUT souborů, dat o osvětlení a reflektivitě atd), orientaci snímků, určení prostorových vztahů mezi snímky a vytvoření 3D modelu objektů a scén. Kalibrace kamery je nezbytná pro korekci optických zkreslení, která mohou ovlivnit přesnost měření. Orientace snímků spočívá v určení vnějších a vnitřních orientačních parametrů, které popisují polohu a natočení kamery v prostoru a geometrii snímače. Prostorové vztahy mezi snímky jsou určeny pomocí společných bodů, které se nacházejí na více snímcích.

Výsledný model může být reprezentován jako mračno bodů (cloud mesh), orthomosaika nebo např. digitální povrchový model (DSM). Tyto modely poskytují informace o geometrii, texturách a barvách objektů a scén.

Fotogrammetrie může být prováděna jako terestrická (ze země), letecká (z dronů, letadel nebo helikoptér) nebo satelitní, v závislosti na požadavcích na přesnost, rozlišení a pokrytí. V posledních letech se stále více využívá dronová fotogrammetrie, která umožňuje rychlé, flexibilní a ekonomické získání vysoko kvalitních fotografií pro fotogrammetrické zpracování.

Fotogrammetrie má široké spektrum aplikací, jako je tvorba topografických map, analýza vegetace, monitoring stavby, inspekce infrastruktury, analýza krajiny nebo 3D modelování. Výsledky fotogrammetrie mohou být dále kombinovány s dalšími geoinformačními daty a technologiemi, jako je dálkový průzkum, GIS (Geografické informační systémy) nebo LiDAR (Light Detection and Ranging), což rozšiřuje možnosti analýzy, vizualizace a integrace s dalšími datovými zdroji.

4.2 LiDAR

LiDAR je zkratka pro Light Detection and Ranging, což je technologie využívající laserové paprsky pro měření vzdálenosti a získávání informací o povrchu Země či jiných objektů. Tato metoda se široce používá v oblastech jako geodézie, kartografie, geologie, doprava a další. LiDAR zahrnuje vysílání laserových pulzů, detekci odražených signálů a následné zpracování dat.

LiDAR pracuje na principu časového zpoždění mezi odesláním laserového pulzu a jeho návratem zpět k detektoru po odrazu od objektu. Z tohoto časového zpoždění je možné vypočítat vzdálenost mezi senzorem a objektem podle rychlosti světla ve vzduchu. Laserové paprsky se obvykle vysílají ve velkém množství a v rychlém sledu, což umožňuje získání podrobných informací o povrchu a objektech.

LiDAR systémy mohou být klasifikovány jako terestriální (pozemní), letecké (nainstalované na letadlech nebo dronách) či satelitní (umístěné na satelitech). Terestriální LiDAR se často používá pro monitorování staveb, archeologických nalezišť nebo měření deformací zemského povrchu. Letecký LiDAR je vhodný pro mapování velkých území, zatímco satelitní LiDAR umožňuje celosvětové pokrytí.

LiDAR systémy se skládají z několika klíčových komponent: laserového zdroje, skenovacího mechanismu, optického přijímače a detektoru, GPS přijímače a inerciální měřicí jednotky (IMU). Optický přijímač a detektor zachycují odražené paprsky a převádějí je na elektrické signály. GPS přijímač poskytuje informace o poloze systému a IMU zaznamenává údaje o orientaci v prostoru.

Při fungování LiDARu je důležitá přesnost měření vzdálenosti. Pro dosažení vysoké přesnosti je důležitá krátká doba trvání laserového pulzu, který je typicky v řádu nanosekund.

Dalším důležitým aspektem je rozlišovací schopnost LiDARu, to znamená schopnost rozpoznat různé objekty a jejich detaily. To je řešeno vysokou hustotou pulzů, které jsou vysílány a zachyceny. Vyšší hustota pulzů umožňuje lepší rozlišovací schopnost a detailnější mapování objektů.

Využití LiDARu je rozmanité. V geodézii a kartografii se používá pro vytváření digitálního terénního modelu, tvorbu vysoce přesných map, monitorování změn terénu a identifikaci geologických struktur. V dopravě se využívá pro sběr dat o silniční infrastruktuře, tvorbu digitálních modelů měst, navigaci autonomních vozidel a zajištění bezpečnosti na silnicích. LiDAR má také využití v lesnictví, archeologii, ochraně životního prostředí a dalších oblastech.

4.3 Multispektrální snímání

Multispektrální snímání je technologie, která umožňuje získávat obrazové informace v různých částech elektromagnetického spektra, zahrnující viditelné i neviditelné vlnové délky. Multispektrální snímání má široké využití v oblastech jako je zemědělství, geologie, ekologie, environmentální monitorování, vojenství či medicína.

Multispektrální snímání zahrnuje měření intenzity světla, které je odraženo, emitováno nebo absorbováno různými objekty v mnoha spektrálních pásmech. Toho se obvykle dosahuje pomocí multispektrálních senzorů, které jsou schopny zaznamenávat intenzitu světla ve více vlnových délkách současně. Tyto senzory jsou umístěny na různých platformách, jako jsou družice, letadla nebo pozemní zařízení.

Jedním z klíčových principů multispektrálního snímání je rozlišení. Rozlišení je schopnost senzoru rozpoznat a zaznamenat detaily scény, a to jak prostorově, tak spektrálně. Prostorové rozlišení se týká velikosti oblasti, kterou senzor zaznamenává v jednom pixelu, zatímco spektrální rozlišení se týká počtu a šířky spektrálních pásem, ve kterých senzor měří.

V multispektrálním snímání se často využívají techniky jako radiometrická kalibrace, atmosférická korekce a georeferencování. Radiometrická kalibrace slouží k přesnému měření intenzity světla ve spektrálních pásmech, atmosférická korekce odstraňuje nežádoucí efekty způsobené interakcí světla s atmosférou, a georeferencování umožňuje přiřadit každému pixelu geografickou polohu.

Mezi důležité aspekty multispektrálního snímání patří také analýza a interpretace získaných dat. Multispektrální snímky lze dále analyzovat a interpretovat pomocí různých metod a algoritmů. Jedním z nejčastěji používaných přístupů je spektrální analýza, která se zaměřuje na studium spektrálních charakteristik objektů ve snímcích. Tímto způsobem lze identifikovat materiály nebo látky na základě jejich specifických spektrálních signatur.

Využití multispektrálního snímání je velmi rozmanité. V zemědělství se využívá k monitorování stavu plodin, identifikaci chorob, optimalizaci hnojení a zavlažování nebo detekci škůdců. V geologii se multispektrální snímání používá k identifikaci minerálů, geologických struktur a průzkumu nerostných surovin. V oblasti ekologie se snímání využívá ke sledování stavu lesů, biodiverzity, změn vegetace či monitorování životního prostředí a znečištění.

Ve vojenství se multispektrální snímání používá k průzkumu terénu, identifikaci cílů, detekci maskování nebo monitorování aktivit nepřátelských sil. V medicíně se multispektrální snímání využívá pro diagnostiku a detekci patologických změn v tkáních, jako je například detekce rakoviny nebo sledování cévních anomálií.

Multispektrální snímání je důležitou technologií umožňující získávat bohaté a užitečné informace o objektech a jevech ve světě kolem nás.

5 Praktická část

5.1 Metodologie praktického měření

Podkapitola byla zpracována s využitím následujícího zdroje: (31)

V praktické části jsem se zabýval sběrem dat za pomoci více-rotorového dronu, konkrétně quadcoptery nad ovocnými sady ve Výzkumném a šlechtitelském ústavu ovocnářském v Holovousech. Využíval jsem multispektrální kameru RedEdge MX od výrobce MicaSense.

Kamera má následující specifikaci snímání:

Tabulka 1 - Specifikace sensorů RedEdge MX

Spektrum	Střed spektra	Šířka pásma
Modrá	475 nm	32 nm
Zelená	560 nm	27 nm
Červená	668 nm	16 nm
Red edge	717 nm	12 nm
Near infrared	842 nm	57 nm

Rozlišení: 1280x960 pixelů

Poměr stran: 4:3

Ohnisková vzdálenost: 5,4mm

Zorné pole: 47,2 stupňů horizontálně, 35,4 stupňů vertikálně

Kamerá má hmotnost 232 gramů. Součástí kamery je i tzv. DLS 2 sensor, který se montuje na nejvyšší místo quadcoptery a tento snímač světla shora (DLS „Downwelling Light Sensor“) pomáhá zlepšit kalibraci odrazivosti v situacích, kdy se světelné podmínky mění během letu. Během mise DLS 2 měří okolní světlo a úhel slunce a tuto informaci zaznamenává v metadatech TIFF obrázků zachycených kamerou. Tato informace může být použita specializovanými nástroji pro zpracování (jako například Pix4Dmapper) ke korekci globálních změn osvětlení během letu, jako jsou ty, které mohou nastat kvůli zatažené obloze zakrývající slunce. Dále DLS 2 poskytuje GPS data pro RedEdge-MX.

Kamera má jednu nevýhodu, a to je dlouhý buffer při ukládání obrázku, mezi zachycením a uložením na kartu uplyne cca 1 sekunda. To znamená, že kamera nemůže snímat v intervalech kratších, než je právě jedna sekunda.

5.2 Výběr a stavba dronu

Podkapitola byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (32) (19)

Při stavbě dronu na tento multispektrální projekt jsem používal komponenty, které jsem již měl z minulých projektů. Výsledkem je quadcopter s následujícími specifikacemi:

Tabulka 2 - Specifikace quadcoptery

Velikost:	41 cm diagonálně mezi motory
Konfigurace rámu:	Quadcopter X
Doba letu:	12 minut
Maximální vzletová hmotnost:	1,6kg
Drak:	Uhlíkový kompozit a plast
Motory:	T-Motor Antigravity 2214-11 920KV (rok 2014)
Vrtule:	Graupner 10x5" (25x12,5 cm) (rok 2014)
ESC:	Turnigy Multistar 20A Slim (rok 2014)
Baterie:	GensAce Li-Pol 11,1V 5400mAh 59,94 Wh
Řídící jednotka (FC):	Ardupilot Pixhawk
RC ovládání:	FrSky Taranis + FrSky X4R 2,4GHz
Telemetrie	RFDesign 433MHz zasíláno do notebooku

Kdybych měl finanční prostředky na nákup nových komponentů a stavbu quadcoptery tzv. „from scratch“, věřím, že bych dosáhl lepšího letového času, předpokládám, že bych letový čas mohl nejméně zdvojnásobit. Z jakého důvodu viz níže:

Vzhledem k tomu, že celý model váží přibližně 1,6kg, jeden motor musí generovat tah nejméně 400 gramů, aby quadcopter visel ve vzduchu. Při konstrukci dronu od začátku se drony staví ideálně tak, aby dron visel při 45 %-50 % výkonu motoru, čím nižší výkon motoru je, tím větší má účinnost. Také pomaleji otáčí vrtule a tím dosahuje lepší účinnosti i na vrtulích. Použité motory však dosahují tahu 400 gramů až okolo 65 % výkonu. Při zachování 20% kapacity baterie mi vychází dle vzorce (1):

$$P = \frac{E}{t} \quad (1)$$

Výkon P odpovídá průměrnému elektrickému výkonu motorů. E je využitá energie z baterie odpovídající $59,94 \cdot 0,8 = 47,92$ Wh a t je 13 minut tedy 0,216 hodiny. Průměrný výkon motorů je tedy 222 W. Na jeden motor nám vychází průměrný výkon 55,5 W. Což přibližně odpovídá účinnosti 7,2 g/W.

Rám dronu je postaven z uhlíkových polotovarů – jako ramena draku jsou použity uhlíkové trubky o průměru 25 mm a tloušťce stěny 1 mm. Po dokončení stavby mohu konstatovat, že nosná ramena jsou zbytečně předimenzována a stačily by podstatně menší trubky. Držáky motorů, podvozku, a středový drak je vyroben z uhlíkové desky tloušťky 2 mm. Opět mohu konstatovat, že by pro takto lehký a malý dron stačila tloušťka klidně 1-1,5 mm. Desky jsou ofrézované na CNC stroji do požadovaného tvaru. Uvnitř uhlíkových trubek je umístěn 20 A regulátor, motory mají mít maximální spotřebu 9,2A, tedy regulátory jsou zbytečně předimenzovány a stačily by menší a lehčí. Držáky motorů jsou k trubkám a trubky ke středovým deskám staženy pomocí plastových dílů vytištěných na 3D tiskárně. Desky jsou společně stáhnuty pomocí M3 šroubků.

Řídící jednotka, rozvodná deska a senzory proudu a napětí jsou k draku přišroubované, či stažené elektrikařskou stahovací páskou. GPS moduly jsou přidělány na plastovém díle, který je vytištěný na 3D tiskárně.

Celý dron je postaven na platformě ArduPilot, který je nahraný v řídicí jednotce Pixhawk.

ArduPilot je komplexní a široce používaný open-source autopilotní systém, který umožňuje autonomní řízení bezpilotních létajících systémů, a i dalších robotických vozidel. Tento univerzální řídicí systém byl původně vyvinut komunitou nadšenců a výzkumníků v oblasti dronů, kteří spolupracují na platformě DIY Drones, a postupně se stal jedním z nejpoužívanějších autopilotních systémů na trhu. ArduPilot zahrnuje celou řadu modulárních hardwarových a softwarových komponent, které lze snadno integrovat do různých konfigurací a platforem. Srdcem tohoto systému je autopilotní jednotka, založená na mikrokontroléru, která zpracovává signály ze

senzorů, základem jsou gyroskop, akcelerometr, magnetometr, barometr a GPS. Díky těmto sensorům ArduPilot získává informace o poloze, rychlosti, nadmořské výšce a orientaci dronu, to umožňuje systému přesně řídit jeho pohyb a stabilizovat ho. Díky své modularitě a otevřenému zdrojovému kódu je ArduPilot velmi flexibilní a díky tomu nebyl problém integrovat do řídicího softwaru kameru RedEdge MX. ArduPilot navíc nabízí možnosti autonomního řízení pro quadcoptery, včetně plánování a provádění waypoint misí. Díky tomu jsem mohl provádět multispektrální měření opakovaně, a získávat tak data měnící se v časovém horizontu celého růstového období – od kvetení, po sklizeň a opadávání listů. Waypoint mise umožňují dronu navigovat podél předem určené trasy složené z několika bodů (waypoints) na základě GPS souřadnic. Do mise jsem navíc zakomponoval i příkazy, pro dálkovou spoušť kamery RedEdgeMX, tak aby quadcopter nasnímal celý sad vždy stejně a opakovaně. Řídící jednotka vyšle signál PWM při přeletění waypointu „vyfot“ a kamera provede snímání. Po dalších x metrech pošle řídicí jednotka další signál a kamera opět provede snímání. Tímto způsobem získáme vždy stejná data v průběhu času.

Vzhledem k tomu, že jsem chtěl získat co nejvyšší přesnost určování polohy a držení v prostoru, instaloval jsem na quadcopter dva GPS moduly, které vzájemně průměrovali data a vyhodnocovali přesnější pozici. Z praktických testů se přesnost zlepšila. Stále však nedosahovala přesnosti tzv. RTK GPS navigace, kterou by šlo použít na další verzi dronu. Při použití RTK GPS bych navíc ušetřil hmotnost jednoho GPS modulu.

RTK GPS (Real-Time Kinematic Global Positioning System) je nadstavba klasické GPS poskytující vysokou přesnost polohování, často na úrovni centimetrů. Tato přesnost je dosažena použitím kombinace mobilní GPS antény (na quadcopteru) a pevné referenční stanice (base station – u notebooku s telemetrií).

Referenční stanice zná svou přesnou polohu a sleduje stejné družice jako pohyblivá anténa. V reálném čase porovnává přijatá data s očekávanými hodnotami a vypočítává korekce pro způsobené chyby. Tyto korekce jsou poté odesílány pohyblivé anténě.

Mobilní anténa aplikuje korekce na svá vlastní měření polohy, což výrazně zvyšuje přesnost určení polohy v reálném čase.

5.3 Plánování a provedení měření

Podkapitola byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (33) (34) (35) (36) (31)

Vzhledem k dlouhému bufferu mezi snímky viz kapitola 5.1 si určuji, že kamera bude snímat jednou za 1,1 sekundy pro získání rezervy z důvodu chyby určování rychlosti quadcoptéry pomocí GPS.

Dalším důležitým základním parametrem, ze kterého jsem musel vycházet byl fakt, že fotogrammetrické nástroje doporučují, pro kvalitní zpracování dat do mapy bez artefaktů, překryvy mezi jednotlivými snímky nejméně 75 % horizontálně a vertikálně. Pro ploché zemědělské oblasti se doporučuje alespoň 80 % překrytí horizontálně i vertikálně. Pro lesy a oblasti s hustou vegetací se doporučuje zvýšit překryt alespoň na 85 % jak horizontálně, tak vertikálně a létat ve vyšší výšce, aby bylo snazší detekovat podobnosti mezi překrývajícími se snímky.

Dále jsem byl limitován praktickou letovou výdrží dronu, která mi vyšla na 12 minut při zachování 20% kapacity baterie stačící pro přistání. O tom, proč, viz kapitola 5.2.

Velikost snímaného sadu je 140 x 40 metrů.

Doba snímání musí být co nejkratší, aby se nezměnili spektrální efekty – pohybem slunce po obloze. Zvolil jsem tedy maximální délku snímání 2x letový čas, a vždy snímal +- 1 hodinu okolo poledne. Při snímání jsem v polovině s dronem přistál a vyměnil baterie. Vycházím tedy z těchto základních parametrů a hledám nejnižší výšku vhodnou pro snímání. S ohledem na výše zmíněné parametry.

Tabulka 3 - Známé konstanty pro výpočet

FOV kamery horizontálně	α	47,2	°
FOV kamery vertikálně	β	35,4	°
Rozlišení horizontální	p_{x_x}	1280	px
Rozlišení vertikální	p_{x_y}	960	px
Velikost sadu a	a	150	m
Velikost sadu b	b	50	m

Horizontální překryv		85	%
Vertikální překryv		85	%
Buffer kamery	c	1,1	s
Doba letu	t	720	s

Ve výpočtu kalkuluji (hodnoty při $h = 22$ m):

Tabulka 4 - Kalkulované hodnoty

Snímaná horizontální vzdálenost	x	19,223	m
Snímaná vertikální vzdálenost	y	14,042	m
Horizontální vzdálenost mezi snímky	k	2,884	m
Vertikální vzdálenost mezi snímky	l	2,106	m
Rychlost letu	v	2,621	m/s
Kalkulovaná doba letu	t_{real}	686	s
Rozlišení	pcm	0,67	px/cm

Dle vzorců (2) (3) (4) (5) (6) (7):

$$x = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot 2h \quad (2)$$

$$y = \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot 2h \quad (3)$$

$$k = x \cdot (1 - 0,85) \quad (4)$$

$$l = y \cdot (1 - 0,85) \quad (5)$$

$$v = k/c \quad (6)$$

$$t_{real} = \frac{\operatorname{ceil}\left(\frac{b}{2l}\right) \cdot a}{v} \quad (7)$$

Funkce ceil (zkratka pro "ceiling") je matematická funkce, která zaokrouhluje číslo nahoru na nejbližší celé číslo. Tato funkce je často používána v počítačovém programování a diskrétní matematice. Pro zadané reálné číslo x , funkce $\operatorname{ceil}(x)$ vrátí nejmenší celé číslo, které je větší nebo rovno x .

Matematicky lze funkci ceil zapsat jako (8):

$$\text{ceil}(x) = \min \{ n \in \mathbb{Z} \mid n \geq x \} \quad (8)$$

Funkci zaokrouhlení nahoru využívám z toho důvodu, že se snažím najít přesný počet přeletů nad sadem. Sad si myšlenkově a početně rozdělím na dva díly, každý o velikosti 150 x 25 m. Snímkování probíhá v takzvaném gridu, quadcopter letí v přímé linii po delší straně sadu (150 metrů) a snímkuje každých 2,884 metrů (vzdálenost k). Poté se přesune o 2,1 metrů po kratší straně a letí zpět a opět snímkuje každých $\approx 2,9$ metrů. Po přiletu zpět se opět posune ve směru 2,1 metrů kratší strany a takto pokračuje, dokud nenasnímá celou polovinu sadu. V našem případě letí tam a zpět 11,9krát. Quadcopter ale nemůže letět jednu trasu 0,9krát. Tedy zaokrouhluji nahoru. Sice nasnímám plochu větší než nezbytně nutnou, ale v případě fotogrammetrie platí, že čím více dat, tím lepší.

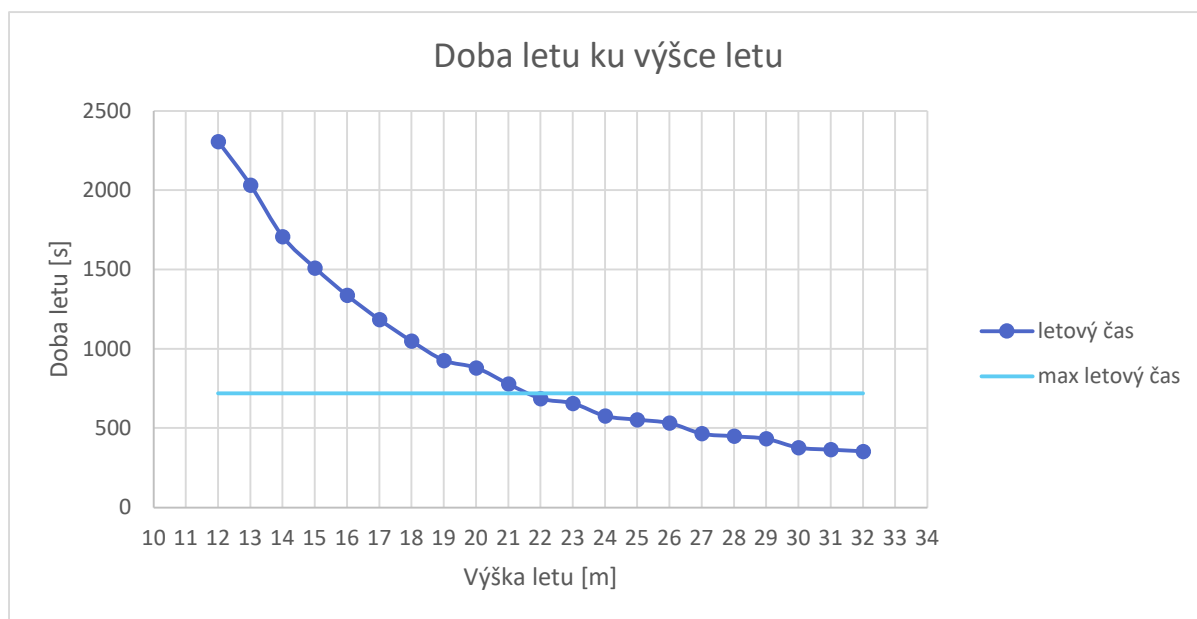
Při dosazení do tabulky dle výsledného vzorce (9):

$$t_{real} = \text{ceil} \left(\frac{b}{0,6 \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \cdot h} \right) \cdot \frac{a \cdot c}{0,3 \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cdot h} \quad (9)$$

Tabulka 5 - Shrnutí doby záznamu a rozlišení dle výšky letu

h [m]	t_{real} [s]	px/cm
12	2308	1,22
13	2034	1,13
14	1709	1,05
15	1511	0,98
16	1338	0,92
17	1185	0,86
18	1049	0,81
19	928	0,77
20	881	0,73
21	779	0,70
22	687	0,67
23	657	0,64
24	577	0,61
25	554	0,59
26	533	0,56

27	466	0,54
28	450	0,52
29	434	0,51
30	378	0,49
31	365	0,47
32	354	0,46



Obrázek 1 - Graf doby letu ku výšce letu

Nám vyjde, že ideální výška letu je mezi 21 a 22 metry, tedy zvolím výšku letu 22 metrů. Tímto dosáhnu maximálního využití dronu při zachování bezpečné časové rezervy pro přistání a zároveň dosáhnu bezpečného časového úseku mezi jednotlivými snímky pro stabilní měření. Dle vzorce (10):

$$pcm = \frac{px_x}{x \cdot 100} \quad (10)$$

Zjistím, že výsledné rozlišení bude přibližně 0,67 px/cm tedy na 1 pixel obrazu bude připadat 1,5 x 1,5 cm respektive 2,25 cm² plochy. Toto rozlišení je více než dostatečné pro identifikaci jednotlivých listů.

Nastavil jsem tedy dvě waypoint mise.

Mise začíná v jihozápadním rohu sadu. Dron přeletí do výšky 22 metrů, nastaví rychlost letu 2,62m/s a vydá se 150 metrů na sever (po delší hranici sadu). Každých 2,88m odesílá povel kameře k provedení měření. Po dosažení severního západního rohu sadu přeletí směrem na východ o 2,1 metrů a vrací se zpět na jih. Pokračuje ve snímání každých 2,88 metrů ve směru letu. Po 12 přeletu sadu dron zahájí režim RTH (Return to Home) a vrátí se na místo startu a přistane. Druhá mise je logicky stejná, posunuta o 25 metrů na východ.

Po samotném vyladění procesů letu bylo měření prováděno velice jednoduše:

- 1) Nabití dvou setů baterií
- 2) Příjezd do výzkumného a šlechtitelského ústavu Holovousy okolo polední hodiny
- 3) Zapnutí vysílačky, zapnutí dronu, nahrání první části mise přes řídicí software Mission Planner.
- 4) Vyfocení kalibrační desky pro získání kalibračních dat.
- 5) Manuální start a uvedení dronu do autonomní mise.
- 6) Kontrola letu přes datovou linku v MissionPlanneru, čekání na skončení mise.
- 7) Po přistání výměna baterií, nahrání druhé mise.
- 8) Manuální start a uvedení dronu do autonomní mise.
- 9) Automatické přistání, sbalení stroje, odjezd k počítači domů.
- 10) Zálaha dat a zpracovávání do GeoTIFF v Pix4D

5.4 Zpracování a analýza dat

Podkapitola byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (36) (37) (38) (39) (35) (33)

Kamera nasnímá data v TIFF formátu a uloží jeden soubor pro každé spektrum. Ze surových dat lze jen stěží vyčíst nějaká data. Pro spojení těchto snímků jsem využívat nástroj Pix4D Mapper.

Pix4D Mapper je softwarový nástroj pro zpracování leteckých snímků a vytváření 3D modelů a map. Jeho hlavním účelem je konvertovat snímky pořízené drony nebo i jinými leteckými platformami (pilotované letadlo) do georeferencovaných ortofoto

map, digitálních modelů povrchu (DSM), digitálních modelů terénu (DTM) a 3D modelů.

Základem Pix4D Mapperu je technologie fotogrammetrie, která využívá překryvu a vizuálních informací ze snímků pro rekonstrukci scény. Fotogrammetrie je obor, který se zabývá měřením a interpretací fotografií, a jejich použitím pro získání informací o tvaru a poloze objektů a scén a ploch.

Pix4D Mapper zpracovává snímky ve třech hlavních krocích:

1. Inicializace a předzpracování: V této fázi jsou načteny a georeferencovány snímky, kalibrována kamera a odstraněny geometrické a radiometrické zkreslení. Pix4D zpracovává data jednak ze sensoru DLS2 pro kalibraci vůči slunečnímu osvětlení, tak informace z kalibrační desky. Kalibrační deska je dodávána výrobcem kamery a obsahuje šedý čtverec s přesně známou hodnotou odrazivosti v jednotlivých spektrech. Tato deska je před každým snímáním vyfocena a tato referenční fotka nahrána do softwaru. Tuto odrazivost Pix4D Mapper také detekuje a spáruje klíčové body (tie points) na překrývajících se snímcích, které slouží jako základ pro následné výpočty.

V tomto kroku právě Pix4D načítá informace o natočení, snímků, o jejich pozici, a o ambientním osvětlení.

2. Výpočet a optimalizace: V druhém kroku Pix4D Mapper vytvoří husté mračno bodů (dense point cloud) na základě párování klíčových bodů a jejich prostorových vztahů. Proces zahrnuje triangulaci, optimalizaci a interpolaci bodů, což vede k vytvoření podrobného a přesného modelu scény. Současně je vytvořen i digitální model povrchu (DSM) a digitální model terénu (DTM).

3. Texturování a export: V posledním kroku je na mračno bodů aplikována textura z původních snímků, čímž vznikne realistická, geo-referencovaná mapa. Výslednou mapu jsem potom exportoval ve formátu GeoTIFF pro další zpracování kolegy z katedry biologie.

GeoTIFF však Pix4D vygeneruje stále monochromaticky, v jednotlivých spektrech – red, green, blue, red edge a NIR. Pro spojení do RGB mapy, která se vizuálně blíží klasické polychromatické fotce, či pro spojení do různých indexů jako je např. NDVI, jsem používal zdarma dostupný geografický informační software QGIS. Zde jsem

pomocí tzv. Raster Calculatoru generovat RGB mapu, či mapu, která ve falešných barvách zobrazuje NDVI index.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) je index, který se používá k měření hustoty a zdraví vegetace na základě odrazivosti světla ve viditelném a blízkém infračerveném spektru.

Matematický výraz pro NDVI je:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (11)$$

Kde *NIR* je hodnota odrazivosti v blízkém infračerveném spektru.

Hodnota *NDVI* se pohybuje v rozmezí od -1 do +1. Negativní hodnoty *NDVI* odpovídají vodě. Hodnoty blízké nule (-0,1 až 0,1) obvykle odpovídají holým oblastem skal, písku nebo sněhu. Nízké, pozitivní hodnoty zastupují keře a travnaté porosty (přibližně 0,2 až 0,4), zatímco vysoké hodnoty označují teplomilné a tropické deštné lesy (hodnoty se blíží k 1).

5.5 Poučení pro příští projekt

Podkapitola byla zpracována s využitím následujících zdrojů: (40) (32) (41)

Velkým poučením ze stavby quadcoptery pro toto měření pro mě bylo, že při využívání „šuplíkových“ komponent člověk nemůže dosáhnout ideálních výsledků. Masivním zlepšením při sběru dat by byla lepší přesnost polohování dronu a výrazně delší letový čas – alespoň dvojnásobný. K tomu by bylo ale nezbytné pořídit komponenty vybrané přesně na míru pro ten konkrétní projekt. Kdybych stavěl monitorovací dron, na kameru RedEdgeMX od nuly, postupoval bych následovně a vše orientoval okolo hmotnosti celého dronu:

Vím, že užitečné zatížení, které chci vozit má 232 gramů. Zvolím si výrobce elektromotorů, například T-Motor a procházím datasheety jednotlivých motorů. Ze zkušenosti vím, že minulý dron potřeboval okolo 400 gramů tahu na motor. Hledám tedy motor, který by měl orientačně tuto, či vyšší hodnotu při zachování co možná nejvyšší hodnoty g/W. Našel jsem motor Antigravity MN5006 KV300. Dle tabulkových hodnot má mít, při použití vrtule T-MOTOR P17*5,8“ CF tah 501 gramů, při 40 % výkonu a účinnost 13,02 g/W (téměř dvojnásobnou, oproti aktuální

konfiguraci). Zároveň má mít při 100 % plynu maximální odběr 15,41 A. Motor váží 108 gramů, vrtule 16,5 gramů. Tento motor je stavěn na 22,2V architekturu (LiPol 6S). Tedy hledám 6S regulátor, ideálně se jeví například Turnigy MultiStar BLheli_32 ARM 51A Race Spec ESC 2~6S (OPTO). Sice má ohromný proudový rating, nicméně mi to vůbec nevadí, protože váží pouhých 17,2 gramů. Budu uvažovat, že rám nebudu hmotnostně optimalizovat, ale pouze ho pro jednoduchost poměrově zvětším. U původního dronu používám vrtule s průměrem 25 cm, nový dron by používal vrtule s průměrem 42,5 cm. Vzhledem k tomu, že středový rám může zůstat zhruba stejný, získám diagonální velikost 58,5 cm a tedy 1,42krát větší rám. Řídící jednotka a užitečné zatížení bude mít stejnou hmotnost u obou dronů. Nový dron má při 40% výkonu motorů tah 2004 gramů a aktuálně jsem všemi komponenty bez baterií vyčerpал 1621,8 gramů.

U původního modelu používám baterie 11,1V nominální kapacitu 5,4Ah, tedy při vybití na 80 % dodají 47,95Wh a při váze 383 g má energetickou hustotu 0,125 Wh/g.

U nového modelu bych použil například baterii Upgrade Energy Dark Lithium V2 21700 4200mAh 6S 22.2V 25C Li-ion Battery. Má napětí 22,2V, nominální kapacitu 4,2Ah, tedy při vybití na 80 % dodá 74,59Wh a při váze 420 g má energetickou hustotu 0,178 Wh/g.

Tabulka 6 - Porovnání komponentů

	„Šuplíkové“ komponenty	Nové komponenty
Motory	224 g	432 g
Vrtule	48 g	66 g
ESCs	76 g	69 g
Baterie	383 g	420 g
FC	200 g	200 g
Rám	437 g	623 g
Užitečné zatížení	232 g	232 g
CELKEM	1600 g	2042 g

Z tabulky výrobce mi vychází, že dron bude viset na cca 40% výkonu motorů a bude mít spotřebu 160 W při účinnosti 13 g/W. Ostatní palubní elektronika má spotřebu zhruba 10 W. Vychází mi tedy celkový letový čas 26 minut. Při využití větší baterie (motory mají rezervu) mi vychází tyto letové časy:

LiIon 22,2V 8400mAh: 43 minut-

LiIon 22,2V 12600mAh: 52 minut

Tyto časy by byly podstatně lepší pro celkový monitoring při zachování stále relativně kompaktního a lehkého dronu.

Další zkušeností bylo uvědomění, že ne vždy jde vše podle plánu a člověk musí počítat se zpožděním, řešením různých technických problémů a testování metody snímání. Kvůli špatnému časovému odhadu jsem promeškal několik termínů měření, či zaznamenal nekompletní, nebo špatná data.

6 Závěr

V praktické části práce jsem popsal stavbu vícerotorového dron – quadcopter pro nošení multispektrální kamery RedEdge MX pro sběr dat nad ovocnými sady. Quadcopter má kratší letový čas o délce 12 minut, maximální vzletovou hmotnost 1,6 kg a využívá řídicí jednotku Ardupilot Pixhawk. Dron byl postaven z uhlíkových komponentů a plastu, jeho konstrukci bych příště optimalizoval pro nižší hmotnost a lepší účinnost. Systém ArduPilot byl využit pro autonomní řízení a plánování waypoint misí, které umožňovaly opakovaná multispektrální měření. Přesnost navigace byla zlepšena použitím dvou GPS modulů, ale pro dosažení ideální přesnosti bych příště použil RTK GPS navigaci.

V rámci práce jsem dále spočítal vhodnou výšku, rychlost letu a rozestupy mezi snímky pro správné snímání dat. Po tomto vyladění a kalkulaci se mi opakovaně dařilo, rychle a efektivně měřit multispektrální data nad ovocným sadem.

Zjistil jsem, že pro létání nad ovocnými sady s kamerou RedEdge MX je vhodná výška letu 22 metrů, s rozestupy mezi jednotlivými snímanými řádky 2,1 metrů a vzdáleností mezi jednotlivými snímky 2,88 metrů. Letový čas plochy 150x25 metrů mi tímto stylem, při rychlosti letu 2,6 m/s vyšel na 12 minut.

Dále jsem zvažoval možná vylepšení příštího dronu a optimalizaci komponentů pro delší letový čas, větší efektivitu a tím snazší zaznamenávání dat.

Tato práce ukazuje, že využití dronu s multispektrální kamerou a systémem ArduPilot umožňuje efektivní, rychlý a levný sběr dat nad ovocnými sady, pro další hodnocení a opakovaná měření v různých fázích růstového období. Letecké měření může určovat, kde a kdy je potřeba hnojiva, pesticidů nebo vody, což může vést k významným úsporám zdrojů a ke snížení environmentálního dopadu. Díky těmto technologiím může precizní zemědělství také pomoci zvýšit výnosy a kvalitu plodin.

V další práci bych se zabýval stavbou dronu s využitím komponentů cíleně vybraných na konkrétní projekt, s možností využití RTK GPS a dalších záznamových senzorů (např. RedEdge MX + LiDAR + panochromatická kamera).

Reference

1. Unmanned aerial vehicle. *Wikipedie*. [Online] [Citace: 06. květen 2023.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle?oldid=1142705215.
2. Floreano, Dario a Wood, Robert J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*. 521, 2015, stránky 460–466.
3. DRONES ETC. *What is the difference between a drone and an RC plane or helicopter?* [Online] 17. listopad 2015. [Citace: 06. květen 2023.]
<https://web.archive.org/web/20151117020459/https://www.dronesetc.com/blogs/news/21481409-what-is-the-difference-between-a-drone-and-an-rc-plane-or-helicopter>.
4. Scaramuzza, a další. Vision-Controlled Micro Flying Robots From System Design to Autonomous Navigation and Mapping in GPS-Denied Environments. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 09 2014.
5. Misra, Akshat & Jayachandran, Sudhakaran & Kenche, Shivam & Katoch, Anirudh & Suresh, Arjun & Gundabattini, Edison & Selvaraj, Senthil Kumaran & Legesse, Addisalem. A Review on Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Tilt-Rotor and Tilt Wing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Journal of Engineering*. 2022, 09 2022, stránky 1-27.
6. Intwala, Aditya & Parikh, Yash. A Review on Vertical Take Off and Landing (VTOL) Vehicles. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*. 2, 02 2015, stránky 186-191.
7. Shan, Jie & Li, Zhixin & Lercel, Damon & Tissue, Kevan & Hupy, Joseph & Carpenter, Joshua. Democratizing photogrammetry: an accuracy perspective. *Geo-spatial Information Science*. 1-14. 10.1080/10095020.2023.2178336., 2023.
8. Heng, Lionel & Honegger, Dominik & Lee, Gim & Meier, Lorenz & Tanskanen, Petri & Fraundorfer, Friedrich & Pollefeys, Marc. Autonomous Visual Mapping and Exploration With a Micro Aerial Vehicle. *Journal of Field Robotics*. 31, 07 2014.

9. EVROPSKÁ KOMISE. NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRÁVOMOCI (EU). *o bezpilotních systémech a o provozovatelích bezpilotních systémů ze třetích zemí.* 2019. 2019/945.
10. EVROPSKÁ KOMISE. PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU). *o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel.* 2019. 2019/947.
11. Letadla - základy aerodynamiky a řízení. *MIND BLOG.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://www.voxcafe.cz/mindblog/clanky/drony/letadla---zaklady-aerodynamiky-a-rizeni.html>.
12. What is Aerodynamics? *NASA.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-aerodynamics-58.html>.
13. Dynamics of Flight. *NASA.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/UEET/StudentSite/dynamicsofflight.html>.
14. Introducing Copter. *Ardupilot.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html#learn-more-about-copter>.
15. Stabilize Mode. *Ardupilot.* [Online] [Citace: 5. květen 2023.] <https://ardupilot.org/copter/docs/stabilize-mode.html#stabilize-mode>.
16. Altitude Hold Mode. *Ardupilot.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://ardupilot.org/copter/docs/altholdmode.html#altholdmode>.
17. Loiter Mode. *Ardupilot.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://ardupilot.org/copter/docs/loiter-mode.html#loiter-mode>.
18. Auto Mode. *Ardupilot.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://ardupilot.org/copter/docs/auto-mode.html#auto-mode>.
19. The Cube Module Overview. *CubePilot.* [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://docs.cubepilot.org/user-guides/autopilot/the-cube-module-overview>.
20. 3d Mapping. *Ardupilot.* [Online] [Citace: 5. květen 2023.] <https://ardupilot.org/copter/docs/common-3d-mapping.html>.

21. Accelerometer. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>.
22. What is GPS RTK? *sparkfun*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-gps-rtk/all>.
23. Gyroscope. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>.
24. What is Photogrammetry? *GISGeography*. [Online] 06. červen 2022. [Citace: 05. květen 2023.] <https://gisgeography.com/what-is-photogrammetry/>.
25. *Derivation of high-resolution orthophoto map from multicopter drone survey for application in infrastructure management*. Mohamad, NA & Azmy, Nurhidayah & Yusof, L & Wahap, M. místo neznámé : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Sv. 682.
26. Bouziani, Mourad & Amraoui, M. & Kellouch, S. COMPARISON ASSESSMENT OF DIGITAL 3D MODELS OBTAINED BY DRONE-BASED LIDAR AND DRONE IMAGERY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLVI-4/W5-2021. 113-118. , 12 2021, stránky 113-118.
27. Setyawan, Afradon and Taftazani, Iqbal and Bahri, Syamsul and Noviana, Erma and Faridatunnisa, Maritsa. Drone LiDAR Application For 3D City Model. *Journal of Applied Geospatial Information*. 6, 04 2022, stránky 572-576.
28. Andrew J. Tatem, Scott J. Goetz, and Simon I. Hay. Fifty Years of Earth Observation Satellites. *National Library of Medicine*. [Online] 1. září 2008.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2690060/>.
29. Multispectral vs Hyperspectral Imagery Explained. *GISGeography*. [Online] 30. květen 2022. [Citace: 05. květen 2023.]
<https://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>.
30. Lum, Christopher and Mackenzie, Madison and Shaw-Feather, Charlie and Luker, Elaiza and Dunbabin, Matthew. Multispectral Imaging and Elevation Mapping from an Unmanned Aerial System for Precision Agriculture

- Applications. *ResearchGate*. [Online] 07 2016.
https://www.researchgate.net/publication/321084926_Multispectral_Imaging_and_Elevation_Mapping_from_an_Unmanned_Aerial_System_for_Precision_Agriculture_Applications.
31. RedEdge-MX Integration Guide. *MicaSense*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/360011389334-RedEdge-MX-Integration-Guide>.
32. T-Motor Antigravity MN2214 CCW. *Kopterworx*. [Online]
<https://www.kopterworx.com/t-motor-antigravity-mn2214-ccw.html>.
33. Image Acquisition. *Pix4D Documentation*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition>.
34. Step 1. Before Starting a Project > 1. Designing the Image Acquisition Plan > b. Computing the Flight Height for a given GSD - PIX4Dmapper. *Pix4D Documentation*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557469-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-b-Computing-the-Flight-Height-for-a-given-GSD-PIX4Dmapper>.
35. Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry. *Pix4D Documentation*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry>.
36. How to Process MicaSense Sensor Data in Pix4D. *Micasense*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115000831714-How-to-Process-MicaSense-Sensor-Data-in-Pix4D>.
37. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)? *GISGeography*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>.
38. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. *USGS*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.] <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>.

39. Global Vegetation. *EarthObservatory*. [Online] [Citace: 05. květen 2023.]
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/8622/global-vegetation>.
40. Antigravity MN5006 KV300. *T-Motor*. [Online]
<https://store.tmotor.com/goods-996-Antigravity+MN5006+KV300.html>.
41. Upgrade Energy Dark Lithium V2 21700 4200mAh 6S 22.2V 25C Li-ion Battery - XT60. *GetFPV*. [Online] <https://www.getfpv.com/upgrade-energy-dark-lithium-v2-21700-4200mah-6s-22-2v-25c-li-ion-battery-xt60.html>.
42. Floor and ceiling functions. *Wikipedie*. [Online] [Citace: 06. Květen 2023.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Floor_and_ceiling_functions.

Seznam tabulek a obrázků

Tabulka 1 - Specifikace sensorů RedEdge MX.....	32
Tabulka 2 - Specifikace quadcoptery.....	33
Tabulka 3 - Známé konstanty pro výpočet.....	36
Tabulka 4 - Kalkulované hodnoty	37
Tabulka 5 - Shrnutí doby záznamu a rozlišení dle výšky letu.....	38
Tabulka 6 - Porovnání komponentů	43
Obrázek 1 - Graf doby letu ku výšce letu.....	39