FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
KYBERNETIKY

Diplomová práce

Pokročilé algoritmy autonomního přistávání bezpilotního letounu na plošině

Autor:
Vojtěch Breník

Vedoucí práce:
Ing. Petr Neduchal, Ph.D.

5. května 2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Vojtěch BRENÍK**
Osobní číslo:	**A22N0105P**
Studijní program:	**N0714A150011 Kybernetika a řídicí technika**
Specializace:	**Umělá inteligence a automatizace**
Téma práce:	**Pokročilé algoritmy autonomního přistávání bezpilotního letounu na plošině**
Zadávající katedra:	**Katedra kybernetiky**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši v oblasti algoritmů pro autonomní přistání bezpilotního letounu (dronu) na plošině.
2. Proveďte rešerši dostupných simulátorů vhodných pro tuto úlohu.
3. Analyzujte možnosti simulace externích vlivů (vítr, teplota, ...) na přistávající bezpilotní letoun.
4. Navrhněte systém pro simulaci přistání bezpilotního letounu na plošině s využitím některé z metod uvedených v rešerši.

Rozsah diplomové práce: **40-50 stránek A4**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Xin, L., Tang, Z., Gai, W., & Liu, H. (2022). Vision-based autonomous landing for the uav: A review. *Aerospace*, *9*(11), 634.
2. Kakaletsis, E., Symeonidis, C., Tzelepi, M., Mademlis, I., Tefas, A., Nikolaidis, N., & Pitas, I. (2021). Computer vision for autonomous UAV flight safety: An overview and a vision-based safe landing pipeline example. *Acm Computing Surveys (Csur)*, *54*(9), 1-37.
3. Saavedra-Ruiz, M., Pinto-Vargas, A., & Romero-Cano, V. (2022). Monocular Visual Autonomous Landing System for Quadcopter Drones Using Software in the Loop. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 37(5), 2–16.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Neduchal, Ph.D.**
Výzkumný program 1

Datum zadání diplomové práce: **2. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2024**

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
L.S.

Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
vedoucí katedry

V Plzni dne 2. října 2023

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne 20. května 2024 _____

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

Abstrakt

Pokročilé algoritmy autonomního přistávání bezpilotního letounu na plošině

Vojtěch Breník

Český abstrakt

Advanced algorithms for autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on a platform

English abstract

Poděkování

Poděkování. . .

Obsah

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam zkratek

API Application Programming Interface - rozhraní pro programování aplikací. 15, 17

GPS Global Positioning System - globální polohový systém. 7

GUI Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní). iv, 17–20

HIL Hardware in the loop. 15

IMU Inertial Measurement Unit - inerciální měřicí jednotka. 7, 9

MSE Mean Squared Error - střední kvadratická chyba. 5

SIH Simulation in Hardware - simulace na hardwaru. 16

SW Software. 18

UAV Unmanned Aerial Vehicle - bezpilotní letadlo. iv, v, 1, 3, 7, 8, 11, 13–21

UDP User Datagram Protocol. 14

1 Úvod

1.1 Bezpilotní letadlo

UAV - využití, aplikace, součástí mise je přistávání - potřeba jeho automatizace; druhy, historie, specifika; zúžení na čtyřrotorový pro účely práce S klesající teplotou roste vnitřní elektrický odpor akumulátoru UAV (Łebkowski, 2017), čímž klesá jeho využitelná energie i výkon. Snížený maximální výkon může vést ke změněné dynamice letu.

1.2 Přistávání

definice, možnosti, navádění na cíl (opticky, proč ne jiné možnosti)

1.3 Struktura práce

2 Definice úlohy

3 Plošina pro přistávání

Rovné místo určené pro přistávání UAV s vertikální dráhou přistávání se nazývá plošina pro přistávání, případně přistávací plošina nebo plocha. Může být pevná, přenosná či pohyblivá (s vlastní lokomocí). Pevné plošiny jsou přímo spjaty s místem jejich konstrukce, zatímco u přenosných a pohyblivých lze měnit místo přistání. Obvykle se takto označují místa pro přistání letadel s největším rozměrem nejvýše okolo 2 m, plošiny pro větší stroje by se pak označily jako helipad nebo heliport.

Všechna zmíněná místa většinou nesou nějaké vizuální označení, neboli fiducíální marker (sekce 3.1), které slouží k jednodušší orientaci pilota, případně může podporovat autonomní přistání. Základní a nejpoužívanější variantou označení je velké písmeno H umístěné v kružnici. V oblasti autonomních UAV se plošiny často označují strojově čitelnou jedinčnou značkou, která nese i informaci, pomocí které se dá identifikovat.

V této práci byla použita plošina zkonstruovaná jako deska tloušťky [doplnit tloušťku] tvaru čtvrce o straně 70 cm. Celou plošinu vždy pokrýval rekurzivní fiduciální marker Apriltag o 2 vrstvách. Vnější vrstva o rozměrech 10x10 měla uprostřed díru o rozměrech 2x2 (rodina TagCustom48h12), do které byl umístěn tag vnitřní vrstvy o rozměrech 8x8 (rodina Tag36h11) obklopený oddělovací čárou o tloušťce 1. Rozměry značek jsou zde uvedeny včetně okraje, přičmž vnější značka měla jednu datovou vrstvu za okrajem.

Plošina byla vždy umístěna vodorovně do terénu tak, aby ji ve svislém směru nic nezakrývalo a v její blízkosti nebyly překážky, které by mohly přímo ovlivnit přistávání. Ve větší vzdálonosti mohla být umístěna překážka, která zastiňovala část plochy a tím i značky, čímž mohla být negativně ovlivněna přesnost a spolehlivost její detekce.

3.1 Fiduciární markery

Fiduciární markery (nebo také značky) mohou mít mnoho podob (tvary, vzory, uspořádání klíčových prvků) a oblastí uplatnění (snímkování v medicíně, mapování zemského povrchu, lokalizace zájmových bodů v obrazu, v robotice, identifikace jedinců atp.). Obecně se jako fiduciární marker označuje nějaký předmět, který slouží v zorném poli zobrazovacího přístroje k určení polohy nějakého zájmového bodu, jeho měřítka nebo jeho identifikaci. V robotice se podle jejich obrazu zachyceného kamerou může určovat vzájemná poloha kamery a předmětu, na němž je značka připevněna. (Košťák a Slabý, 2021) Toho se využívá v této práci při odhadu polohy přistávací plošiny v prostoru. Dále budou uvedeny příklady některých používaných typů značek a popsány jejich základní vlastnosti. Pro hodnocení fiduciárních systému, čili markerů a jejich detektorů, se používají metriky jako 1. míra falešných pozitiv, 2. míra záměny značky, 3. míra falešných negativ, 4. minimální velikost značky (Fiala, 2005), 5. doba trvání detekce (Garrido-Jurado et al., 2014; Wang a Olson, 2016) a další specifické vlastnosti. O postupech používaných při detekci pojednává kapitola 4.

3.1.1 ARTag

ARTag je dvouodstínový fiduciární systém sestávající z 2002 značek, z nichž polovina má černé okraje a polovina bílé. Prostor mezi okraji je vyplněn mřížkou o rozměrech 6x6, přičemž každá z buněk může být bílá nebo černá. Kromě kódovaných bitů obsahuje navíc i kontrolní součet, s jehož využitím lze korigovat chyby (maximálně 2 bity z 36). Má nízkou míru falešných pozitiv i míru záměny značky za jinou. Ve srovnání se starším ARToolkit má vylepšenou identifikaci a verifikaci vzorů a snižuje tak míru záměn značek. Přesto má větší knihovnu možných vzorů. (Fiala, 2005)

3.1.2 Aruco

Fiducírní systém Aruco s bity kódovanými pomocí čtverců nevyužívá předdefinovanou knihvnu vzorů, ale v závislosti na požadavcích uživatele na velikost značky a slovníku generuje takové značky, které mají mezi sebou co nejvyšší vzdálenost, čímž se minimalizuje míra záměn značek, a co největší počet přechodů mezi bity, čímž se minimalizuje míra falešných pozitiv. Navíc je možné překrývat malé části okraje značky a nenarušit tím detekci, nebo v aplikaci využívat

3.1.3 Apriltag

Dalším podobným systémem je Apriltag, který využívá podobné metody jako výše zmíněné systémy. Definuje různé typy, tzv. rodiny, značek v závislosti na velikosti slova ve slovníku a minimální požadované Hammingovy vzdálenosti mezi tagy. I v tomoto případě je tak možné zjišťovat a opravovat chyby při detekci značky. Wang a Olson, 2016 Ve verzi 3 je navíc dvakrát rychlejší detektor než ve verzi 2, umožňuje použití na míru navržených tvarů (např. kruhových nebo dokonce s dírou) a data mohou být až za okrajem tagu, což zvyšuje datovou hustotu. Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019

Do díry v tagu je možné umístit další tag a vytvořit tak rekurzivní značku, kterou bude možné detekovat ve větším intervalu vzdáleností (Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019), toho bylo využito v této práci jako značky na přistávací plošině.

4 Detekce fiduciárních markerů

Během detekce fiduciárních značek se využívá zejména algoritmů počítačového vidění za účelem zvýraznění a extrakce informace související s tagem a naopak potlačení pozadí a také případně nalezení a lokalizace klíčových bodů, které mohou sloužit pro odhad polohy značky v prostoru v případě známého rozměru tagu a kalibrované kamery. Jako detekce se označuje proces nalezení značky v obrazu, algoritmus, který toto provádí se pak nazývá detektor.

Mezi algoritmy používané při detekci fiduciárních markerů patří prahování, vyhledávání vzorů (template matching), hranové detektory (Wang a Olson, 2016) nebo Houghova transformace (Shabalina et al., 2019). Dále je pospáno, jak se některé z těchto metod uplatňují v detektoru použitém v praktické části (Apriltag).

Apriltag Detektor apriltagů se skládá z pěti dílčích kroků: 1. adaptivního prahování, 2. segmentace souvislých hranic, 3. aproximace čtyřúhelníků, 4. rychlého dekódování a 5. volitelného zpřesnění hran. Během prahování se volí práh vždy lokálně v závislosti na okolí prahovaného bodu jako aritmetický průměr minimálního a maximálního jasu. Pro snížení výpočetní náročnosti je v tomto kroku vstupní obraz navíc decimován tak, že se extrémy hledají vždy v buňkách po 4x4 pixelech, ve verzi 2 (Wang a Olson, 2016) se autoři chtějí vyhnout nespojitostem na hranicích buněk a tak používají extrémy z osmiokolí (po buňkách). Ve verzi 3 (Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019) potom zjistili, že je vhodnější decimaci oddělit od prahování a používají bodové převzorkování, které lépe zachová hrany v obrazu, ale může vést na aliasing. Zachování hran je vhodné, protože se v dalším koroku detekují. Málo kontrastní body, které vzejdou z prahování se v dalším zpracování neuvažují, čímž jsou další kroky zrychleny.

Hranice se segmentují tak, že se nejprve najdou hrany v prahovaném obrazu, čili takové pixely, které sousedí s pixelem opačné barvy, které se následně slučují do hranic pomocí algoritmu union-find. Problém, kdy jsou dva velmi blízké tagy odděleny pouze tenkou linií bílých pixelů, který by při sloučení hranic znemožňoval detekovat oba tagy, je vyřešen tak, že bílé pixely mohou být součástí 2 hranic. Každé takto segmentované části hranice je přiřazeno nějaké číslo unkátní v rámci obrázku (tzv. obarvení). (Wang a Olson, 2016) Zrychlení ve verzi 3 je docíleno tím, že se zbytečně nesjednocují již sjednocené části (ušetří se volání sjednocení), navíc se včasně zamítají příliš malé oblasti, které by nemohly vést na dekódovatelný tag. (Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019)

Pro každé sjednocení z předchozího kroku je potřeba najít vhodný čtyřúhelník, tzn. rozdělit množinu hraničních bodů do 4 skupin, které odpovídají jednotlivým stranám čtyřúhelníku. Hledání optimálního řešení je příliš výpočetně náročné, proto se postupuje tak, že se naleznou kandidáti na rohy a poté se projdou všechny jejich kombinace. Rohy se hledají tak, že se body nejprve seřadí podle úhlu průvodiče vedeného z centroidu množiny a jednotlivými body, poté se postupně aproximují body v posuvném okně přímkou a hledají se maxima střední kvadratické chyby (MSE), odpovídající body jsou prohlášeny za rohy. Pro každou podmnožinu 4 rohů se zbylé body rozdělí na strany a každá z nich se aproximuje přímkou. Vybere se taková kombinace rohů, pro kterou je MSE nejnižší. (Wang

a Olson, 2016) Ve verzi 3 se řazení bodů provádí podle kvadrantu, ve kterém se bod nachází a sklonu průvodiče. Není tak nutné počítat explicitně úhel. (Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019)

Nalezené čtyřúhelníky se vyrovnají (pomocí homografie vypočtené ze souřadnic polohy jejich rohů) a hledá se nejbližší kód z dané rodiny značek pro každou ze 4 možných rotací. Omezí-li se počet odlišných bitů na 2, je možné předpočítat všechny tagy maximálně 2 bity vzdálené od validního tagu a zaznamenat je do hashovací tabulky. Při detekci se pak z tabulky jen vybere příslušná hodnota, nebo se detekce zamítne. (Wang a Olson, 2016) Verze 3 zavádí bilineární interpolaci buněk tagu a zvyšuje osttrost za účelem zlepšení detekce malých značek. (Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019)

5 Metody přistávání

Součástí této práce je návrh systému pro simulaci přistání bezpilotního letounu na plošině, který umožňuje implementovat libovolnou metodu navádění letounu na plošinu a jeho dosednutí tak, aby bylo možné různé metody vzájemně porovnat z různých hledisek a za různých podmínek a případně tak stanovit, za jakých okolností je vhodné použít daný přístup. V této kapitole jsou popsány metody, které byly implementovány, simulovány a následně porovnány mezi sebou (o průběhu simulace, porovnání a výsledcích dále pojednává kapitola 9). Všechny 4 metody mají společný základ, na kterém postupně staví s využitím dalších dílčích stavebních bloků a to samostatně nebo v jejich kombinaci.

5.1 Obecné vlastnosti metod

Bez ohledu na metodu jsou některé činnosti, které jsou prováděny před samotným přistáváním a v jeho průběhu, podmínky a vlivy stejné. Tato podkapitola zachycuje takové společné rysy metod implementovaných pro simulaci v této práci. Činnosti a jejich sled je vyobrazen na obrázku **??**.

Na začátku simulace je dron umístěn na zemi a není aktivní. Aby bylo možné simulovat přistání, je s ním nejprve nutné vzletět. Toho se docílí tak, že se aktivuje a řídicí jednotce se zadá příkaz pro vznesení a přelet do dané výšky. Následně je možné začít přistávání za následujících podmínek:

1. Letoun se vznáší ve vzduchu a je skoro[1] v klidu.
2. Je znám odhad polohy letounu pomocí GPS a IMU je správně kalibrovaná.
3. Letoun má dostatek energie pro přelet nad plošinu a následné přistání za daných přírodních podmínek.
4. Okamžitá rychlost v_o a směr větru ς_o jsou náhodné s normálním rozdělením

$$\begin{bmatrix} v_o \\ \varsigma_o \end{bmatrix} = \mathcal{N}\left(\begin{bmatrix} v \\ \varsigma \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\varsigma^2 \end{bmatrix} \right)$$

   filtrovaným dolní propustí 1. řádu s časovou konstantou $\tau_v = 1{,}59$ pro rychlost a $\tau_\phi = 4{,}77$ pro směr. Parametry normální rozdělení v, ς, σ_v a ς jsou voleny uživatelem systému pro každé přistání.
5. Přistávací plošina je částečně zastíněná, podíl zastíněné části je p_s a úhel mezi hranou stínu a severo-jižním směrem je θ.
6. Je známa přibližná geografická poloha plošiny.

Z těchto podmínek platí 2., 4., 5. a 6. po celou dobu přistávání. Pro přistání je nejprve nutné přeletět do blízkosti přistávací plošiny tak, aby mohla být zachycena kamerou umístěnou na palubě UAV. Řídicí jednotce se tedy zadá příkaz pro vodorovný přelet na známé

[1] Až na drobné nuance způsobené chybami měření palubních senzorů a náhodnými vlivy prostředí.

přibližné umístění plošiny. Je-li po přeletu detekovatelný fiduciální marker plošiny, může se k ní UAV začít přibližovat. Způsob přibližování je závislý na konkrétní metodě a právě jím se jednotlivé metody liší. Pokud se naopak nepodaří značku detekovat, přistání selhává. Může to být způsobeno příliš velkou nepřesností v poloze plošiny, příliš velkou svislou vzdáleností od plošiny, nebo příliš velkým větrem, který letoun vychyluje od vodorovné polohy natolik, že tag je mimo zorné pole kamery.

I přes rozdíly, které jsou posány dále, se využívá stejného způsobu ovládání dronu. Konkrétně se jedná PID regulátor rychlosti v jednotlivých osách podle vzdálenosti od požadované trajektorie a rotace ψ ve svislé ose (osa z) podle odchylky od základního směru (SJ směr, osa y). Jeho výstup je prostřednictvím režimu řízení Offboard zaveden do vnitřní kaskády regulátorů řídicí jednotky UAV.

V následujících podkapitolách (5.2 až 5.5) jsou popsány způsoby přiblížení použité v implementovaných metodách.

5.2 Přistávání po svislé přímce

Přistávání po svislé přímce je nejjednodušší z implementovaných metod přistávání. Spočívá v tom, že se letoun řídí tak, aby jeho vodorovná vzdálenost od středu plošiny byla během přistávání nulová. Dle velikosti odchylky se řídí rychlost klesání, dokud dron nedosedne na plošinu. Poté je přistávání ukončeno. Požadovaná rychlost klesání se stanoví podle vzorce (5.1), kde d je vodorovná vzdálenost UAV od středu plošiny (případně požadované trajektorie v dané výšce u některých jiných metod) a h je výška nad povrchem, ve které se letoun nachází v daném okamžiku.

$$v_z = \frac{1}{2 \cdot \left(1 + \frac{12 \cdot d^2}{h}\right)} \tag{5.1}$$

Vzájemná poloha letadla a středu značky je odhadována detektorem zvolených fiduciálních markerů, tedy AprilTagů, na základě obrazových dat z kamery. Způsob odhadování polohy je podrobněji popsán v kapitole 4. Aby bylo možné relativní vzdálenost určit správně a ve správném měřítku, musí být známá kalibrace kamery a rozměr značky.

Vztah (5.1) byl tímto způsobem stanoven, aby funkce rychlosti byla hladká a v případě odchylky ji bylo možné korigovat před tím, než fiduciární značka opustí zorné pole kamery a nebude tak možné dále odhadovat polohu plošiny. Pokud by k tomu i tak došlo (např. vlivem silného poryvu větru), dron bude po omezenou dobu (max. 50 snímků bez tagu) stoupat konstantní rychlostí danou v konfiguračním souboru (výchozí hodnota je $v_z = 0{,}3$ m/s^2) a čekat na snímek z kamery, který by obsahoval tag. Nedojde-li k tomu včas, pokus o přistání se opakuje od přeletu nad plošinu.

5.3 Přistávání po svislé přímce s využitím Kálmánova filtru

Tento algoritmus je přímo odvozený od předchozího, stejně jako u něj je požadována nulová vodorovná vzdálenost dronu a plošiny během přistávání a výpočet svislé rychlosti se také neliší. Rozdíl spočívá v tom, že je sestaven jednoduchý dynamický model letounu, který se následně využívá pro predikci stavu v Kálmánově filtru (princip jeho fungování je popsán v podkapitole **??**) a měření polohy získaná z detektoru, která jsou zatížená šumem, se pak filtrují, čímž je dosaženo vyšší přesnosti odhadu polohy. Filtrované odhady se dále používají stejným způsobem jako v předchozí metodě a je podle nich řízena vodorovná rychlost UAV.

Pro tyto účely byl letoun modelován lineárním stochastickým systémem diskrétním v čase jako hmotný bod se směrem rotace, jehož stav je dán polohou v 3D prostoru a rychlostí v příslušných souřadnicích, uvažovala se také rotace ψ kolem osy z úhlová rychlost $\dot{\psi}$ v též ose. Vstupem systému je požadované zrychlení (nebo úhlové zrychlení) v jednotlivých proměnných, které je dané řízením dronu. Kromě vstupu na systém dále působí šum s normálním rozdělením $\mathbf{w} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q})$ s kovarianční maticí $\mathbf{Q}$, která byla určena řádově podobně jako Kojima a Namerikawa (2015) a dále podle obvyklých kovariancí chyb IMU. Vývoj stavu potom určuje rovnice (5.2).

Měření z uvedeného modelu jsou přímo 3 polohové souřadnice (x, y, z) a rotace ψ. I měření je navíc zatíženo náhodnou chybou modelovanou náhodnou veličinou s normálním rozdělením $\mathbf{v} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R})$. Jeho kovarianční matice $\mathbf{R}$ byla odhadnuta jako výběrová kovarianční matice měření odchylek relativní polohy měřené detektorem od skutečné relativní polohy v simulátoru. Měření $\mathbf{z}$ potom popisuje rovnice (5.3).

Pro fungování Kálmánova filtru je důležitý i vývoj kovarianční matice stavu $\mathbf{P}$ (protože stav je náhodná veličina), kterou je nutné inicializovat pro čas $k = 0$. Tato kovarianční matice byla také odhadnuta jako výběrová pro odchylky požadované polohy pro přelet od skutečné polohy po přeletu. Tento způsob odhadu kovarianční matice odpovídá skutečnému průběhu simulace přistávání, jak byla popsána v podkapitole 5.1. Použitý model je

tedy dán následujícími rovnicemi:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k, \quad \text{kde} \tag{5.2}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \\ y_k \\ \dot{y}_k \\ z_k \\ \dot{z}_k \\ \psi_k \\ \dot{\psi}_k \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}), \quad \text{kde}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}002 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}004 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}02 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad \text{kde} \quad \mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}), \tag{5.3}$$

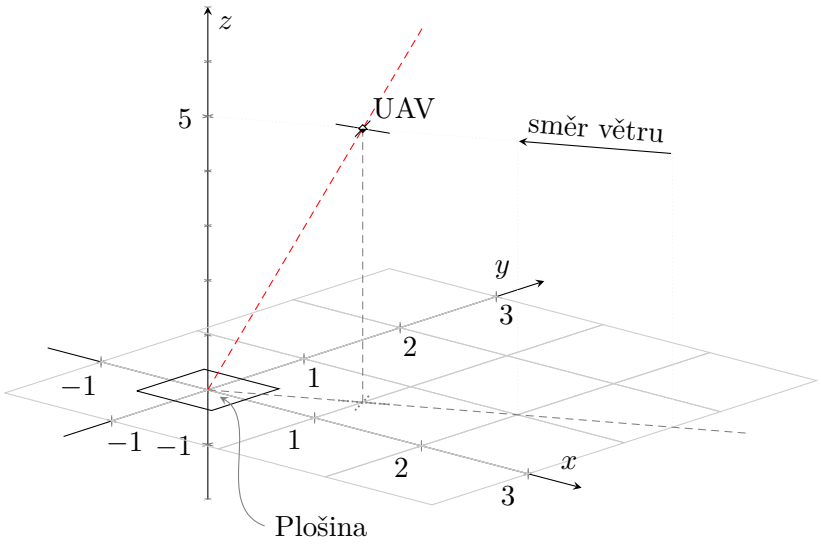
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Mezi aktualizacemi senzorů, jejichž měření jsou do řídicího programu zasílána prostřednictvím protokolu MAVLink, jsou hodnoty veličin považovány za konstantní. Frekvence aktualizací je $\frac{1}{\Delta t} = 30$ Hz. Tato frekvence je shodná se snímkovou frekvencí použité kamery a je od ní odvozena i délka kroku Kálmánova filtru, která tedy činí $\Delta t = \frac{1}{30}$ s.

5.4 Přistávání po skloněné přímce

Tento způsob přistávání také vychází z prvního zmíněného (sekce 5.2), ale narozdíl od předchozího s Kálmánovým filtrem (sekce 5.3) neupravuje měření relativní polohy, ale požadovanou polohu v průběhu přistávání.

V předchozích případech je požadovaná relativní horizontální poloha nulová a požadovaná trajektorie je tedy svislá přímka. V tomto případě je proměnná a je závislá na výšce, ve které se letoun v daný okamžik nachází, a na odhadu středních hodnot rotací okolo os y a



Obrázek 5.1: Přistávání po skloněné přímce (červeně). Letoun je nakloněný proti větru, čímž ho překonává a zároveň kamerou míří na střed plošiny, která je tak v zorném poli i za přítomnosti poruch.

x během vznášení v klidu, které jsou dány tím, jak dron překonává síly působené větrným prouděním. Požadovanou trajektorií je přímka s takovým sklonem, aby pro dané rotace (a tím i pro danou rychlost a daný směr větru) kamera UAV mířila na střed přistávací plošiny. Rychlost se v závislosti na odchylce od požadované trajektorie vypočte stejným způsobem jako v předchozích případech, tedy dle vztahu (5.1).

Tato metoda má za cíl zlepšit podmínky pro detekci značky na plošině při působení silného větru. V případě nutné korekce nějaké poruchy (způsobené například poryvem větru) zbývá okolo tagu více místa v obrazu, kam se může posunout, aniž by opustil zorné pole a tím znemožnil odhadovat svoji polohu vůči letounu.

5.5 Přistávání po sklonené přímce s využitím Kálmánova filtru

Poslední implementovaný přístup využívá obou změn navržených v předchozích dvou upravených metodách (sekce 5.3 a 5.4). Pro odhad vzájemné polohy dronu a značky na přistávací plošině je aplikován Kálmánův filtr s měřeními z detektoru tagů a lineárním stochastickým systémem jako modelem pohybu a rotace dronu v prostoru. Stejně jako ve všech implementovaných metodách pro přistávání je tento odhad využit PID regulátorem, který řídí požadovanou rychlost UAV ve dvou vodorovných osách tak, aby byla následována požadovaná trajektorie, a jeho výstup je zapojený do interní kaskády regulátorů řídicí jednotky letounu. V tomto případě je základní svislá trajektorie nahrazena skloněnou trajektorií proti směru větru, aby i při jeho překonávání letounem zůstala značka na plošině uprostřed zorného pole kamery, jak již bylo popsáno v předchozí podkapitole. Všechny tyto popsané metody byly podrobeny experimentům za různých podmínek a byla vyhodnocena jejich úspěšnost, přesnost a další vlastnosti. Popis těchto experimentů je v kapitole 9.

6 Simulátory bezpilotních letadel

Simulace umožňuje zjednodušit vývoj nových algoritmů tím, že zvyšuje bezpečnost, snižuje režii a umožňuje rychlejší iteraci úprav a testování. V případě zkoumání vnějších vlivů na systém, jehož je algoritmus součástí, má umělé prostředí výhodu v tom, že jeho parametry jsou pod kontrolou vývojáře, který tak může systém testovat v širší škále podmínek a ověřit a zhodnotit tak jeho funkčnost i za podmínek (nebo jejich kombinace), které jsou v realitě v daném místě málo obvyklé. Rizikem je možná nepřesnost simulace, která způsobí odlišné chování systému při reálném nasazení, z toho důvodu je obvyklé simulační výsledky na konci vývoje validovat, jestli odpovídají realitě.

Právě z důvodu minimalizace potřebných úprav a co nejsnazšího přenosu systému do reality je vhodné pro vývoj zvolit takový simulátor, který umožňuje propojení se skutečným letovým řídicím softwarem v řídicí jednotce letounu, jenž může být také simulovaný. V dokumentaci některých letových softwarů se simulaci přímo věnuje nějaká kapitola a nabízí různé podporované simulátory, které je možné spolu s nimi spustit (Willee, 2020b; Willee, 2016; Betaflight, 2024).

Mezi rozšířené řídicí softwary patří ArduPilot, Betaflight a PX4. Všechny podporují běh v simulovaném prostředí a spolupracují s vybranými simulátory. ArduPilot a PX4 se mimo jiné svou funkcionalitou zaměřují i na provádění autonomních misí, zatímco Betaflight je určen spíše pro lety s pohledem z první osoby například během závodění, kde je vyžadována velmi rychlá a přesná odezva na vstupy z rádiového dálkového ovládání od pilota a poruchy způsobené například pohyby vzduchu v atmosféře. S různými zaměřeními souvisí i podporované způsoby ovládání, kdy ArduPilot a PX4 je možné řídit vzdáleně pomocí protokolu MAVLink i rádiově modelářským ovladačem, zatímco Betaflight přes MAVLink umí pouze vysílat telemetrii a s jiným než rádiovým ovládáním se příliš nepočítá. Podporované simulátory se mezi řiícími softwary částečně překrývají, jejich přehled je uveden v tabulce 6.1, zdrojem dat je oficiální dokumentace příslušného kontroléru (Willee, 2020b; Willee, 2016; Betaflight, 2024).

Funkcemi se v tabulce 6.1 uvedené simulátory mohou výrazně lišit a pro další použití v této práci je třeba vybrat takový, ve kterém bude možné provozovat navádění na plošinu a to nejlépe na základě obrazu a simulovat různé vlivy prostředí. V následujících podkapitolách

Simulátor \ Kontrolér	ArduPilot	Betaflight	PX4
Gazebo	ANO	ANO	ANO
RealFlight	ANO	ANO	NE
jMAVSim	NE	NE	ANO
FlightGear	NE	NE	ANO
JSBSim	ANO	NE	ANO
AirSim	ANO	NE	ANO

Tabulka 6.1: Přehled podpory často používaných simulátorů vybranými letovými řídicími souftwary.

	Gazebo	RealFlight	jMAVSim	FlightGear	JSBSim	AirSim
def. prostředí	ANO	ANO	?	ANO	-	ANO
vložení plošiny	ANO	ANO	ČÁST.	ANO	-	ANO
světelné podm.	ANO	ANO	NE	ANO	-	ANO
stíny	ANO	ANO	NE	ANO	-	ANO
kamera	ANO	NE	ANO	NE	-	ANO
simulace větru	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
viditelnost	ANO	ANO	NE	ANO	-	ANO
teplota	ČÁST.	NE	NE	ANO	ANO	NE
dyn. změny	ČÁST.	?	ČÁST.	ANO	ANO	ANO

TABULKA 6.2: Podpora některých funkcí a vlastností, které jsou důležité pro návrh simulačního systému pro přistávání UAV, vybranými simulátory. „ANO“ znamená, že je daná funkce simulátorem zcela podporována; „ČÁST.“, neboli částečně, je uvedeno u funkcí s omezenou podporou, jež nelze zcela použít, např. funkce implementovaná, která nemá žádný vliv na simulovaný model; „NE“ se uvádí u chybějící funkce simulátoru; „-“ vyznačuje funkci nepodporovanou z důvodu, že simulátor má jiné zaměření a nesplňuje podmínky pro implementací takové funkce; „?“ znamená to, že ze zdrojů dostupných autorovi nebylo možné spolehlivě určit, zda má simulátor danou funkcionalitu. Zkratky v tabulce: Def. prostředí znamená uživatelská definice prostředí, podm. jsou podmínky a dyn. znamená dynamické změny ostatních simulačních podmínek.

(sekce 6.1 až 6.6) jsou zevrubně popsány hlavní funkce jednotlivých simulátorů a jejich obecný popis. Porovnání jejich vlastností důležitých pro tuto práci je uvedené v tabulce 6.2.

6.1 Gazebo

Gazebo je simulátor vyvíjený nadací Open Source Robotics Foundation. Je výchozím simulátorem v Robot Operating System, díky čemuž se těší velké oblibě při 3D simulacích dynamiky robotů. Má velmi aktivní komunitu. Umožňuje využití různých fyzikálních enginů, modelů senzorů a podporuje snadné vytváření 3D světů. Díky tomu lze snadno testovat návrhy robotů a algoritmů nebo i trénovat systémy strojového učení pomocí realistických scénářů. Gazebo používá modulární architekturu s oddělenými knihovnami pro simulaci fyziky, vykreslování, uživatelské rozhraní, komunikaci a generování dat senzorů. Podporované UAV zahrnují čtyřrotorové letouny (Iris a Solo), šestirotorové letouny (Typhoon H480), různé konvertoplány (např. letadla s plochou dráhou letu a svislým startem a přistáním), běžná letadla nebo pozemní vozítka. I když je Gazebo bohatou platformou, vykreslovací techniky nejsou tak pokročilé jako například v Unreal Engine nebo Unity, které využívají jiné simulátory. (Ebeid et al., 2018)

Co se týče simulace vnějších vlivů, Gazebo nativně umožňuje měnit podmínky osvětlení, simulaci větru je možné provést pomocí doplňku distribuovaného společně s Gazebem a v definici modelu je možné upravit, jak bude vítr působit na model. Teplotu i její senzor je možné také simulovat pluginem, ale působení na model není implementované. Ve starších verzích Gazeba označovné jako Gazebo classic je možné simulovat chování baterie pomocí pluginu (Pecka, 2023), ale změna dynamiky způsobená změnou vnitřního odporu baterie není ani s tímto pluginem přímočará.

6.2 RealFlight

RealFlight je komerční simulátor s 3D zobrazením, který umožňuje návrh a testování vlastních letounů. Podporuje simulaci různého počasí, včetně zhoršené viditelnosti, větru a změn podmínek osvětlení. Objekty v simulátoru také mohou vrhat stíny. Je zaměřen spíše na výcvik pilotů rádiem ovládaných modelů letadel a není možné ho spustit bez připojeného ovladače (Mackay, 2017; RealFlight, 2024). Kromě toho oficiální dokumentace nezmiňuje možnosti spouštění přímo s různými nastaveními vnějších vlivů (RealFlight, 2024), což by ztěžovalo vývoj, ani možnosti využití obrazových dat. Není tedy příliš vhodnou variantou pro použití v této práci. Narozdíl od Gazeba není podporován kontrolérem PX4.

6.3 jMAVSim

Java Micro Air Vehicle Simulator (jMAVSim) je jednoduchý a lehký simulátor multirotorových letounů vyvinutý týmem PIXHAWK engineering. Podporuje protokol MAVLink, používá knihovnu Java3D pro vizualizaci a připojuje se přímo k HIL pomocí sériového spojení nebo k Software-in-the-Loop (SITL) pomocí komunikace přes User Datagram Protocol (UDP) k řídicímu softwaru PX4. Má jednoduchou monolitickou architekturu. Ebeid et al., 2018

Podporuje ho jediný z vybraných kontrolérů a to PX4. Zaměřuje se na simulaci dynamiky dronu, ale vyobrazení světa není příliš realistické, dokumentace nezmiňuje, jak měnit světelné podmínky a vytvářet stíny. Umožňuje umístění kamery na model a přenos obrazu přímo přes MAVLink, tímto způsobem může být přenos řešen i v reálném UAV, a umožňuje nastavení vlastností větru. (Anton, 2013; Willee, 2020a)

Nemožnost simulace různých světelných podmínek, obtížná rozšiřitelnost a málo rozsáhlá dokumentace nejsou pro tuto práci vhodné.

6.4 FlightGear

FlightGear je pokročilý open-source simulátor, který je snadno rozšiřitelný a má mnoho funkcí, které ho přibližují realitě. Simuluje polohu hlavních vesmírných těles (Slunce, Měsíc, planety sluneční soustavy a některé viditelné hvězdy) v závislosti na čase a poloze, je dodáván s modelem povrchu Země, který je rozšiřitelný o vlastní modely. Lze v něm simulovat počasí (vítr, srážky, změna osvětlení) a zobrazuje i stíny objektů. Podpora pro virtuální kameru umístěnou na modelu v dokumentaci není zmiňována. Má podporu pro různé modely dynamiky letounů včetně JSBSim (o tom dále v sekci 6.5). (FlightGear, 2024)

Jako jediný z vybraných kontrolérů ho podporuje PX4. Kvůli obtížnému použití s kamerou a zbytečně mnoha funkcím, které by se musely nastavit, je jeho vhodnost pro použití v této práci omezená.

6.5 JSBSim

JSBSim je open source model letové dynamiky, který definuje pohyb letadla, rakety apod. pod vlivem sil a momentů, které na něj působí pomocí různých řídících mechanismů nebo přirozeně. JSBSim nemá vlastní grafiku. Může být spuštěn sám o sobě jako samostatný program, který bere vstup ze skriptovacího souboru a různých souborů konfigurace vozidel.

Lze jej také začlenit do větší implementace leteckého simulátoru, který zahrnuje vizuální systém. Nejznámějšími příklady použití JSBSim jsou v současnosti simulátory FlightGear (open source), Outerra, BoozSimulator (open source) a OpenEaagles (open source). (Jon, 2024)

Tento model lze použít pro simulaci s kontroléry ArduPilot a PX4, které ho oba podporují. Přestože je možné pomocí JSBSim dobře modelovat dynamiku letounů, jeho samostatné využití pro simulaci přistání UAV by nebylo vhodné, kvůli absenci grafického prostředí a tím i kamery a dále obtížné přenositelnosti na reálný systém, protože simulace probíhá dávkově.

6.6 Airsim

Aerial Informatics and Robotics Platform (AirSim) byla vyvinuta společností Microsoft a klade si za cíl podporovat vývoj a testování algoritmů pro aplikace autonomních vozidel, jako jsou algoritmy hlubokého učení, počítačového vidění a algoritmy zpětnovazebního učení. Fyzikální engine AirSim je založen na Unreal Engine 4 a může pracovat s vysokou frekvencí pro simulace HIL v reálném čase s podporou populárních protokolů (např. MavLink). Simulátor odpovídá modulární architektuře s důrazem na rozšiřitelnost. (Ebeid et al., 2018)

Mezi její funkce, které by byly užitečné při návrhu systému pro simulaci přistávání, patří realistická grafika včetně zobrazování stínů, kterou je možno pozorovat pomocí virtuálních kamer implicitně umístěných na modelu, simulace atmosférických jevů, které ovlivňují viditelnost jako srážky, ve vzduchu rozptýlené prachové částice, mlha, a také různé světelné podmínky. Kromě toho má bohaté API a všechny aspekty simulovaného světa je možné dynamicky upravit narozdíl například od Gazeba, kde je nutné tato nastavení předem určit v definičním souboru světa. (Shah et al., 2017)

Mezi podporované letové řídicí softwary patří u této simulační platformy stejně jako u JSBSim ArduPilot a PX4. AirSim je ve srovnání s ostatními zmíněnými simulátory mladším projektem a navíc měly být práce na ní v roce 2022 zastaveny kvůli plánovanému příchodu nového simulátoru od společnosti Microsoft, orientovaného na podnikatelskou sféru (Microsoft Research, 2021). Tyto skutečnosti by mohly vést k tomu, že by při vývoji systému pro přistávání navrženého v této práci nebylo možné řešit některé problémy, jež by vyvstaly, kvůli chybějící komunitě, nedostatku informačních zdrojů a přerušené oficiální podpoře.

7 Návrh systému pro simulaci přistávání UAV na plošině

Jedním z cílů této práce bylo navrhnout systém, pomocí kterého by bylo možné simulovat přistání bezpilotního letounu na plošině s využitím některé metody z kapitoly 5. Jeho návrh je obsahem této kapitoly. Byla zvolena částečně modulární architektura, díky čemuž je možné testovat různé metody přistávání nebo i jiné úlohy. Systém využívá vlastní komponenty i komponenty od jiných autorů, které jsou dále popsány v podkapitole 7.1 včetně důvodů, proč byly zvoleny. Podkapitoly 7.2 a 7.3 popisují, jaké vstupy systém očekává a jakým způsobem jsou využity v komponentách, co je jeho výstupem a odkud daná informace pochází. Dále (podkapitola 7.4) je na systém nahlíženo zevnitř a jsou charakterizovány vazby mezi komponenty a jejich informační obsah.

7.1 Komponenty systému

7.1.1 Letový řídicí software

Letový řídicí software běží při jeho použití v realitě přímo na počítači, který je umístěný na palubě dronu a k němuž jsou obvykle připojeny všechny senzory a aktuátory, jimiž je letoun vybaven. Využití přímo tohoto softwaru při simulaci zmenšuje rozdíly mezi simulačním prostředím a realitou, což umožňuje snadnější přenos systému do skutečnosti při jeho případném reálném nasazení.

Senzory a aktuátory jsou při simulaci pouze napodobené simulátorem a software běží buď stejně jako simulátor v použitém osobním počítači, nebo, je-li to podporováno, může být spuštěn na skutečném palubním počítači UAV, se zavedenými umělými vstupy ze simulace (tzv. Simulation in Hardware - simulace na hardwaru (SIH)). Software zpracovává data ze senzorů a vstupy od uživatele, generuje akční zásahy, které předává aktuátorům a může poskytovat telemetrické služby nebo služby vysokoúrovňového dálkového ovládání např. prostřednictvím protokolu MAVLink.

Právě takové služby se využívají v navrhovaném systému a z toho důvodu byl z výběru uvedeného v kapitole 6 vyřazen řídicí software BetaFlight, který je možné řídit jen modelářským rádiovým ovladašem. Ze zbývajících dvou variant byl v návrhu dále uvažován kontrolér PX4, který je zaměřený více na profesionální a akademické využití a také nabízí širší možnosti podporovaných simulátorů než ArduPilot.

7.1.2 Simulátor

Simulátor je v navrhovaném systému počítačový program, který napodobuje realitu, letovému řídicímu softwaru poskytuje umělá měření ze senzorů v simulovaném prostředí, přijímá od něj výstupy pro aktuátory a modeluje jejich vliv na simulované vozidlo. Dále simuluje dynamické chování celého letadla i ostatních předmětů umístěných napodobeném světě a, podporuje-li to, i jejich vzájemné interakce. Také zprostředkovává vizuální pohled do této umělé reality prostřednictvím simulované kamery.

Z možností podporovaných kontorlérem PX4 bylo vybráno Gazebo, které alespoň částečně podporuje všechny aspekty, které byly při návrhu považovány za důležité, je rozšiřitelné, má bohatou komunitu a je pro podobné úlohy běžně používáno. Ostatním simulátorům některé vlastnosti chyběly, měly jiné zaměření, skončila jim podpora nebo nebyly příliš rozšířené. I přes to by dalším dobrým kandidátem byl AirSim, který má bohatší API než Gazebo s dobrou dokumentací, takže by absence velké komunity nemusela působit problémy. Má také realističtější renderování.

7.1.3 GUI

Grafické uživatelské rozhraní (GUI) je vlastní komponentou navrhovaného systému a vytváří jednotné prostředí pro ovládání a nahlížení stavu ostatních komponent uživatelem. Tím tvoří rozhraní mezi uživatelem a systémem. Pro jeho konstrukci byl zvolen framework Qt s bindingy do jazyka Python PyQt (Riverbank Computing Ltd., 2024), který kromě grafického rozhraní propojuje i některé komponenty v systému. O funkcích GUI podrobně pojednává kapitola 8.

7.1.4 Hodiny ze simulátoru

Některé kroky přistávacích metod je nutné časově opozdit. Simulační čas se ale může lišit od reálného. Z toho důvodu je jednou z komponent systému také přijímač hodinového signálu ze simulátoru, který ostatním komponentám může poskytovat časovač. Ten se aktivuje po uplynutí stanovené doby v simulačním čase a může danou komponentu asynchronně informovat o této události. Čas ze simulátoru Gazebo se přenáší pomocí zpráv prostřednictvím knihovny gz-transport a Python bindingů gz-python Mainwaring, 2021.

7.1.5 Kamera ze simulátoru

Pro odhad polohy plošiny vzhledem k letounu se používá obraz prostředí s fiduciárním markerem, jejž je nutné získat ze simulátoru. To se provádí stejným způsobem jako u hodin, tedy pomocí gz-python, jen s využitím zprávy jiného typu. Kamera je v simulátoru Gazebo reprezentována pluginem, který obrazová data zprostředkovává jako zprávy, a její definice je součástí modelu letounu. Před použitím je nutné kameru kalibrovat, což bylo provedeno zachycením několika desítek obrázků čtvercové plochy rozdělené na černé a bílé čtverce o známých rozměrech uspořádaných do šachovnice z různých úhlů. Později se ukázalo, že informace o kalibraci je možné získat přímo z pluginu tím, že se definuje téma zpráv, do kterého se vysílá tato i další metadata.

Modul navrhovaného systému, který přijímá obrazová data ze simulátoru zároveň provádí i jejich zpracování pomocí detektoru fiduciárních markerů, který je také komponentou tohoto systému a je popsán dále. Metodám přistávání tento modul zprostředkovává detektorem vypočtenou relativní vzdálenost v jednotlivých osách, rotaci ve svislé ose a obraz s označenými detekovanými značkami.

7.1.6 Detektor fiduciárních markerů

V obrazu ze simulátoru se detekují fiduciární značky a odhaduje se podle nich vzájemná poloha plošiny a UAV, jehož součástí je kamera. Tyto dílčí úlohy zajišťuje právě detektor fiduciárních markerů (kapitola 4). Pro použití v navrhovaném systému byly vybrány značky AprilTag 3, protože umožňují konstrukci rekurzivních značek a tím i detekci ve větším rozsahu vzdáleností. K jejich rozpoznávání se využívá knihovna AprilTag 3 (Krogius, Haggenmiller a Olson, 2019) s Python bindingy dt-apriltag (Petrov, 2019).

7.1.7 Metoda přistávání

Metodou přistávání se rozumí ta komponenta navrhovaného systému, která kombinuje informace z různých jiných součástí (např. senzory z řídicího SW, polohová data z kamery atp.) za účelem ovládání dronu dle postupu popsaného v kapitole 5. Jedná se tedy o implementaci metody přistávání. UAV je ovládáno pomocí protokolu MAVLink, konkrétně prostřednictvím jeho implemetace v mavsdk pro Python (Oes et al., 2017).

7.1.8 Mise a jejich seznamy

Uživatel může pomocí GUI nebo v YAML souboru definovat vybrané podmínky prostředí a další vstupy systému (podkapitola 7.2) pro jeden průběh zvoleného přistávacího algoritmu. Takové definici se říká mise a je možné jich určit více. Všechny definice se ukládají v souboru, takže mezi běhy systému mohou být uchovány. Mise je navíc možné zahrnovat do jejich seznamů, jež se nazývají experimenty, a spouštět je postupně automaticky s vybraným počtem opakování pro každou položku zvlášť. Uchování definovaných experimentů je řešeno stejným způsobem jako u misí, tedy uložením do souboru. Každá mise má po svém ukončení určitý výsledek, který se v případě spuštění mise jako součásti experimentu uchovává ve výstupním souboru společně s výsledky již proběhlých misí.

7.1.9 Model světa

Umělé prostředí je definováno modelem světa ve formátu SDF (Open Source Robotics Foundation, 2020), který je využíván při simulaci. Obsahuje plochu s leteckým snímkem Borského parku v Plzni, definici světelných podmínek, vlastnosti větru a model přistávací plošiny a její stínění. Pro každou misi se podle vstupů dodaných uživatelem generuje odpovídající soubor, který je pak předán simulátoru.

7.2 Vstupy systému

7.2.1 Počáteční poloha UAV a plošiny

Do simulovaného světa se před začátkem simulace umisťuje model letounu a plošiny, jejichž poloha v rovině země vzhledem k počátku simulovaného světa (jeho geografické souřadnice jsou dány v konfiguračním souboru a odpovídají středu leteckého snímku použitého jako podkladu) je dána dvěma souřadnicemi v metrech (v osách x a y) a úhlem rotace ve stupních kolem svislé osy z. Těchto 6 vstupů (3 pro UAV a 3 pro plošinu) se zadává při definici mise v GUI a jsou také součástí uložené mise v souboru (sekce 7.2.5). Kvůli omezení simulátoru a způsobu jeho spouštění neexistuje přímočarý způsob, jak nastavit rotaci modelu dronu před spuštěním simulace, proto se rotoce nastavuje až za letu stejným způsobem, jakým se zadávají příkazy ke změně polohy prostřednictvím řídicího SW UAV.

7.2.2 Nastavení zastínění plošiny

Jedním ze simulovaných vnějších vlivů je zastínění plošiny, které je dáno 2 vstupy - podílem zastíněné a nezastíněné délky úsečky vedené kolmo na stranu plošiny, která míří ke zdroji světla, jejím středem a sklonem stínu ve stupních. Oba parametry jsou součástí definice mise (soubor nebo GUI). Stínění je napodobováno umístěním tenkého kvádru o rozměrech 30 x 5 m (šířka x výška) vysoko nad povrch na takové místo, aby vznikl požadovaný stín. Gazebo nesimuluje rozptyl světla postupně procházejícího atmosférou, takže ostrost stínu je závislá na přednastaveném konstantním rozptylu světla, ale ne na vzdálenosti vrhajícího objektu od vrženého stínu.

7.2.3 Nastavení větru

Vítr je simulován pomocí pluginu WindEffects, jehož parametry jsou nastaveny na základě 4 vstupních hodnot zadaných v GUI, nebo definici mise v souboru. Nastavuje se vodorovná rychlost a její směrodatná odchylka v metrech za sekundu a úhel směru větru vzhledem k ose x a jeho směrodatná odchylka ve stupních.

7.2.4 Výběr přistávací metody

Metody přistávání jsou předdefinované včetně jejich parametrů (např. zisky složek PID regulátoru) a jsou identifikovány názvem. Při definici mise v GUI si uživatel vybere jednu z metod z rozbalovací nabídky, v souboru s definicemi misí je pak uložen její název. Při spuštění mise se pak volají metody této vybrané metody.

7.2.5 Uložené mise a jejich seznamy

Po spuštění systému se dříve definované a uložené mise a jejich seznamy (tzv. experimenty) načtou ze souborů `mise.yaml`, který obsahuje seznam definic misí a `experimenty.yaml`, který obsahuje seznam definic experimentů. Definice experimentu je seznam názvů misí a počtu jejich opakování v rámci experimentu.

7.2.6 Konfigurační soubor

Konfigurační soubor obsahuje mnoho dalších vstupů, které jsou potřebné pro správný běh systému. Jedná se mimo jiné o nastavení některých cest k souborům a složkám (např. složka pro uchovávání definic umělých světů), výchozí kalibrace kamery, která se může použít dokud není doručena kalibrace přímo ze simulátoru, model UAV, který se má použí pro simulaci, kovarianční matice a matice modelu letounu pro Kálmánův filtr, směr dopadajícího slunečního záření nebo geografické souřadnice počátku kartézského souřadného systému umělého světa.

7.3 Výstupy systému

7.3.1 3D vizualizace simulovaného prostředí

Simulátor Gazebo má volitelně grafický režim, jehož součástí je 3D vizualizace simulace, ve které je možné se volně pohybovat a sledovat, co se ve světě odehrává.

7.3.2 Pohled kamery s vyznačenými detekovanými markery

Ve vlastním GUI se v záložce „Živě“ zobrazuje pohled z kamery, který je využívaný řídicím algoritmem přistávání. V obrazu jsou červeným čtyřúhelníkem vyznačeny všechny AprilTagy, které detektor zachytil, a jejich souřadnice a rotace v souřadné soustavě kamery.

7.3.3 Stav mise a experimentu

V záložce „Živě“ uživatelského rozhraní se také vyskytuje textový souhrn stavu probíhajícího experimetu a mise. Zobrazuje se aktuální opakování dané mise a její pořadí v probíhajícím experimetu. Přistávací metody jsou členěny do několika stavů (**??**), z nichž má každý název, který se na téže záložce také zobrazuje.

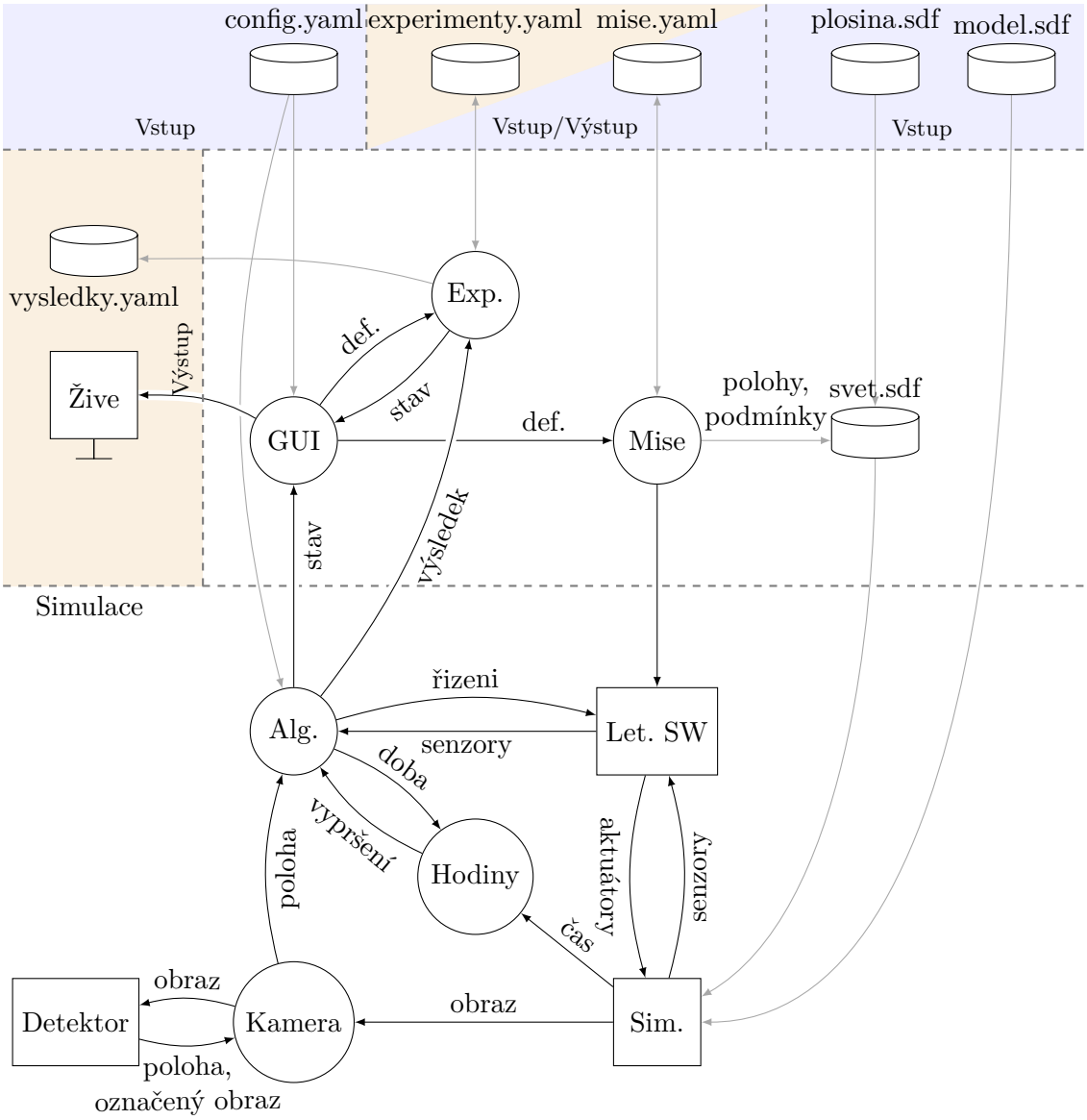
7.3.4 Výsledek mise a experimentu

Po ukončení mise se její výsledek, který zahrnuje různé sledované metriky, vypisuje do konzole a v případě, že mise byla spuštěna jako součást experimentu se navíc výsledek přidá do souboru s výsledky všech doposud proběhlých misí experimentu. Tento soubor je pak možné po ukončení analyzovat a vyvodit souhrnné výsledky.

7.3.5 Uložené mise a jejich seznamy

Při definici mise nebo experimentu v GUI se na disk uloží soubor, který zahrnuje všechny definice misí, respektive experimentů, aby mohly být při dalším spuštění systému načteny.

7.4 Struktura systému



Obrázek 7.1: Struktura navrhovaného systému pro simulaci přistávání UAV, jeho komponenty a jejich vzájemné informační vazby, vstupy a výstupy

8 Grafické uživatelské rozhraní

Budoucí výstup projektu - rozhraní pro spawnování dronu, plošiny a nastavení simulátoru atd.

9 Experimenty a vyhodnocení

Poznámky k provedení: U všech experimentů několik tříd podmínek (bezvětří, slabý vítr, slabý vítr s poryvy, silný vítr, silný vítr s poryvy; stín 0% 30%, 50%, 70%, 100%) a porovnat algoritmy. Chtěl bych se domluvit na prioritě pokusů a některé nechat až na konec, kdyby zbyl čas.

9.1 Přesnost přistání

Sledovat chybu v jednotlivých proměnných po dosednutí.

9.2 Přesnost přistávání

Sledovat chybu sledování trajektorie v průběhu přistávání (porovnat MSE?)

9.3 Vliv stínu na podíl nedetekovaných markerů

Počítat podíl snímků, ve kterých nebyl detekován tag po zahájení přistávání.

9.4 Úspěšnost přistávání

Porovnat (střední) počet pokusů nutných k úspěšnému dosednutí.

9.5 Ověření nezávislosti výsledků na směru větru

Aby se ušetřil počet pokusů, ověřil bych jen za silného větru, zda se nějak liší průběh přistávání.

9.6 Ověření nezávislosti výsledků na vzájemné počáteční poloze dronu a plošiny

9.7 Odhad kovariančních matic pro Kálmánův filtr

Nevím, jestli vůbec podrobněji rozepisovat zde, když už je to popsáno v podkapitole 5.3.

9.8 Střední doba výpočtu v jednom kroku algoritmu

Tento experiment mě nenapadl, ale pro celkové porovnání algoritmů by byl přínosný.

10 Diskuze

10.1 Možnosti reálného nasazení systému

11 Závěr

Bibliografie

[1] M. Fiala. „ARTag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques“. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. IEEE, 2005. DOI: 10.1109/cvpr.2005.74. URL: http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2005.74.

[2] Babushkin Anton. *jMAVSim*. 2013. URL: https://github.com/DrTon/jMAVSim (cit. 30. 04. 2024).

[3] S. Garrido-Jurado et al. „Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion“. In: *Pattern Recognition* 47.6 (čvn. 2014), 2280–2292. ISSN: 0031-3203. DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005.

[4] Takaaki Kojima a Toru Namerikawa. „Image-based position estimation of UAV using Kalman Filter“. In: *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*. IEEE, zář. 2015. DOI: 10.1109/cca.2015.7320663. URL: http://dx.doi.org/10.1109/CCA.2015.7320663.

[5] John Wang a Edwin Olson. „AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection“. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, říj. 2016. DOI: 10.1109/iros.2016.7759617. URL: http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2016.7759617.

[6] Hamish Willee. *Simulation*. ArduPilot. 2016. URL: https://ardupilot.org/dev/docs/simulation-2.html (cit. 29. 04. 2024).

[7] Randy Mackay. *Using SITL with RealFlight*. ArduPilot. 2017. URL: https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-with-realflight.html (cit. 30. 04. 2024).

[8] Julian Oes et al. *MAVSDK client for Python*. 2017. URL: https://github.com/mavlink/MAVSDK-Python/ (cit. 03. 05. 2024).

[9] Shital Shah et al. „AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles“. In: *Field and Service Robotics*. 2017. eprint: arXiv:1705.05065. URL: https://arxiv.org/abs/1705.05065.

[10] Andrzej Łebkowski. „Temperature, Overcharge and Short-Circuit Studies of Batteries used in Electric Vehicles“. In: *Przeglad Elektrotechniczny* 1 (květ. 2017). DOI: 10.15199/48.2017.05.13.

[11] Emad Ebeid et al. „A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators“. In: *Microprocessors and Microsystems* 61 (zář. 2018), 11–20. ISSN: 0141-9331. DOI: 10.1016/j.micpro.2018.05.002. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.micpro.2018.05.002.

[12] Maximilian Krogius, Acshi Haggenmiller a Edwin Olson. „Flexible Layouts for Fiducial Tags“. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019.

[13] Aleksandar Petrov. *Python bindings to the Apriltags library*. 2019. URL: https://github.com/duckietown/lib-dt-apriltags/ (cit. 04. 05. 2024).

[14] Ksenia Shabalina et al. „ARTag, AprilTag and CALTag Fiducial Systems Comparison in a Presence of Partial Rotation: Manual and Automated Approaches“. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer International Publishing, dub. 2019, 536–558. ISBN: 9783030112929. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_27.

[15] Open Source Robotics Foundation. *SDFormat*. 2020. URL: http://sdformat.org/ (cit. 04. 05. 2024).

[16] Hamish Willee. *jMAVSim with SITL*. PX4. 2020. URL: https://docs.px4.io/main/en/sim_jmavsim/ (cit. 29. 04. 2024).

[17] Hamish Willee. *Simulation*. PX4. 2020. URL: https://docs.px4.io/main/en/simulation/ (cit. 29. 04. 2024).

[18] Milan Košťák a Antonín Slabý. „Designing a Simple Fiducial Marker for Localization in Spatial Scenes Using Neural Networks“. In: *Sensors* 21.16 (srp. 2021), s. 5407. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21165407.

[19] Rhys Mainwaring. *Python bindings for gz-msgs and gz-transport*. 2021. URL: https://github.com/srmainwaring/gz-python/ (cit. 03. 05. 2024).

[20] Microsoft Research. *Home - Airsim*. 2021. URL: https://microsoft.github.io/AirSim/ (cit. 01. 05. 2024).

[21] Martin Pecka. *Gazebo ROS Battery plugin*. České vysoké učení technické. 2023. URL: https://github.com/ctu-vras/gazebo_ros_battery (cit. 30. 04. 2024).

[22] Betaflight. *SITL*. Betaflight. 2024. URL: https://betaflight.com/docs/development/sitl (cit. 29. 04. 2024).

[23] FlightGear. *Features – FlightGear Flight Simulator*. 2024. URL: https://www.flightgear.org/about/features/ (cit. 30. 04. 2024).

[24] Berndt Jon. *JSBSim Open Source Flight Dynamics Model*. 2024. URL: https://jsbsim.sourceforge.net/ (cit. 30. 04. 2024).

[25] RealFlight. *RealFlight RC Flight Simulator Software and Accessories*. 2024. URL: https://www.realflight.com/ (cit. 30. 04. 2024).

[26] Riverbank Computing Ltd. *What is PyQt?* 2024. URL: https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/ (cit. 03. 05. 2024).