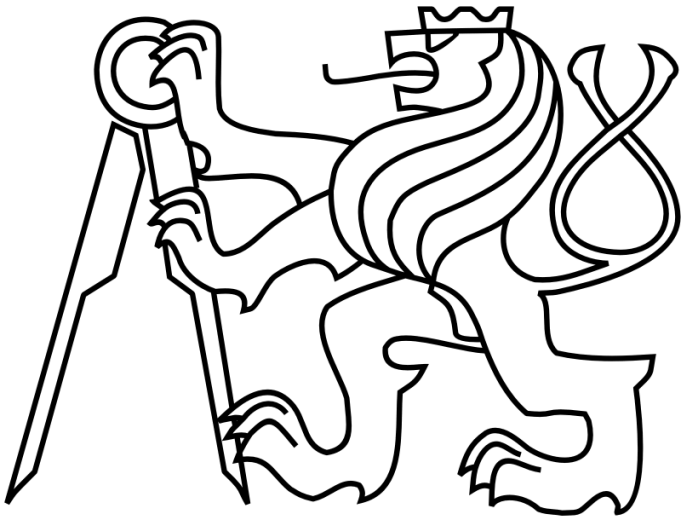
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Heterogenní formace pozemních robotů a bezpilotních helikoptér

Vojtěch Spurný

Vedoucí práce: Ing. Martin Saska, Dr. rer. nat.

Květen, 2013

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Vojtěch Spurný

Studijní program: Kybernetika a robotika (bakalářský)

Obor: Robotika

Název tématu: Heterogenní formace pozemních robotů a bezpilotních helikoptér

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a implementovat metodu pro řízení formací pozemních robotů a bezpilotních helikoptér. Navržený algoritmus bude vycházet z techniky prediktivního řízení použité pro řízení formace pozemních robotů v [1]. Student navrhne vhodný přístup, který zajistí bezkoliznost nalezeného řešení a neporušenou přímou viditelnost mezi členy formace pro potřeby relativní lokalizace. Navržený algoritmus bude otestován v prostředí s dynamickými překážkami.

Plán prací:

1. Pochopit algoritmus uvedený v [1].
2. Danou metodu rozšířit o predikci pohybu dynamických překážek.
3. Do plánování pohybu formace pozemních robotů integrovat možnost rozšíření formace o bezpilotní helikoptéry.
4. Ověřit funkci algoritmu pomocí simulací a případně experimenty s reálnými roboty. Podle dostupnosti paralelně vyvíjených robotů vedoucí práce rozhodne, zda student metodu ověří experimentem s pozemními roboty a helikoptérou anebo zjednodušeným 2D experimentem s platformou Syrotek [2]. Ve druhém případě by byla ověřena schopnost formace vyhýbat se dynamickým překážkám.

Seznam odborné literatury:

[1] M. Saska: Trajectory planning and optimal control for formations of autonomous robots. Schriftenreihe Würzburger Forschungsberichte in Robotik und Telematik, Band 3. Würzburg: Universität Würzburg. 2010. ISSN: 1868-7466.

[2] Kulich, M. - Košnar, K. - Chudoba, J. - Faigl, J. - Přeučil, L.: On a Mobile Robotics E-learning System. In Proceedings of the Twentieth European Meeting on Cybernetics and Systems Research. Vienna: Austrian Society for Cybernetics Studies, 2010, p. 597-602. ISBN 978-3-85206-178-8.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Saska, Dr. rer. nat.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2013/2014

prof. Ing. Vladimír Mařík, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

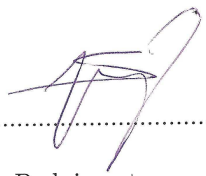
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 1. 2013

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. května 2013



.....

Podpis autora práce

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Saskovi, Dr. rer. nat. za vedení práce a řešení problémů, které s tím vyvstaly.

Abstrakt

Práce je zaměřena na navržení a implementování metody pro řízení heterogenních formací pozemních robotů a bezpilotních helikoptér. Cílem této metody je nalézt bezkolizní řešení a zachovat přímou viditelnost mezi členy formace pro potřeby relativní lokalizace formace. Dalším cílem práce je rozšíření této metody o predikci pohybu překážek. Toho je dosaženo navržením a integrováním vhodného řešení, které umožní formacím plánovat s uvažovanou znalostí pohybu dynamických překážek. Algoritmus vychází z techniky prediktivního řízení, která je na Katedře kybernetiky ČVUT v Praze používána pro řízení formace pozemních robotů. V práci jsou předloženy experimenty, které ověřují jak funkčnost rozšíření původní metody o bezpilotní helikoptéry, tak rozšíření metody o možnost predikce pohybu překážek.

Abstract

The aim of this work is to propose and implement a method for control of heterogeneous formations of ground vehicles and unmanned helicopters. The aim of this method is to find a non-collision solution and to maintain a visual contact among members of the formation for purposes of relative localization of the formation. Further aim of this thesis is to extend this method of prediction of movement of dynamic obstacles. This is achieved by proposing and integrating a suitable solution, allowing to formations to plan with the knowledge of the dynamic obstacles movement. The proposed algorithm is based on a model of predictive control which is used by the Department of Cybernetics at Czech Technical University in Prague to control the formation of ground vehicles. This work presents experiments that verify the functionality of extending of the original method of unmanned helicopters and also extending of the original method of possibility of prediction of obstacles movement.

OBSAH

1 Úvod **1**

2 Koncept plánování formace pozemních robotů a bezpilotních helikoptér **3**

2.1 Kinematický model 3

2.2 Definice formace 5

2.3 Plánování a stabilizace formace pomocí prediktivního řízení 6

2.3.1 Vysvětlení metody 7

2.3.2 Konvexní obal představující tvar formace pro plánování 7

2.3.3 Plánování a řízení trajektorie pro virtuálního lídra 8

2.3.4 Plánování a řízení trajektorie následovníka 9

3 Rozšíření algoritmu o možnost predikce pohybu dynamických překážek **11**

3.1 Integrace uvažované znalosti pohybu překážek do plánování trajektorie virtuálního lídra 12

3.2 Integrace uvažované znalosti pohybu překážek do plánování trajektorie následovníka 16

4 Simulace **18**

4.1 Plánování složitější situace s formací pozemních robotů a bezpilotních helikoptér 18

4.2 Komparace plánování trajektorie uvažující znalost pohybu překážek a plánování trajektorie bez této znalosti 21

4.3 Vlastnosti plánování trajektorie s predikcí pohybu překážek v závislosti na jejich odhadovaném pohybu 25

4.3.1 Vliv nepřesnosti odhadu trajektorie pohybu překážky 25

4.3.2 Simulace pro 3 druhy odhadovaného pohybu překážky 26

5 Experiment s reálnými roboty **29**

6 Závěr **32**

Literatura **34**

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1 Tvar formace popsaný v křivočarých souřadnicích. Zdroj [1] 5
2.2 Schéma kompletního systému plánování. Zdroj [1] 6
2.3 Konvexní obal. 8

3.1 Rozdělený časový interval řešení z aktuální polohy do cílové pozice. 13
3.2 Demonstrace výpočtu $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s uvažováním znalosti pohybu překážky. . . . 14
3.3 Situace, která může vyskytnout při plánování. 15

4.1 Obrázky ze simulace plánování pohybu formace do cílové oblasti. 19
4.2 Trasa, kterou procestovala formace z počáteční pozice do cílové oblasti. 20
4.3 Průběh hodnot účelové funkce použité pro plánování trajektorie virtuálního lídra. 20
4.4 Průběh řídících veličin virtuálního lídra. 20
4.5 Plánování trajektorie uvažující znalost pohybu překážek. 22
4.6 Plánování trajektorie bez znalosti o pohybu překážek. 22
4.7 Průběhy hodnot při plánování trajektorie, kdy byla uvažována znalost pohybu. . . 23
4.8 Průběhy hodnot při plánování trajektorie bez znalosti o pohybu překážek. 23
4.9 Průběhy hodnot účelové funkce použité pro plánování následovníků. 24
4.10 Výsledky experimentu. 25
4.11 Předpokládaný pohyb překážky u prvních dvou uvažovaných situací. 26
4.12 Výsledky experimentu. 27

5.1 Průběhy naplánovaných řídících vstupů pro členy formace. 30
5.2 Naplánovaná trajektorie formace. 30
5.3 Snímky formace při realizování naplánované trajektorie. 31

SEZNAM TABULEK

4.1 Parametry formace. 18
4.2 Nastavení hodnot plánování. 19
4.3 Nastavení hodnot plánování a formace. 21
4.4 Nastavení hodnot formace a parametrů plánování. 25

5.1 Nastavení hodnot formace a plánování. 29

KAPITOLA

PRVNÍ

ÚVOD

Pro řízení formace je nezbytné znát polohu členů formace. Ne vždy je však možné určit polohu všech robotů pomocí globální lokalizace jakou je například GPS. Jedna z možností tedy využívá pro lokalizaci členů ve formaci vizuální relativní lokalizace. Při té je nezbytné, aby během řízení formace byla zachována přímá viditelnost mezi členy. Je často problematické udržet tuto přímou viditelnost mezi pozemními roboty v oblastech s velkým počtem překážek nebo nerovným povrchem. Řešením tohoto problému je rozšíření formace o bezpilotní helikoptéry. Relativní lokalizace v těchto heterogenních formacích je umožněna použitím lehkých kamer, které jsou umístěny zespodu bezpilotních mikro helikoptér.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a implementovat plánování řízení formace UGVs a MAVs (v práci budou pozemní roboti označeni zkratkou UGVs (*unmanned ground vehicles*) a bezpilotní helikoptéry MAVs (*micro aerial vehicles*)), ve které je použita relativní lokalizace členů formace za pomoci kamer umístěných na MAVs. Dalším úkolem práce je rozšířit danou metodu o predikci pohybu dynamických překážek a ověřit funkci algoritmu pomocí simulací, popř. experimentu s reálnými roboty.

Problematika vyhýbání se překážkám je aktuální, jak je možné vidět například v článku [2] (řešící podobný problém, jako bude řešen v této práci, ale pouze pro jednoho pozemního robota).

Tato práce navazuje na plánování řízení formace pozemních robotů, které je například uvedené v [3, 4]. Pro řízení formace bude využit přístup leader-follower (česky lídr-následovník). To znamená, že plánování do cílové oblasti bude probíhat jen pro virtuálního lídra. Reprezentace formace je zahrnuta v plánování lídra včetně jejího omezení, které je dané členy a tvarem formace. Plánování bezkolizní trajektorie virtuálního lídra do cílové oblasti bude v tomto případě počítáno metodou využívající koncept prediktivního řízení. Touto metodou jsou počítány i řídící vstupy pro sledování navržené trajektorie. Výsledek z plánování bude poté předán členům formace, kteří ho

využijí pro přepočet na svou trajektorii. Příkladem využití přístupu lídr-následovník v praxi je formace autonomních sněžných pluhů odklízejících sníh z plochy letiště [5].

V kapitole 2 bude popsáno implementované rozšíření algoritmu o bezpilotní helikoptéry. Budou zde vysvětleny metody pro plánování a koordinaci heterogenní formace. V následující kapitole 3 bude popsán problém plánování pohybu formace v prostoru s dynamickými překážkami.

Funkčnost rozšíření algoritmu bude ověřena pomocí experimentů a simulací, které budou předloženy v kapitolách 4 a 5. Na simulacích bude ukázáno, že algoritmus je schopen vypočítat takové řešení, které nevede k naplánování kolizní trajektorie robotů. Simulacemi se dále ověří to, že využitý algoritmus bude zachovávat přímou viditelnost mezi členy formace, která je potřebná pro vizuální relativní lokalizaci. V kapitole 4 bude také ověřena funkčnost navrženého řešení plánování s využitím odhadované znalosti pohybu překážky a vliv nepřesnosti odhadovaného pohybu překážky na ni.

KAPITOLA

DRUHÁ

KONCEPT PLÁNOVÁNÍ FORMACE POZEMNÍCH ROBOTŮ A BEZPILOTNÍCH HELIKOPTÉR

V této kapitole bude vysvětlena implementovaná metoda řízení heterogenní formace pozemních robotů a bezpilotních helikoptér, kde je pro řízení formace využit přístup lídr-následovník. V následujících odstavcích bude z převážné části metoda popsána terminologií z práce [1] .

2.1 Kinematický model

Konfigurace virtuálního leadera L a n_r počtu následovníků v čase t je popsána vektorem $\psi_j(t) = \{x_j(t), y_j(t), z_j(t), \varphi_j(t)\} \in \mathbb{C}$, kde $j \in \{L, 1, ..., n_r\}$ a $\mathbb{C}$ je prostor konfigurací robotů. Virtuální leader představuje virtuální bod, který je umístěn v předu formace. Současně je také umístěn v ose formace. Poloha každého robota j je popsána kartézskými souřadnicemi $(x_j(t), y_j(t), z_j(t))$ a natočením $\varphi_j(t)$.

V prostředí robotů existuje konečný počet n_o překážek. Díky tomu je možné rozdělit prostor konfigurací $\mathbb{C}$ na dvě částí. $\mathbb{C}_{obst}$ reprezentuje konfigurace robotů, při kterých by došlo ke kolizi s překážkou a $\mathbb{C}_{free}$ představuje podprostor proveditelných konfigurací. Tedy platí, že $\mathbb{C}_{free}$ je doplněk $\mathbb{C}_{obst}$ vzhledem k konfiguračnímu prostoru $\mathbb{C}$.

Pohybový model robota v j lze popsat rovnicemi:

$$\begin{aligned} \dot{x}_j(t) &= v_j(t)\cos\varphi_j(t), \\ \dot{y}_j(t) &= v_j(t)\sin\varphi_j(t), \\ \dot{z}_j(t) &= w_j(t), \\ \dot{\varphi}_j(t) &= K_j(t)v_j(t), \end{aligned} \tag{2.1}$$

kde dopředná rychlost $v_j(t)$, křivost $K_j(t)$ a horizontální rychlost $\omega_j(t)$ jsou řídící vstupy označené jako vektor $\overline{u}_j(t) = \{v_j(t), K_j(t), w_j(t)\}$.

Časový interval řešení z aktuální polohy do cílové pozice $[t_0, t_{end}]$ obsahuje konečnou řadu časů, kde platí, že $t_0 < t_1 < \ldots < t_{end-1} < t_{end}$. Po celou dobu časového intervalu $[t_k, t_{k+1})$, kde $k \in \{0, \ldots, end-1\}$, jsou řídící vstupy vždy konstantní (od této části bude používáno namísto t_k jeho index k). Integrováním kinematického modelu popsané vzorcem (2.1) přes interval $[t_0, t_{end}]$, lze odvodit následující model pro přechodové body, ve kterých se řídící vstupy mění:

$$
\begin{aligned}
x_j(k+1) &= \begin{cases} x_j(k) + \frac{1}{K_j(k+1)}[\sin(\varphi_j(k) + \\ K_j(k+1)v_j(k+1)\Delta t(k+1)) - \\ \sin(\varphi_j(k))], \text{if } K_j(k+1) \neq 0; \\ x_j(k) + v_j(k+1)\cos(\varphi_j(k))\Delta t(k+1), \\ \text{if } K_j(k+1) = 0 \end{cases} \\
y_j(k+1) &= \begin{cases} y_j(k) - \frac{1}{K_j(k+1)}[\cos(\varphi_j(k) + \\ K_j(k+1)v_j(k+1)\Delta t(k+1)) - \\ \cos(\varphi_j(k))], \text{if } K_j(k+1) \neq 0; \\ y_j(k) + v_j(k+1)\sin(\varphi_j(k))\Delta t(k+1), \\ \text{if } K_j(k+1) = 0 \end{cases} \\
z_j(k+1) &= z_j(k) + w_j(k+1)\Delta t(k+1), \\
\varphi_j(k+1) &= \varphi_j(k) + K_j(k+1)v_j(k+1)\Delta t(k+1),
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

kde $x_j(k)$, $y_j(k)$, $z_j(k)$ a $\varphi_j(k)$ je konfigurace $\psi_j(k)$ v přechodovém bodě s indexem k. $v_j(k+1)$, $K_j(k+1)$ a $\omega_j(k+1)$ jsou řídící vstupy z vektoru $\overline{u}_j(k+1) = \overline{u}_j(t_k, t_{k+1} - t_k)$, které jsou použity v čase t_k po dobu $\Delta t(k+1) = t_{k+1} - t_k$.

Řídící vstupy každého následovníka i jsou limitovány jeho pohybovými omezeními a mohou se pro každého následovníka lišit. Tyto omezení lze zapsat následujícími nerovnicemi:

$$
\begin{aligned}
v_{min,i} \leq v_i(k) \leq v_{max,i}, \\
|K_i(k)| \leq K_{max,i},
\end{aligned}
\tag{2.3}
$$

pro bezpilotní helikoptéry navíc platí i

$$
\omega_{min,i} \leq \omega_i(k) \leq \omega_{max,i}. \tag{2.4}
$$

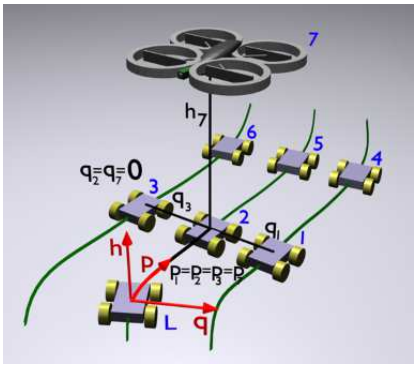
2.2 Definice formace

Pro potřeby formace jsou použity křivočaré souřadnice p, q, h. Poloha každého robota i ve formaci je určena: 1) stavem $\psi_L\left(t_{p_i(t)}\right)$ v odstupu p_i od $\psi_L(t)$ po $\overleftarrow{\psi_L}(t)$, 2) vzdáleností $q_i\left(t_{p_i(t)}\right)$ mezi $\bar{p}_L\left(t_{p_i(t)}\right)$ a $p_i(t)$ v kolmém směru na $\overleftarrow{\psi_L}(t)$ a 3) výškou h_i nad $\psi_L\left(t_{p_i(t)}\right)$. $\overleftarrow{\psi_L}(t)$ je projetá trasa virtuálním lídrem z aktuální pozice zpět do počátku a $t_{p_i(t)}$ je čas, kdy byl virtuální lídr v odstupu $p_i(t)$ za jeho aktuální pozicí.

Převedení stavu následovníků z křivočarých do kartézských souřadnic lze využít následného převodního vztahu:

$$\begin{aligned} x_i(t) &= x_L(t_{p_i}) - q_i \sin(\varphi_L(t_{p_i})), \\ y_i(t) &= y_L(t_{p_i}) + q_i \cos(\varphi_L(t_{p_i})), \\ z_i(t) &= z_L(t_{p_i}) + h_i, \\ \varphi_i(t) &= \varphi_L(t_{p_i}), \end{aligned} \tag{2.5}$$

kde $\psi_L\left(t_{p_i(t)}\right) = \left\{x_L\left(t_{p_i(t)}\right), y_L\left(t_{p_i(t)}\right), z_L\left(t_{p_i(t)}\right), \varphi_L\left(t_{p_i(t)}\right)\right\}$ je stav virtuálního leadera v čase t_{p_i}.



Obrázek 2.1: Tvar formace popsaný v křivočarých souřadnicích. Zdroj [1]

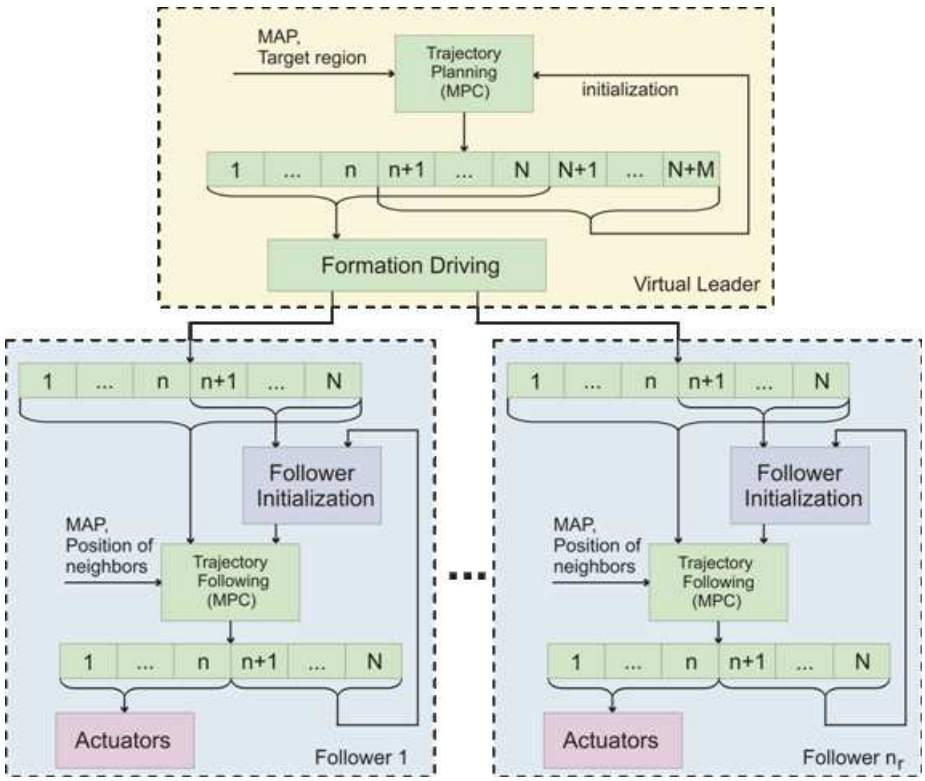
Virtuální lídr je pouze virtuální bod, tudíž nemá žádné omezení v řídících vstupech dané mechanickou stavbou. Pro plánování je však třeba počítat s pohybovými omezeními následovníků ve formaci. Vliv omezení následovníků na omezení virtuálního leadera lze určit pomocí křivočarých

souřadnic $p_i(t)$, $q_i(t)$ a $h_i(t)$ následovně:

$$\begin{aligned}
K_{max,L} &= \min_{i=1,\dots,n_r} \left(\frac{K_{max,i}}{1+q_i K_{max,i}} \right), \\
K_{min,L} &= \max_{i=1,\dots,n_r} \left(\frac{-K_{max,i}}{1-q_i K_{max,i}} \right), \\
v_{max,L}(t) &= \min_{i=1,\dots,n_r} \left(\frac{v_{max,i}}{1+q_i K_L(t)} \right), \\
v_{min,L}(t) &= \max_{i=1,\dots,n_r} \left(\frac{v_{min,i}}{1+q_i K_L(t)} \right), \\
w_{max,L} &= \min_{i=1,\dots,n_r} (w_{max,i}), \\
w_{min,L} &= \max_{i=1,\dots,n_r} (w_{min,i}).
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Toto nastavení zaručí, že každá trajektorie pro followera i přepočtená pomocí převodního vztahu (2.5) z trajektorie virtuálního leadera je proveditelná.

2.3 Plánování a stabilizace formace pomocí prediktivního řízení



Obrázek 2.2: Schéma kompletního systému plánování. Zdroj [1]

2.3.1 Vysvětlení metody

Navržený systém pro řízení formace je rozdělen do dvou částí jak je možné vidět na obrázku 2.2. Blok *Trajectory Planning* v části *Virtual Leader* slouží k nalezení proveditelné bezkolizní trajektorie pro virtuálního lídra do cílové oblasti v minimálním čase. Pro nalezení tohoto řešení je využita metoda založená na prediktivním řízení. Plánování trajektorie je rozdělené do dvou časových intervalů. První částí je *control horizon* označovaný jako T_N, který trvá v intervalu $\langle t_0, t_0 + N\Delta t\rangle$. Vzorkovací čas Δt mezi N přechodovými body je konstantní v celém intervalu. Druhou částí je *planning horizon* označený jako T_M. Tento horizont rozšiřuje standardní prediktivní řízení o časový interval $\langle t_0 + N\Delta t, t_0 + (N+M)\Delta t\rangle$ a slouží k naplánování trajektorie lídra do cílové oblasti. Časové rozdíly mezi M přechodovými body jsou rozdílné.

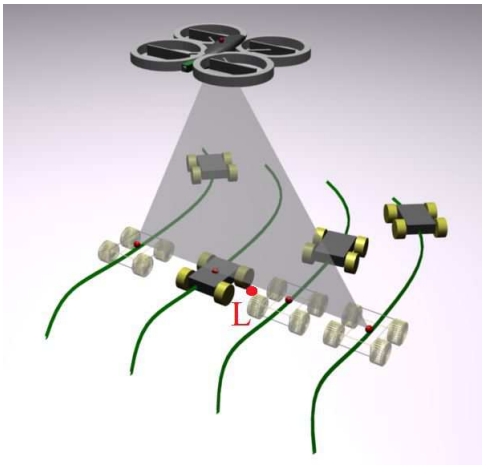
Výsledná trajektorie získaná z bloku *Trajectory Planning* je popsána sekvencí konfigurací virtuálního lídra $\psi_L(k), k \in \{1,\ldots,N+M\}$a konstantními řídícími vstupy aplikované mezi přechodovými body. Pouze část vypočítaných vstupů je ale použita pro reálné řízení a to v intervalu $\langle t_0, t_0 + n\Delta t\rangle$. V dalším plánovacím kroku se poté celý proces opakuje v časovém intervalu $\langle t_0 + n\Delta t, t_0 + n\Delta t + N\Delta t\rangle$. Pohyby po horizontu s časovým krokem $n\Delta t$ se opakují dokud virtuální lídr nedorazí cílové oblasti. Tento princip postupného aplikování části horizontu je nazýván ustupující horizont. Výsledná trajektorie je použita na vstup bloku *Formation Driving*. V tomto bloku je plán pro virtuálního lídra využit pro určení ideálních konfigurací následovníků podle vztahů (2.5) a také využit pro re-inicializaci dalšího plánovacího kroku.

V druhé části je hlavní blok *Trajectory Following*. Slouží k navržení takových akčních zásahů pro každého následovníka ve formaci, že nesmí dojít ke kolizi s překážkou nebo jiným členem formace. Plánování probíhá oproti virtuálnímu lídrovi pouze v T_N. Znovu se pro plánování využívá metoda prediktivního řízení s využitím aktuálních dat o pozicích ostatních členů formace a prostředí, která jsou sdíleny v týmu.

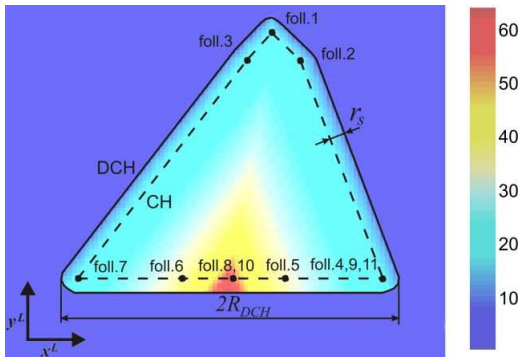
2.3.2 Konvexní obal představující tvar formace pro plánování

Pro plánování trajektorie formace ve 3D je nutností udržet přímou viditelnost mezi členy ve formaci. Ve [1] je formace pro plánování virtuálního lídra modelována konvexním obalem tvořeným z bodů reprezentující pozice následovníků. Tyto body jsou získány pomocí projekce pozic následovníků do roviny, která je kolmá na trajektorii virtuálního lídra v jeho aktuální pozici (Obrázek 2.3(a)). Pro vysvětlení jak získat tyto body, bude definován souřadnicový systém $\{x^L; y^L\}$ v rovině jak je naznačeno na obrázku 2.3(b). Projekce pozice i-tého následovníka do této roviny je získána přiřazením $x_i^L = q_i$ a $y_i^L = h_i$. Konvexní obal získaný body $\{x_i^L; y_i^L\}$, kde $i \in \{1,\ldots,n_r\}$, je dostačující reprezentace formace ve 3D.

Pokud konvexního obal zůstane volný během celého plánování tak se tím zaručí i přímá viditelnost mezi členy formace. Pro plánování s prediktivním řízením je zapotřebí rozšířit konvexní obal o oblast detekce překážek r_s, jak bude vysvětleno v následující sekci.



(a) Příklad konvexního obalu. Šedá zóna představuje projekci formace do roviny virtuálního leadera. Zdroj [1]



(b) Příklad barevné mapy funkce zajišťující bezkolizní trajektorii formace operující pod lokalizací z kamer umístěných na MAVs. Zdroj[1]

Obrázek 2.3: Konvexní obal.

2.3.3 Plánování a řízení trajektorie pro virtuálního lídra

Při plánování se řeší dva obvykle oddělené problémy: plánování trajektorie proveditelné pro formaci a dopočítání řídících zásahů, v jednom plánovacím kroku. Pro popis problému plánování trajektorie přes dva časové horizonty (*control horizon* a *planning horizon*) je vhodné sjednotit stavy pro virtuálního lídra $\psi_L(k)$, kde $k \in \{1,\ldots,N\}$, a $\psi_L(k)$, kde $k \in \{N+1,\ldots,N+M\}$ do vektorů $\Psi_{L,N} \in \mathbb{R}^{4N}$ a $\Psi_{L,M} \in \mathbb{R}^{4M}$. Podobně řídící vstupy každého horizontu mohou být sjednoceny do $\mathscr{U}_{L,N} \in \mathbb{R}^{3N}$ a $\mathscr{U}_{L,M} \in \mathbb{R}^{3M}$, jeden pro každý horizont. Naposled hodnoty $\Delta t(k)$, kde $k \in \{N+1,\ldots,N+M\}$, které bývají rozdílné v *planning horizon*, mohou být sjednoceny do vektoru $\mathscr{T}^{\Delta}_{L,M} \in \mathbb{R}$. Optimalizační vektor $\Omega_L = [\Psi_{L,N}, \mathscr{U}_{L,N}, \Psi_{L,M}, \mathscr{U}_{L,M}, \mathscr{T}^{\Delta}_{L,M}] \in \mathbb{R}^{7N+8M}$ sdružuje všechny proměnné popisující kompletní trajektorii z aktuální pozice virtuálního lídra do cílové oblasti.

Problém vyhýbání překážek a plánování trajektorie je transformován do minimalizace účelové funkce $J_L(\cdot)$ s omezeními dané rovností $h(\cdot)$ a omezení dané nerovností $g_{T_N}(\cdot), g_{T_M}(\cdot), g_{S_F}(\cdot)$:

$$\begin{aligned} \min J_L(\Omega_L), \text{s.t. } h(k) &= 0, \forall k \in \{0,\ldots,N+M-1\}, \\ g_{T_N}(k) &\leq 0, \forall k \in \{1,\ldots,N\}, \\ g_{T_M}(k) &\leq 0, \forall k \in \{N+1,\ldots,N+M\}, \\ g_{S_F}(\psi_L(N+M)) &\leq 0, \end{aligned} \tag{2.7}$$

kde funkce $J_L(\Omega_L)$ je dána rovnicí:

$$J_L(\Omega_L) = J_{L,time}(\Omega_L) + \alpha J_{L,obstacles}(\Omega_L) = \left(N\Delta t + \sum_{k=N+1}^{N+M} \Delta t(k) \right) + \\ + \alpha \sum_{l=1}^{n_o} \left(\min \left\{ 0, \frac{d_{DCH}(\Omega_L, o_l)}{d_{DCH}(\Omega_L, o_l) - R_{DCH}} \right\} \right)^2. \tag{2.8}$$

První část $J_{L,time}(\Omega_L)$ slouží k minimalizaci celkového času . Druhá část $J_{L,obstacles}(\Omega_L)$ určuje penalizaci za narušení rozšířeného konvexního obalu překážkami. Rozšířený konvexní obal representuje tvar formace. Konstanta R_{DCH} je rovná polovině maximální šířky rozšířeného konvexního obalu měřená v ose x_L. Funkce $d_{DCH}(\Omega_L, o_l)$ poskytuje nejkratší vzdálenost ve směru x_L mezi nejvzdálenější částí překážky o_l k okraji projekce rozšířeného konvexního obalu po trajektorii virtuálního leadera. Funkce $d_{DCH}(\Omega_L, o_l)$ je kladná pokud překážka zasahuje do této projekce a záporná pokud je kompletně mimo konvexní obal. Konstantou α je možné měnit vliv penalizace za narušení rozšířeného konvexního obalu na celkovou hodnotu funkce $J_L(\Omega_L)$.

Omezení dané rovností $h(k)$, $\forall k \in \{0,\ldots,N+M-1\}$, odpovídá kinematickému modelu (2.1) (s počáteční podmínkou danou aktuálním stavem virtuálního lídra). Omezení dané nerovností $g_{T_N}(k), \forall k \in \{1,\ldots,N\}$, pro *control horizon* a $g_{T_M}(k), \forall k \in \{N+1,\ldots,N+M\}$, pro *planning horizon* reprezentují omezení v dopředné rychlosti, křivosti a horizontální rychlosti virtuálního lídra (vztah (2.6)). Omezení $g_{S_F}(\psi_L(N+M))$ zajišťuje, že nalezená trajektorie vede do cílové oblasti S_F. Pro zjednodušení je uvažováno, že cílová oblast je koule s poloměrem r_{S_F} a středem v C_{S_F}. Tedy omezení je dáno rovnicí

$$g_{S_F}(\psi_L(N+M)) := \|\overline{p}_L(N+M) - C_{S_F}\| - r_{S_F}. \tag{2.9}$$

Je důležité zmínit, že uvedené omezení dané nerovností nejsou jediné, které se mohou v plánování vyskytnout. Například by tam nemělo chybět omezení nezáporného času $\Delta t_{k+1} = t_{k+1} - t_k$, kde $k \in \{N+1,\ldots,N+M\}$.

2.3.4 Plánování a řízení trajektorie následovníka

Podle konceptu lídr-následovník, je použit výsledek trajektorie virtuálního lídra jako vstup pro plánování trajektorie následovníků. Pomocí transformace popsané vzorce (2.5) jsou získány sekvence stavů $\psi_{d,i}(k) = \left(\overline{p}_{d,i}(k), \varphi_{d,i}\right)$, kde $k \in \{1,\ldots,N\}$. Tyto stavy jsou uvažovány jako požadované stavy pro plánování v úloze sledování trajektorie. Plánování pro následníka umožňuje reagovat na změny v prostředí za pozicí virtuálního lídra a neočekávané pohyby ostatních členů formace.

Podobně jako pro plánování trajektorie virtuálního lídra v sekci 2.3.3, trajektorie i-tého následovníka je popsána stavy $\psi_i(k)$ a řídící vstupy $\overline{u}_i(k)$, kde $k \in \{1,\ldots,N\}$, které mohou být sjednoceny do vektorů $\Psi_i \in \mathbb{R}^{4N}$ a $\mathscr{U}_i \in \mathbb{R}^{3N}$. Optimalizační vektor následovníka i popisující jeho plánovanou trajektorii má tvar $\Omega_i = [\Psi_i, \mathscr{U}_i] \in \mathbb{R}^{7N}$. Jak bylo zmíněno, plánování proběhne pro N kroků s konstantním časovým krokem Δt, z kterých se reálně použije pro řízení následovníka pouze prvních n řídících vstupů. V dalším plánovacím kroku se poté proces opakuje.

Problém plánování bezkolizní trajektorie pro každého následovníka je transformován do minimalizace účelové funkce $J_i(\cdot)$ s omezeními dané rovností $h_i(\cdot)$ a omezeními dané nerovností $g_i(\cdot)$:

$$\begin{aligned} &\min J_i(\Omega_i), i \in \{1,\ldots,n_r\} \\ &\text{s.t. } h_i(k) = 0, \forall k \in \{0,\ldots,N-1\}, \\ &g_i(k) \leq 0, \forall k \in \{1,\ldots,N\}, \end{aligned} \tag{2.10}$$

kde účelová funkce $J_i(\Omega_i)$ je:

$$\begin{aligned} J_i(\Omega_i) = &\sum_{k=1}^{N} \left\| (\overline{p}_{d,i}(k) - \overline{p}_i(k)) \right\|^2 \\ &+ \alpha_i \left(\min \left\{ 0, \frac{dist(\Omega_i) - r_s}{dist(\Omega_i) - r_a} \right\} \right)^2. \end{aligned} \tag{2.11}$$

První část $J_i(\Omega_i)$ zajišťuje sledování trajektorie lídra a určuje penalizaci za odchýlení naplánované pozice následovníka $p_i(j)$ od plánované pozice $\overline{p}_{d,i}(k)$, $\forall k \in \{1,\ldots,N\}$. Druhá část $J_i(\cdot)$ slouží k zachycení kolize s dynamickými nebo později detekovanými překážkami. Funkce $dist(\Omega_i)$ poskytuje minimální euklidovskou vzdálenost mezi plánovanou trajektorií následovníka a nejbližší překážkou. Omezení dané nerovností $h_i(\cdot)$ a omezení dané nerovností $g_i(\cdot)$ odpovídají omezení u plánování pro virtuálního lídra.

Kolizi s překážkou nebo jiným členem formace může každý pozemní následovník i zabránit změnou své polohy a natočení. Změna je možná za pomoci řídících vstupů (křivosti K_i a dopředné rychlosti v_i). Členové formace, kteří mají $z_i \neq 0$, mohou také upravit svojí výšku z_i změnou horizontální rychlosti ω_i.

KAPITOLA

TŘETÍ

ROZŠÍŘENÍ ALGORITMU O MOŽNOST PREDIKCE POHYBU DYNAMICKÝCH PŘEKÁŽEK

Navržená metoda řízení formace s přístupem lídr-následovník je schopná sama o sobě reagovat na nově detekované a pohybující se překážky prostřednictvím postupného aplikování části vypočítaných řídících vstupů. Tím je myšleno, že v každém plánovacím kroku dojde k naplánování trajektorie a řídících vstupů až do cílové oblasti, ale pouze prvních n vstupů je použito pro řízení pohybu formace. Po dokončení pohybu formace podle n vstupů, které byly použity pro řízení, se znovu trajektorie a řídící vstupy vypočtou v novém plánovacím kroku v závislosti na aktuální pozici. Původní[1] plánovací algoritmus předpokládá, že prostor kolizních konfigurací C_{obst} je pro plánování konstantní a tedy neuvažuje pohyb překážek.

Při plánování pohybu formace pomocí původního algoritmu může tudíž nastat situace, že navržená trajektorie povede ke střetu formace s pohybující se překážkou. Tato kolize bude zaznamenána až při narušení plánované trajektorie formace. To může vést k provedení složitých manévrů pro zabránění kolizi s překážkou. Tyto manévry mohou mít následující důsledky:

1. Prodloužení času, který je potřený k dosažení cílové oblasti formací.
2. Narušení tvaru formace, které může vést k porušení přímé viditelnosti mezi členy. To by vedlo ke ztrátě říditelnosti formace.
3. Kolize člena nebo členů formace s překážkou.

Z těchto důvodů je vhodné integrovat do algoritmu plánování informaci o odhadovaném pohybu překážek, která je hlavní částí této práce.

Předpoklad pro funkčnost integrace predikce pohybu překážek je, že pomocí senzorů je možné odhadnou jejich rychlost a křivost trajektorie pohybu. V algoritmu plánování řízení for-

[1] Původním plánovacím algoritmem je v této práci myšlen algoritmus řízení formace popsaný v [1].

mace pro MAVs a UGVs vysvětlený v sekci 2, jsou nově detekované překážky uvažovány jako pozemní roboti. To znamená, že formace se jim může vyhnou pouze ve 2 osách x a y. Tento problém hledání bezkolizní trajektorie ve dvou osách je podobný jako u algoritmu plánování řízení formace pro UGVs popsaný v [3].

V následujících odstavcích bude vysvětlena integrace predikce pohybu překážek do konceptu řízení formace MAVs a UGVs. Funkčnost tohoto navrženého řešení algoritmu bude ukázána na komparaci dvou výsledků z plánování trajektorie v sekci 4.2. Jeden výsledek byl získán z uvažování znalosti pohybu překážek a druhý bez této znalosti.

3.1 Integrace uvažované znalosti pohybu překážek do plánování trajektorie virtuálního lídra

Jak bylo popsáno v sekci 2.3.3, řešení optimální trajektorie virtuálního lídra je transformováno do minimalizace účelové funkce $J_L(\Omega_L)$ popsané vzorcem (2.8). Druhá část této funkce $J_{L,obstacles}(\Omega_L)$ určuje penalizaci za narušení rozšířeného konvexního obalu překážkami. Pro tuto práci byl výpočet $J_{L,obstacles}(\Omega_L)$ změněn na

$$J_{L,obstacles}(\Omega_L) = \alpha \sum_{l=1}^{n_o} \left(\min \left\{ 0, \frac{R_{DCH} - d_{dist}(\Omega_L, o_l)}{-d_{dist}(\Omega_L, o_l)} \right\} \right)^2, \tag{3.1}$$

kde funkce $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ udává minimální euklidovskou vzdálenost plánované trajektorie virtuálního lídra od překážky o_l a R_{DCH} se rovná polovině maximální šířky rozšířeného konvexního obalu měřené v ose x_L.

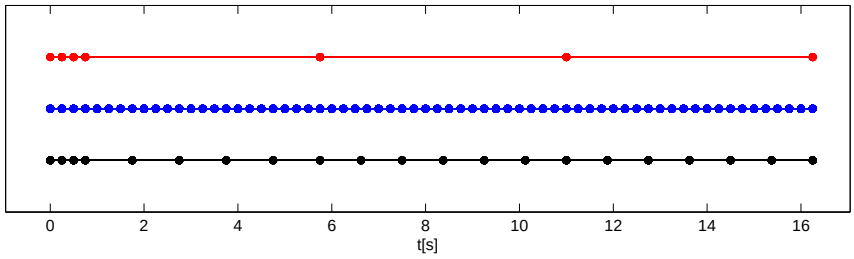
Navržená trajektorie virtuálního lídra je popsána pomocí sekvence jeho konfigurací $\psi_L(k)$, $k \in \{1,\ldots,N+M,\}$ a pomocí konstantních řídících vstupů aplikovaných mezi těmito přechodovými body. Hodnota funkce $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ je tudíž nejmenší euklidovská vzdálenost mezi kruhem, kterým je definována překážka o_l ve 2D, a trasami mezi přechodovými body, pomocí kterých je popsána trajektorie virtuálního lídra. Podle kinematického modelu (vzorec (2.2)) můžou být tyto trasy mezi přechodovými body úsečky nebo části kružnice.

Hledání optimální trajektorie virtuálního lídra probíhá pomocí lokální optimalizace v okolí inicializace. Použitím navrženého řešení $J_{L,obstacles}(\Omega_L)$ vyvstává problém, ve kterém algoritmus může uváznout a nenalézt globální minimum. Proto musí být přidáno nové omezení dané nerovností g_{r_a} pro $J_L(\Omega_L)$, které je vyjádřené následovně

$$g_{r_a} = r_a^2 - dist(\Omega_L, o_l)^2. \tag{3.2}$$

Čas (který je dán řešením) potřebný k dosažení cílové oblasti formací $[t_0, t_{end}]$ je rozdělen na $N+M$ časových úseků. Tyto úseky definují dobu trvání konstantních řídících vstupů mezi přechodovými body, které určují trajektorii virtuálního lídra. Pro integraci informace o pohybu překážky do plánování, je nutné rozdělení těchto $N+M$ časových intervalů na m úseků o maximální délce t_v, ve kterých jsou konstantní řídící vstupy. Čas t_v je nový vstupní parametr, který se nastavuje před začátkem plánování a určuje maximální dobu trvání intervalu $\langle t_n, t_n + t_v \rangle$, ve kterém je platná poloha překážky v čase t_n.

Na obrázku 3.1 je zobrazen příklad rozdělení časového intervalu, který trval 16.25 s. Tečky v grafu představují meze časových úseků intervalů. V grafu jsou zobrazeny 3 různé segmentace intervalu $[t_0, t_{end}]$. Červený interval zobrazuje rozdělení na $N+M$ časových úseků, které definují dobu trvání konstantních řídících vstupů mezi přechodovými body, které určují trajektorii virtuálního lídra. Modrý interval zobrazuje segmentaci intervalu na m časových úseků o maximální délce $t_v = 0.25\,s$ a černý interval na m časových úseků o maximální délce $t_v = 1\,s$. Při segmentaci pomocí času t_v jsou mezi intervaly zachovány konstantní řídící vstupy.

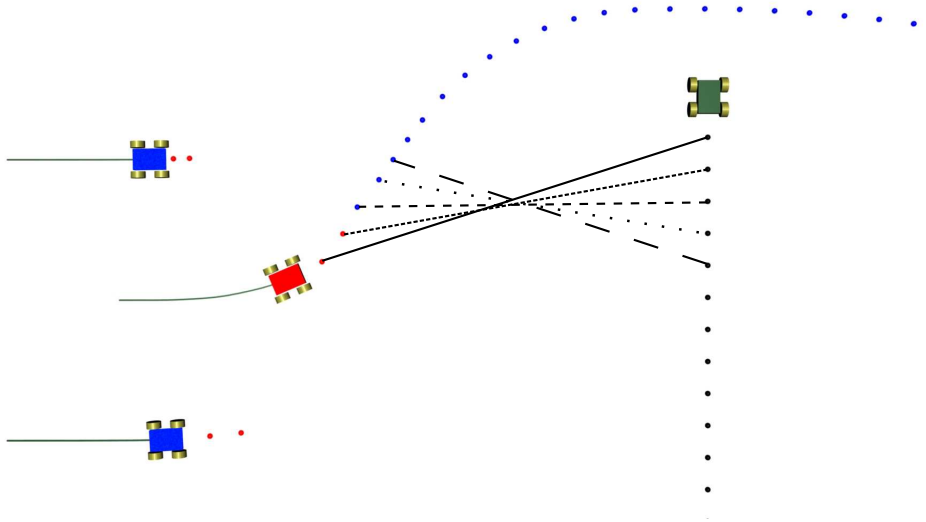


Obrázek 3.1: Rozdělený časový interval řešení z aktuální polohy do cílové pozice.

Pomocí segmentace časového intervalu na m úseků, je možné popsat plánovanou trajektorii sekvencí konfigurací virtuálního lídra $\psi_L(j)$, $j \in \{1,\ldots,m\}$, a konstantními řídícími vstupy, které jsou aplikované mezi těmito přechodovými body. Ukázka části rozdělené trajektorie na m úseků je na obrázku 3.2, kde modře zbarvené body označují přechodové body. Na tomto obrázku je také graficky ukázán výpočet $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s uvažováním znalosti pohybu překážky. Celkový postup pro výpočet $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s uvažováním znalosti pohybu překážek je popsán pomocí pseudokódu v algoritmu 1.

Řešení $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s uvažováním znalosti pohybu překážky spočívá v tom, že se vypočítají euklidovské vzdálenosti překážky od tras mezi jednotlivými přechodovými body, které určují trajektorii virtuálního lídra $\psi_L(j)$ a $\psi_L(j+1)$, $j \in \{1,\ldots,m-1\}$. Při počítání těchto jednotlivých vzdáleností je uvažována předpokládaná poloha překážky v čase t_j. t_j je čas, ve kterém se bude virtuální lídr nacházet v konfiguraci $\psi_L(j)$. Jako výsledek funkce $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ je použita nalezená nejmenší vzdálenost. Takto bude do plánování trajektorie virtuálního lídra integrována informace

o pohybu překážek.



Obrázek 3.2: Demonstrace výpočtu $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s uvažováním znalosti pohybu překážky.

Vstup: Optimalizační vektor Ω_L

Výstup: Hodnota funkce d_{dist}

$dist = []$;

$X = [x_{L,0}, y_{L,0}, \varphi_{L,0}]$; -aktuální pozice VL;

$ratio = ceil(t_{var}/t_v)$;

/* t_{var} je sdružené pole vzorkovacích časů z obou horizontů T_N a T_M */

$t_{new} = t_{var}/ratio$;

$t =$ aktuální čas;

for $i \leftarrow 1$ **to** $N+M$ **do**

  for $j \leftarrow 1$ **to** $ratio(i)$ **do**

    $obst =$ Předpokládaná pozice překážky v čase $(t+(j-1)t_{new}(i))$;

    $X_{prev} = X$;

    $X =$ Přepočet konfigurace VL $(X_{prev}, \mathscr{U}_L(i), t_{new}(i))$;

    $dist = [dist;$ Výpočet vzdálenosti $(obst, X_{prev}, X, K(i))]$;

  end

  $X = [x_L(i), y_L(i), \varphi_L(i)]$;

  $t = t + t_{var}(i)$;

end

$d_{dist} = min(dist) - r_{obst}$; -$r_{obst}$ je poloměr překážky

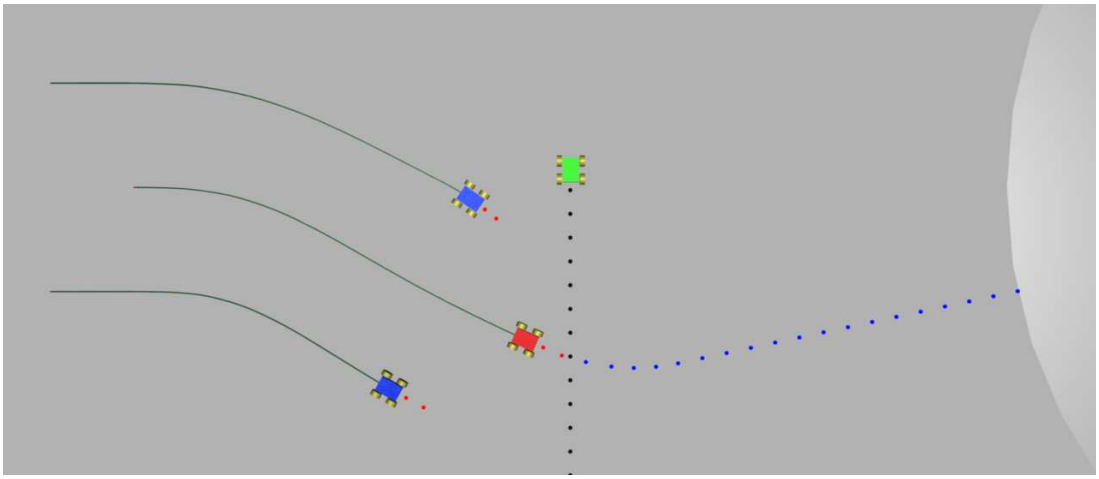
Algoritmus 1: Algoritmus výpočtu $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s informací o pohybu překážky.

Je-li nastavena velká hodnota t_v a odhadovaná rychlost překážky o_l je také velká, nemusí být kolize překážky s trajektorií virtuálního lídra v plánovacím kroku nalezena. Tato kolize může být detekována až v dalších plánovacích krocích. To způsobí, že čas potřebný k nalezení řešení v jednotlivých krocích bude delší, protože re-inicializace z předchozího kroku bude špatná. Pokud bude nastavena malá hodnota t_v, algoritmus je schopen v ideálním případě najít vhodnější řešení než při větším t_v, ale zvýší se tím náročnost výpočtu řešení.

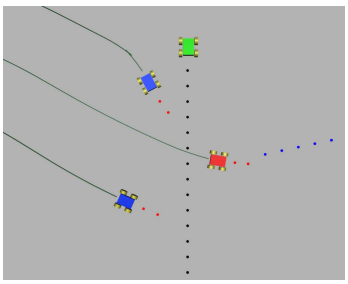
Problém výpočetní náročnosti algoritmu je možné vyřešit zjednodušením výpočtu $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ podle vzorce

$$d_{dist}(\Omega_L, o_l) = \min_{j=1,\dots,m} \sqrt{(\Omega_L(t_j) - o_l(t_j))^2}, \tag{3.3}$$

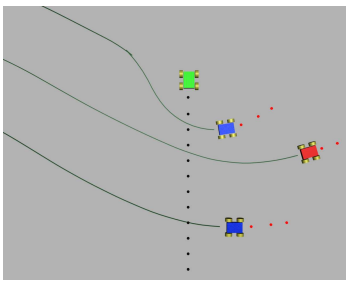
kde odmocnina slouží k výpočtu euklidovské vzdálenosti virtuálního lídra od překážky v čase t_j, ve kterém by se virtuální lídr nacházel v konfiguraci $\psi_L(j)$. Využití zjednodušeného výpočtu $d_{dist}(\Omega_L, o_l)$ s informací o pohybu překážek popsaného vzorcem (3.3) závisí na maximální rychlosti virtuálního lídra, odhadované rychlosti překážky o_l a hodnotě času t_v.



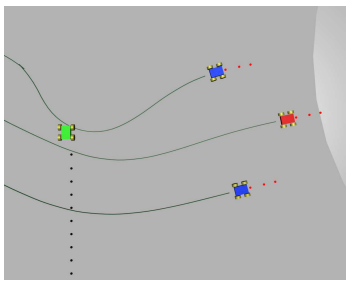
(a) $t = 4s$



(b) $t = 4.5s$



(c) $t = 6.5s$



(d) $t = 8.5s$

Obrázek 3.3: Situace, která může vyskytnout při plánování.

Reprezentace formace je zahrnuta do plánování virtuálního lídra, ale nepočítá s křivočarou

souřadnicí p členů formace. Proto plánování virtuálního lídra reaguje pouze na překážky, které by mohly tvořit kolizi s konvexním obalem na jeho plánované trajektorii. Nebere v potaz případné kolize pro členy za jeho pozicí. Zde popsaný koncept řízení heterogenní formace v dynamickém prostředí je vhodný pro formace, kde členové mají nulovou nebo malou hodnotu křivočaré souřadnice p. Ve formacích, kde následovníci mají vetší hodnotu křivočaré souřadnice p, může vést naplánovaná trajektorie k situaci, ve které dojde k narušení přímé viditelnosti mezi členy.

Na obrázku 3.3 je zobrazeno plánování formace, ve kterém měli oba krajní roboti křivočarou souřadnici $p = 1.5$. Zatímco naplánovaná trajektorie pro virtuálního lídra je bezkolizní, následovník musel provést úhybný manévr pro zabránění kolize s překážkou.

Aby byl následovník schopen provést tento bezkolizní manévr, musí i on, stejně jako virtuální lídr, počítat s dynamikou překážek. Integrace pohybu překážek do plánování trajektorie a řízení následovníka je popsána v následující sekci.

Vliv nepřesnosti odhadu trajektorie překážek na plánování byl experimentálně ověřen sérií pokusů, které jsou uvedeny v sekci 4.

3.2 Integrace uvažované znalosti pohybu překážek do plánování trajektorie následovníka

Pro určení optimální trajektorie následovníka i, $i \in \{1,\ldots,n_r\}$, se používá účelová funkce (2.11), která ohodnocuje navrženou trajektorii. V této rovnici je použita funkce $dist\,(\Omega_i)$, která udává euklidovskou vzdálenost mezi nejbližší překážkou a trajektorií následovníka. Aby se následovník mohl pohybovat v dynamickém prostředí v prostoru za lídrem bez kolize, musí být součástí funkce $dist\,(\Omega_i)$ informace o pohybu překážek. Výpočet této funkce je podobný jako výpočet funkce $d_{dist}\,(\Omega_L, o_l)$ pro plánování trajektorie virtuálního lídra uvedený v sekci 3.1.

Čas[2] následovníka je rozdělen na N úseků. Tyto úseky definují dobu trvání konstantních řídících vstupů mezi přechodovými body, které určují trajektorii následovníka. Pro integraci informace o pohybu překážky do plánování pro následovníka, je zapotřebí rozdělení těchto N časových intervalů na m úseků o maximální délce t_v. V těchto úsecích jsou řídící vstupy konstantní. Díky tomu je možné popsat plánovanou trajektorii sekvencí jeho konfigurací $\psi_i\,(j)$, $j \in \{1,\ldots,m\}$, a konstantními řídícími vstupy, které jsou aplikované mezi těmito přechodovými body. Řešení $dist\,(\Omega_i)$ s uvažováním znalosti pohybu překážek spočívá v tom, že se vypočítají euklidovské vzdálenosti všech překážek od tras mezi jednotlivými přechodovými body, které určují trajektorii následovníka $\psi_i\,(j)$ a $\psi_i\,(j+1)$, $j \in \{1,\ldots,m-1\}$. Při počítání těchto jednotlivých vzdáleností je uvažována předpo-

[2] Potřebný pro uražení naplánované cesty následovníka.

kládaná poloha překážek v čase t_j. t_j je čas, ve kterém se bude následovník nacházet v konfiguraci $\psi_i(j)$. Jako výsledek funkce $dist(\Omega_i)$ je použita nalezená nejmenší vzdálenost.

Výpočet $dist(\Omega_i)$ může být také zjednodušen podle vzorce

$$dist(\Omega_i) = \min_{l=1,\dots,n_o} \left(\min_{j=1,\dots,m} \sqrt{(\Omega_i(t_j) - o_l(t_j))^2} \right), \tag{3.4}$$

kde odmocnina slouží k výpočtu euklidovské vzdálenosti následovníka od překážky v čase t_j, ve kterém by se následovník nacházel v konfiguraci $\psi_i(j)$. Využití zjednodušeného výpočtu $dist(\Omega_i)$ popsaného vzorcem (3.4) závisí na maximální rychlosti následovníka, odhadované rychlosti překážky o_l a hodnotě času t_v.

KAPITOLA

ČTVRTÁ

SIMULACE

V této kapitole bude funkčnost algoritmu rozšířeného o bezpilotní helikoptéry a o možnost uvažovat znalost pohybu překážek verifikována pomocí výsledků simulací. Pro získání řešení optimalizačního problému plánování trajektorie virtuálního lídra a stabilizace následovníků byl využit *SQP solver* implementovaný v knihovně Matlabu pod názvem *fmincon*. Před začátkem každého plánování byla předem známa mapa prostředí, cílová oblast a požadovaný tvar formace.

4.1 Plánování složitější situace s formací pozemních robotů a bezpilotních helikoptér

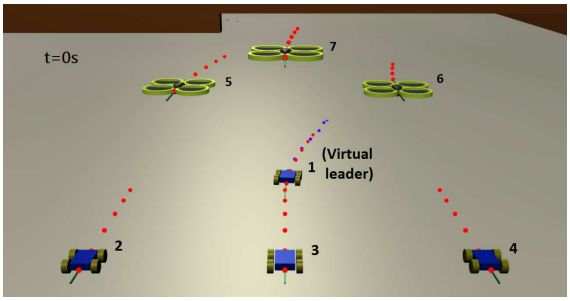
V simulaci ukázané v této sekci se formace o sedmi členech (4-UGVs a 3-MAVs) měla dostat do cílové oblasti. Parametry formace a nastavení hodnot pro plánování jsou zobrazeny v tabulce 4.1 a 4.2. V prostředí, ve kterém se formace pohybovala, se nacházely tři statické překážky a jedna dynamická, která byla detekovaná až během plánování. Na obrázku 4.3 je zobrazen průběh hodnoty účelové funkce, která je použita pro plánování trajektorie virtuálního lídra. Na obrázku 4.4 jsou zobrazeny průběhy hodnot řídících veličin virtuální lídra. Na obrázku 4.4(b), kde je zobrazen průběh dopředné rychlosti, je zvláštní změna při detekci nové překážky. *SQP solver* nalezl nejoptimálnější řešení takové, že po první časový krok t_s nastavil zápornou rychlost.

i	1	2	3	4	5	6	7
p_i	0	2	2	2	0.5	0.5	1
q_i	0	-1.5	0	1.5	-1	1	0
h_i	0	0	0	0	1	1	1.4

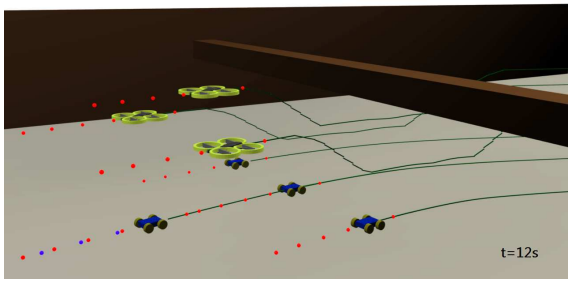
Tabulka 4.1: Parametry formace.

t_s	N	M	n	r_s	r_a	t_v	α	$K_{foll,max}$	$v_{foll,max}$	$\omega_{foll,max}$
0.5	6	6	4	0.5	0.3	0.5	1000	1	2	0.5

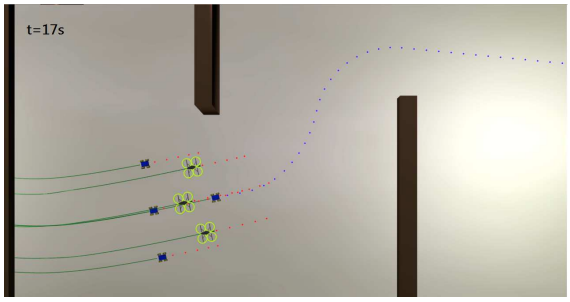
Tabulka 4.2: Nastavení hodnot plánování.

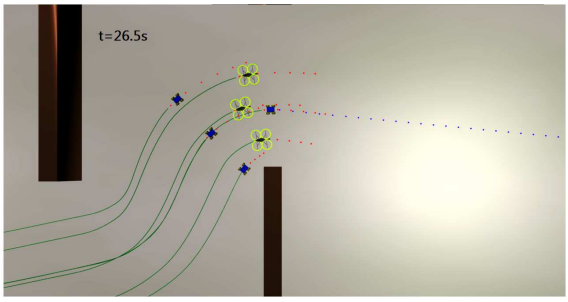


(a) Počáteční pozice formace.

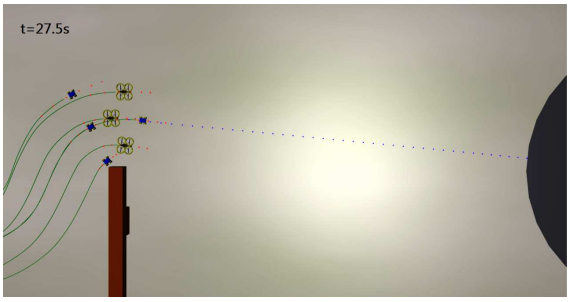


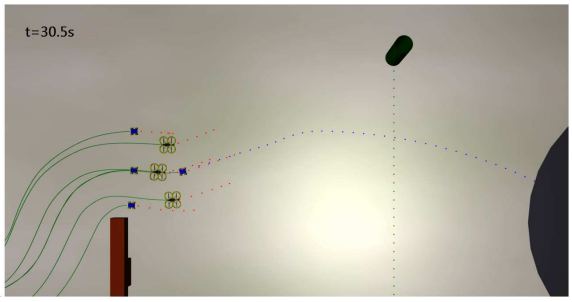
(b) Manévr formace pro vyhnutí se první překážce.



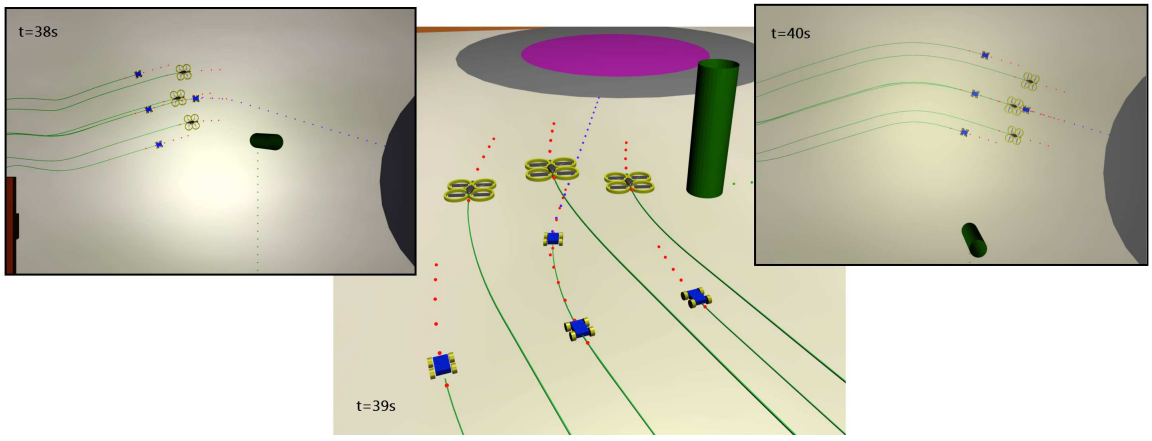


(c) Trajektorie formace pro zabránění kolize s druhou a třetí překážkou. Třetí překážka je ve vzduchu a proto se jí mohl follower nejvíce napravo přiblížit více. Zachoval přitom přímou viditelnost s členy formace a jeho vzdálenost od překážky byla větší než r_a.



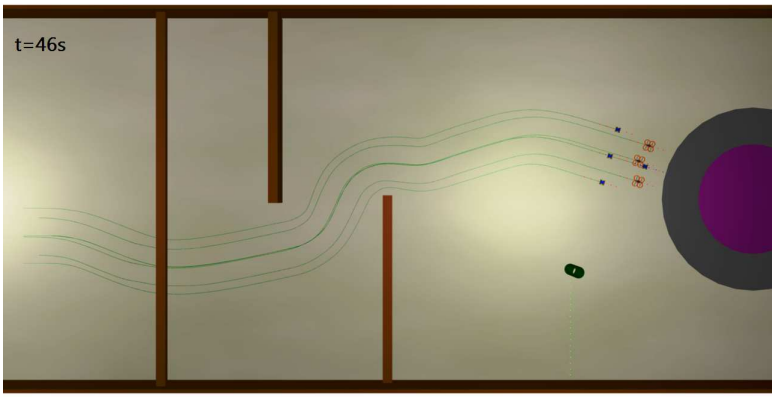


(d) Přeplánování trasy po detekci nové překážky.

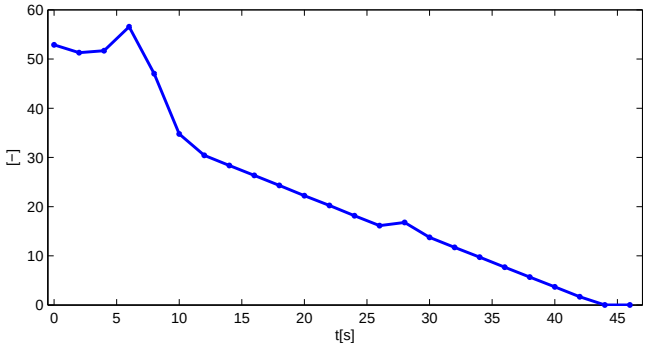


(e) Provedení naplánované trasy pro vyhnutí se dynamické překážce.

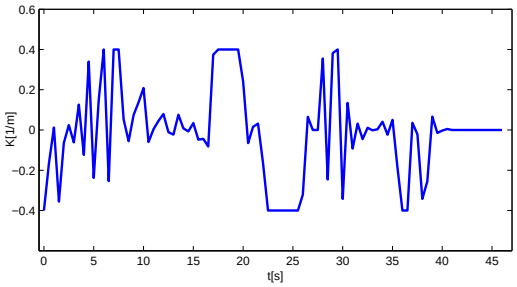
Obrázek 4.1: Obrázky ze simulace plánování pohybu formace do cílové oblasti.



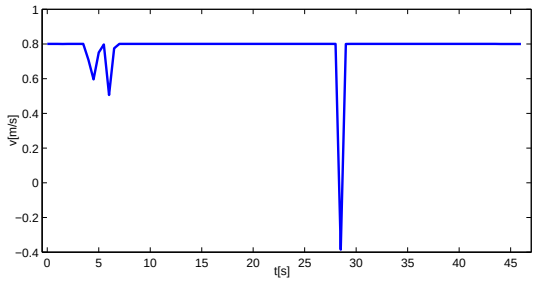
Obrázek 4.2: Trasa, kterou procestovala formace z počáteční pozice do cílové oblasti.



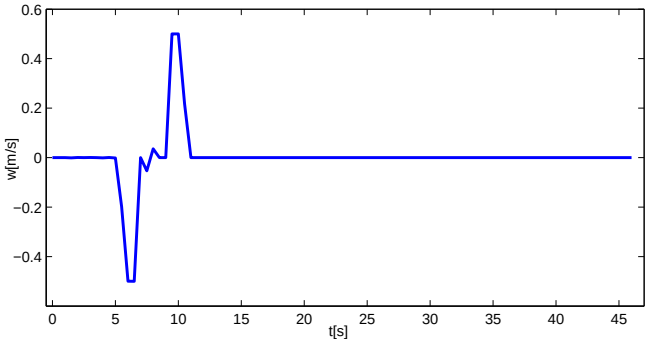
Obrázek 4.3: Průběh hodnot účelové funkce použité pro plánování trajektorie virtuálního lídra.



(a) Graf průběhu křivosti.



(b) Graf průběhu dopředné rychlosti.



(c) Graf průběhu horizontální rychlosti.

Obrázek 4.4: Průběh řídících veličin virtuálního lídra.

Počáteční pozice formace je zobrazena na obrázku 4.1(a). Obrázek 4.1(b) demonstruje schopnost plánovacího algoritmu samostatně změnit požadovaný tvar formace (pokud je to nezbytně nutné). Penalizace za narušení tvaru je vidět na nárůstu hodnoty účelové funkce, která je zobrazena na obrázku 4.3. Tento nárůst značí, že algoritmus se snažil udržet formaci v požadovaném tvaru, ale nenašel vhodnější řešení.

Algoritmus naplánoval bezkolizní trajektorii formace tak, aby byla zachována přímá viditelnost mezi členy formace. Ta byla zachována jak při narušení požadovaného tvaru formace, tak při vyhýbání se statickým a dynamickým překážkám. Narušení je zobrazené na obrázku 4.1(b). a vyhýbání se statickým překážkám na obrázcích 4.1(c) a 4.1(e). Pozemní roboti dokonce mohou podjíždět překážku a bezpilotní helikoptéry létat nad překážkou, pokud překážka během plánové trajektorie nezasahuje do konvexního obalu, který při plánování reprezentuje tvar formace a přímou viditelnost mezi členy formace.

Na obrázku 4.1(d) je zobrazeno přeplánování trajektorie virtuálního lídra při detekci nové překážky. Díky rozšíření plánování o možnost predikce pohybu překážek byla nalezena bezkolizní trajektorie pro virtuálního lídra (pohyb překážky byl znám). Pohyb po naplánované bezkolizní trajektorii po detekci nové překážky je zobrazen na obrázku 4.1(e).

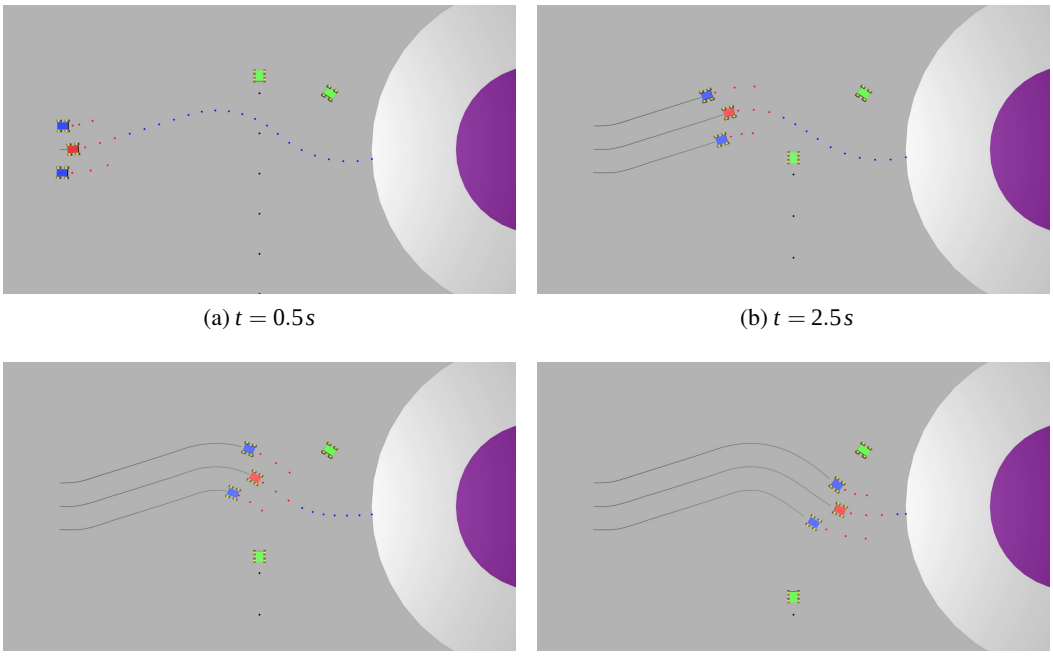
4.2 Komparace plánování trajektorie uvažující znalost pohybu překážek a plánování trajektorie bez této znalosti

V tomto experimentu jsou porovnány řešení, které byly získány plánováním trajektorie uvažující znalost pohybu překážek a a plánování bez této znalosti. Formace složená ze tří členů (3-UGVs) se měla dostat do cílové oblasti. Parametry formace a nastavení hodnot pro plánování jsou zobrazeny v tabulce 4.3. Obě porovnávané plánování měly stejné výchozí podmínky (počáteční pozice, rozestavení překážek, cílová oblast atd.).

t_s	N	M	n	r_s	r_a	t_v	α	$K_{foll,max}$	$v_{foll,max}$
0.25	3	3	2	0.5	0.3	0.4	1000	1	2

i	1	2	3
p_i	0	0.5	0.5
q_i	0	-0.5	0.5
h_i	0	0	0

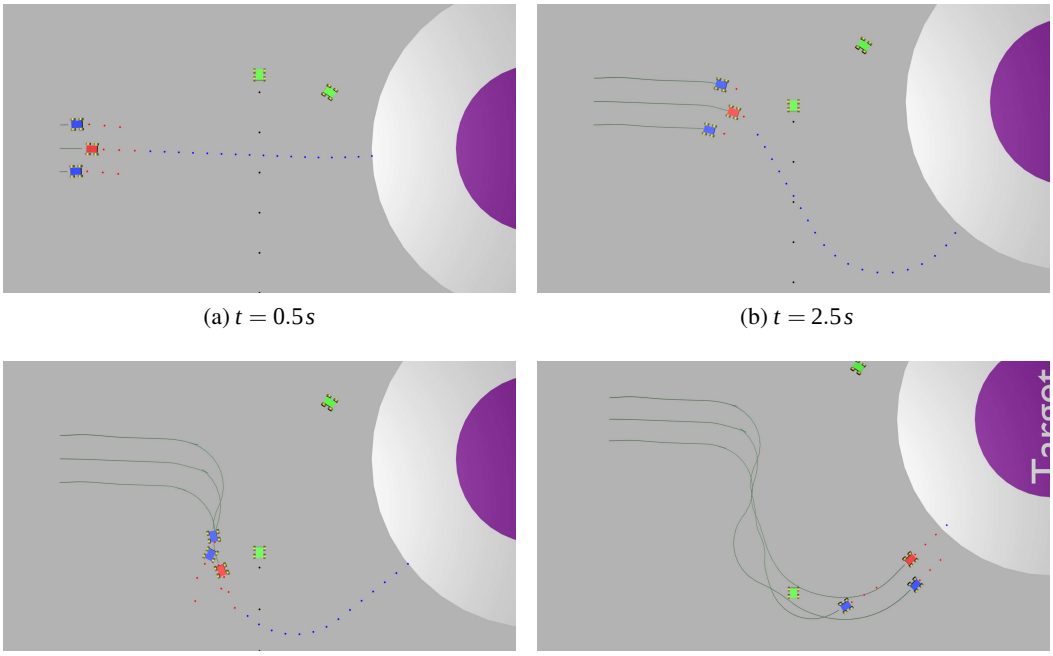
Tabulka 4.3: Nastavení hodnot plánování a formace.



(a) $t = 0.5s$ (b) $t = 2.5s$

(c) $t = 3.5s$ (d) $t = 4.5s$

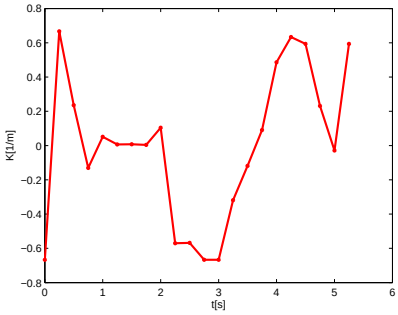
Obrázek 4.5: Plánování trajektorie uvažující znalost pohybu překážek.



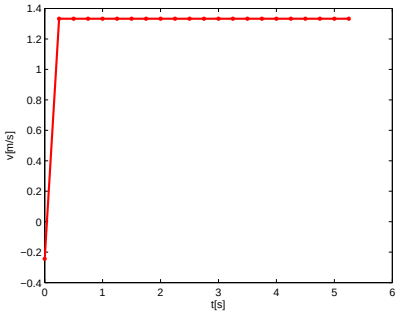
(a) $t = 0.5s$ (b) $t = 2.5s$

(c) $t = 4.5s$ (d) $t = 8s$

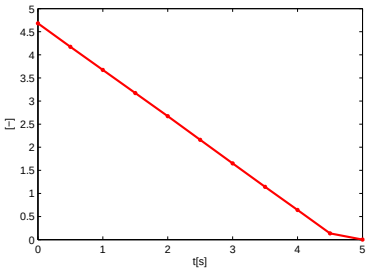
Obrázek 4.6: Plánování trajektorie bez znalosti o pohybu překážek.



(a) Průběh křivost trajektorie virtuálního lídra.

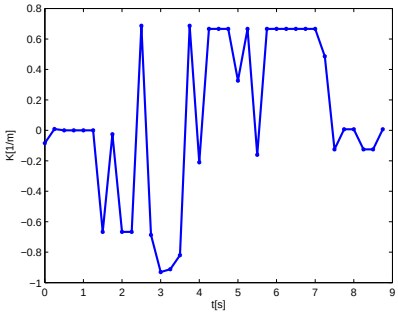


(b) Průběh dopředné rychlosti virtuálního lídra.

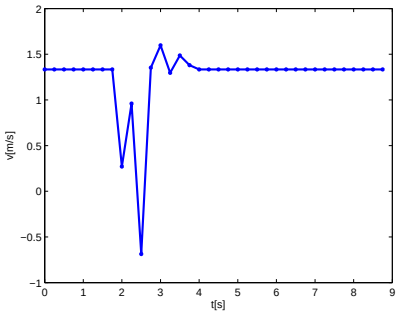


(c) Průběh hodnot účelové funkce použité pro plánování trajektorie virtuálního lídra.

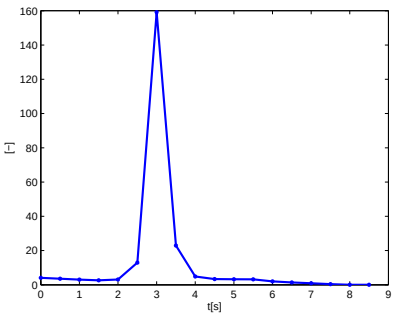
Obrázek 4.7: Průběhy hodnot při plánování trajektorie, kdy byla uvažována znalost pohybu.



(a) Průběh křivost trajektorie virtuálního lídra.



(b) Průběh dopředné rychlosti virtuálního lídra.

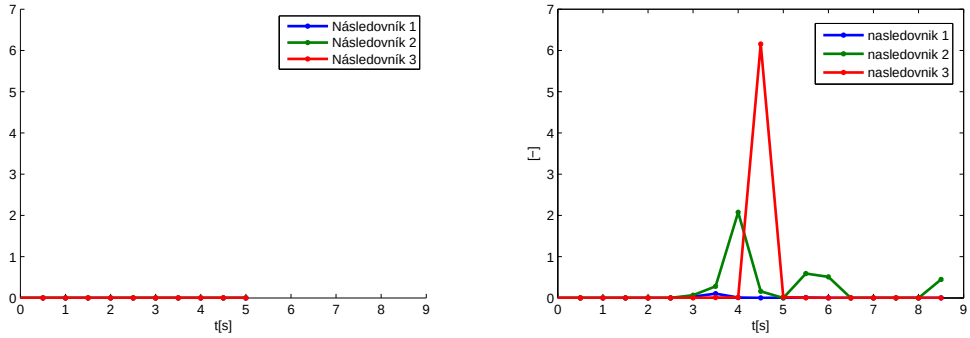


(c) Průběh hodnot účelové funkce použité pro plánování trajektorie virtuálního lídra.

Obrázek 4.8: Průběhy hodnot při plánování trajektorie bez znalosti o pohybu překážek.

Na obrázcích 4.5 a 4.6 jsou zobrazeny trajektorie formace. Robot na pozici virtuálního lídra má červené zbarvení a ostatní členové formace modré. Překážky jsou označeny zeleně. Jedna z překážek se pohybuje v prostoru s nulovou křivostí a konstantní rychlostí. Druhá překážka je statická. Trasa naplánované trajektorie formace je označena modrými body. Tyto body jsou dány plánovanou pozicí virtuálního lídra až do cílové oblasti s časovým krokem $0.25s$.

Průběhy hodnot účelových funkcí, které byly použity pro plánování následovníků jsou zobrazené na obrázku 4.9. Při plánování trajektorie, kde byla uvažována znalost pohybu překážek, nebyli následovníci nuceni provést úhybné manévry pro zabránění kolize s překážkou nebo jiným členem formace. Při plánování trajektorie bez této znalosti však musely být provedeny úhybné manévry, aby se zabránilo kolizi s překážkou nebo jiným členem formace. Nárůst hodnot účelové funkce jednotlivých následovníků značí, že byly provedeny tyto manévry.



(a) Plánování trajektorie uvažující znalost pohybu překážek.

(b) Plánování trajektorie bez znalosti pohybu překážek.

Obrázek 4.9: Průběhy hodnot účelové funkce použité pro plánování následovníků.

Na obrázku 4.7 jsou zobrazeny průběhy řídících vstupů (mimo horizontální rychlosti, protože ve formaci jsou pouze UGV) a průběh účelové funkce virtuálního lídra pro plánování trajektorie, kde byla uvažována znalost pohybu překážky. Při plánování byla známa přesná hodnota rychlosti a tedy i přesná poloha překážky. Díky plánování s přesným pohybem překážky, se nejvhodnější trajektorie naplánovala již v prvním plánovacím kroku. V dalších krocích se naplánovaná trajektorie nemění. Porovnáním s obrázkem 4.8, kde jsou vidět průběhy z plánování bez uvažování znalosti pohybu překážek, je možné říci, že plánování trajektorie, kde je uvažována znalost pohybu překážek, nalezlo v této situaci lepší řešení než plánování bez této znalosti. Lepší řešení je uvažováno vzhledem k času potřebnému na dosažení cíle formací a také vzhledem k udržení tvaru formace.

4.3 Vlastnosti plánování trajektorie s predikcí pohybu překážek v závislosti na jejich odhadovaném pohybu

4.3.1 Vliv nepřesnosti odhadu trajektorie pohybu překážky

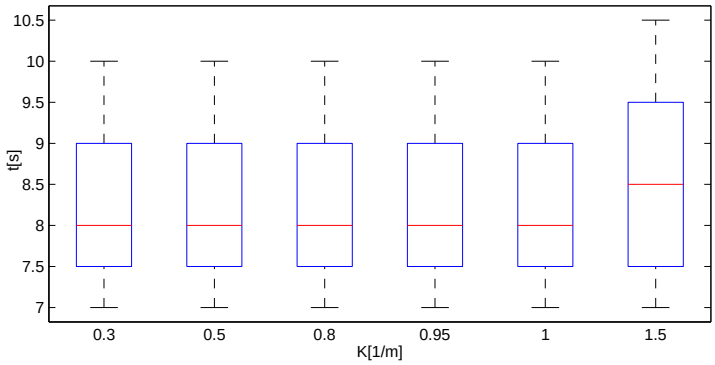
V robotice lze rychlost pohybující se překážky odhadnout přesně, ale je těžké určit trajektorii jejího pohybu. Tento experiment spočíval ve zjištění vlivu nepřesnosti odhadu trajektorie překážky na plánování pohybu formace s možností predikovat pohyb překážek použité v této práci.

Formace tvořená třemi členy (3-UGVs) se měla dostat do cílové oblasti. Nastavení hodnot plánování a parametrů formace je zobrazeno v tabulce 4.4.

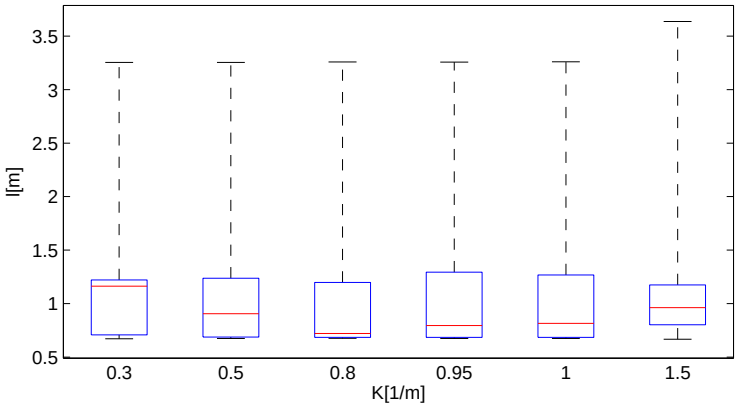
t_s	N	M	n	r_s	r_a	t_v	α	$K_{foll,max}$	$v_{foll,max}$
0.25	3	3	2	0.5	0.3	0.4	1	1	2

i	1	2	3
p_i	0	0.5	0.5
q_i	0	-0.5	0.5
h_i	0	0	0

Tabulka 4.4: Nastavení hodnot formace a parametrů plánování.



(a) Čas potřebný k doražení do cílové oblasti formací.



(b) Minimální vzdálenost překážky od virtuálního lídra.

Obrázek 4.10: Výsledky experimentu.

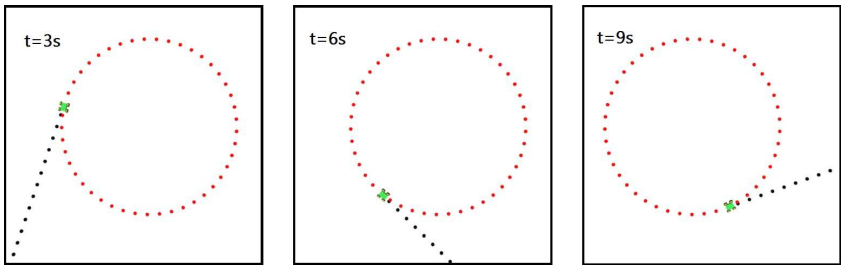
Bylo vygenerováno 100 náhodných počátečních pozic formace v plánovacím prostoru s jednou překážkou s poloměrem $r = 0.3\,m$, která se pohybovala s konstantní křivostí trajektorie pohybu $K = 1\,m^{-1}$ a konstantní rychlostí $v = 0.46\,m/s$. Pro každou startovací pozici proběhly plánování, u kterých byly uvažovány křivosti trajektorie pohybu překážky $K = [1.5, 1, 0.95, 0.8, 0.5, 0.3]\ m^{-1}$.

Měřené hodnoty byly: čas potřebný k dosažení cílové oblasti formací a minimální vzdálenost překážky od virtuálního lídra během plánování. Výsledky jsou zpracovány ve formě horizontálního grafu rozptylů, kde červená úsečka v obdélníku představuje medián a hrany obdélníku kvantil 25% a 75%. Horní úsečka v grafu zobrazuje maximum a spodní minimum. Obdélník představuje oblast, kde se vyskytuje 50% hodnot.

Z výsledků experimentu zobrazených na obrázku 4.10 lze říci, že pokud je v prostoru překážka, která se pohybuje po kružnici s malým poloměrem, tak ačkoli je křivost trajektorie pohybu překážky nepřesná, plánování splňuje svůj účel a nevede ke kolizní trajektorii, nebo ke složitým manévrům formace.

4.3.2 Simulace pro 3 druhy odhadovaného pohybu překážky

Cílem experimentu bylo zjistit vliv odhadu pohybu překážky na plánování pohybu formace. Byly uvažovány tři situace, které mohou nastat při odhadu pohybu překážky. Pro první situaci byla uvažována úplná znalost pohybu překážky (rychlost a křivost trajektorie jsou přesně změřené). Bylo tedy možné predikovat přesnou polohu překážky v čase. Pro druhou situaci byl uvažován případ, ve kterém byla známa pouze rychlost překážky. Trajektorie překážky byla neznámá a tedy křivost trajektorie pohybu byla uvažována za nulovou. Algoritmus tedy předpokládal, že překážka se bude pohybovat po přímce odhadovanou rychlostí. Směr trajektorie byl dán aktuálním natočením překážky v plánovacím kroku. V poslední situaci byl uvažován případ, ve kterém pomocí senzorů nelze odhadnout pohyb překážky. Algoritmus tudíž neuvažoval pohyb překážky (rychlost překážky je nulová). Na obrázku 4.11 jsou zobrazeny příklady trajektorií pohybů překážky, které jsou uvažovány v tomto experimentu. Červeně tečky vyznačují předpokládanou trajektorii pohybu překážky pro první situaci (pohyb překážky byl přesně změřen). Černé tečky vyznačují uvažovanou trajektorii pohybu překážky pro druhou situaci (byla uvažována nulová křivost trajektorie pohybu překážky).

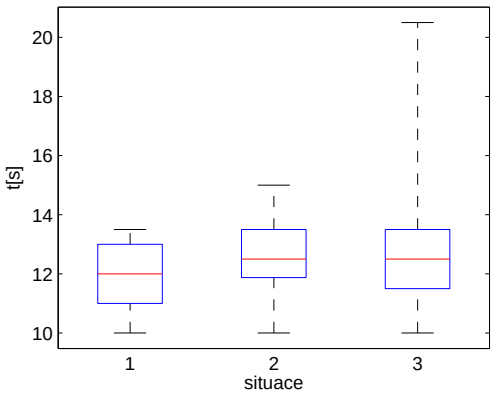


Obrázek 4.11: Předpokládaný pohyb překážky u prvních dvou uvažovaných situací.

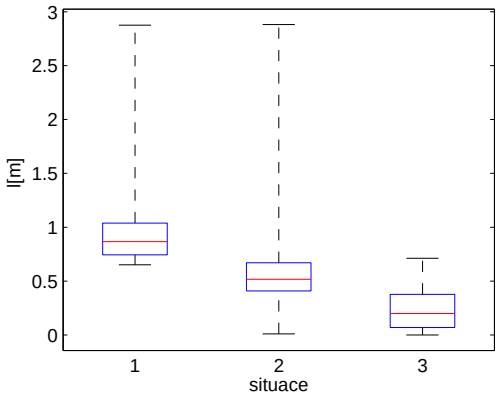
Podobně jako v předchozím experimentu se formace tvořená třemi členy (3-UGVs) měla dostat do cílové oblasti. Nastavení hodnot plánování a parametry formace jsou zobrazené v tabulce 4.4.

Bylo vygenerováno 300 náhodných počátečních pozic formace v plánovacím prostoru s jednou překážkou s poloměrem $r = 0.3m$, která se pohybovala s konstantní křivostí trajektorie $K = 0.4m^{-1}$ a konstantní rychlostí $v = 1.4m/s$. Počáteční pozice byly použity pro tři běhy simulace. Každý jednotlivý běh algoritmu představoval jednu ze situací, které jsou vysvětlené výše.

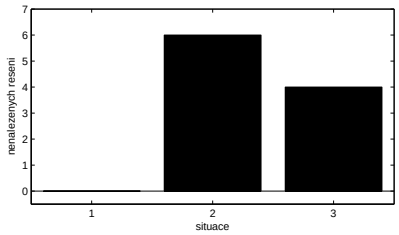
Měřily se hodnoty času, potřebného k dosažení cílové oblasti formací a dále se měřila minimální vzdálenost překážky od virtuálního lídra během plánování. Pro každé plánování byl nastaven časový limit, do kterého se formace musí dostat do cílové oblasti. Při nedosažení cílové oblasti formací v tomto časovém limitu bylo plánování ukončeno a uvažováno za nesplněné. Výsledky jsou zpracované ve formě horizontálního grafu rozptylů.



(a) Čas potřebný k dosažení cílové oblasti formací.



(b) Minimální vzdálenost překážky od virtuálního lídra.



(c) Nesplněné řešení z důvodu časového limitu.

Obrázek 4.12: Výsledky experimentu.

Z grafů uvedených na obrázku 4.12 lze říci, že nejlepší řešení udává plánování, ve kterém je znám přesný pohyb překážky. Plánování je nejvhodnější, protože formace průměrně dorazí do cíle dříve a udržuje větší vzdálenost virtuálního lídra od překážek, než je tomu v ostatních uvažovaných situacích. Navíc řešení bylo nalezeno vždy v daném časovém rozmezí. Plánování s alespoň odhado-

vanou rychlostí překážky bez znalosti její trajektorie pohybu udává podle dat z tohoto experimentu lepší řešení než plánování bez znalosti pohybu překážky. Vyvstaly však situace, ve kterých naplánovaná trajektorie nebyla nalezena v časovém limitu víckrát než u plánování bez znalosti pohybu překážek. Důvodem nenalezení řešení v tomto časovém limitu bylo, že při druhé a třetí uvažované situaci docházelo k plánování se špatnou predikcí polohy překážky.

KAPITOLA

PÁTÁ

EXPERIMENT S REÁLNÝMI ROBOTY

Plánovací algoritmus pohybu formace má schopnost samostatně změnit požadovaný tvar formace (pokud je to nezbytně nutné). Ve spolupráci s Katedrou kybernetiky byl realizován experiment s reálnými roboty, ve kterém je demonstrována tato schopnost plánovacího algoritmu změnit požadovaný tvar formace. Z experimentu bylo vytvořeno video, které je přiloženo v příloze na CD, popř. je možné ho shlédnout na internetové adrese[1]. V této kapitole bude experiment přiblížen pomocí fotografií.

Trasa formace (tvořena 1-UGV a 2-MAVs) do cílové oblasti byla naplánována předem. Nastavení hodnot plánování a parametrů formace je zobrazeno v tabulce 5.1. Naplánované trajektorie jednotlivých členů formace byly při realizaci s reálnými roboty linearizovány. Dále byl zvětšen časový interval mezi jednotlivými přechodovými body, které určují trajektorii členů, kvůli zpomalení na bezpečnou rychlost pro experiment. Určení polohy každé helikoptéry bylo realizováno pomocí přepočtů polohy na vzdálenosti od terčíku, který byl přidělán na pozemním robotu.

t_s	N	M	n	r_s	r_a	t_v	α=α_i	$K_{foll,max}$	$v_{foll,max}$	$\omega_{foll,max}$
0.25	6	6	2	0.5	0.3	0.4	1	1	2	1

i	1	2	3
p_i	0	0	0
q_i	2	-2	0
h_i	1	1	0

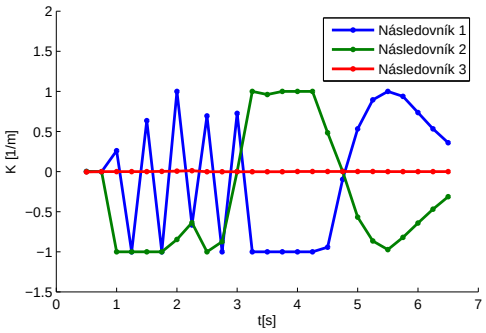
Tabulka 5.1: Nastavení hodnot formace a plánování.

Průběhy řídících veličin členů formace vypočítaných plánováním jsou zobrazeny na obrázku 5.1. Naplánovaný průběh dopředné rychlosti a křivosti nejsou pro následovníky jedna a dva plynulé. Tito následovníci se museli odchýlit od požadovaných pozic vypočítaných z plánované trajektorie virtuálního lídra kvůli zabránění kolizi s překážkou. Algoritmus plánování trajektorie těchto následovníků reagoval změnou jejich polohy při manévru až při větším odchýlení od plánované tra-

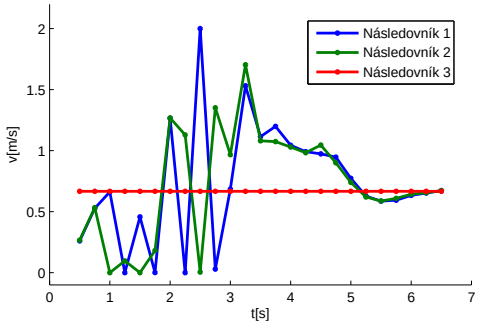
[1] Internetový odkaz na video z experimentu. `http://www.youtube.com/watch?v=Xo2Q_WgXl0A&feature=share`

jektorie. Při návratu z manévru na požadované pozice začal být průběh plynulý. Nastavením jiných hodnot pro plánování pohybu formace, by bylo možné dosáhnout plynulejšího průběhu pohybu členů formace[2].

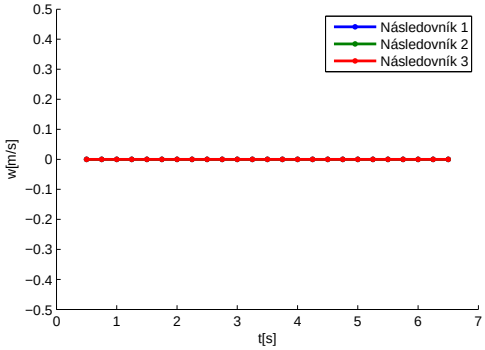
Naplánovaná trajektorie formace je zobrazena na obrázku 5.2 a snímky z realizovaní této trajektorie jsou na obrázku 5.3.



(a) Průběh křivostí trajektorie členů formace.

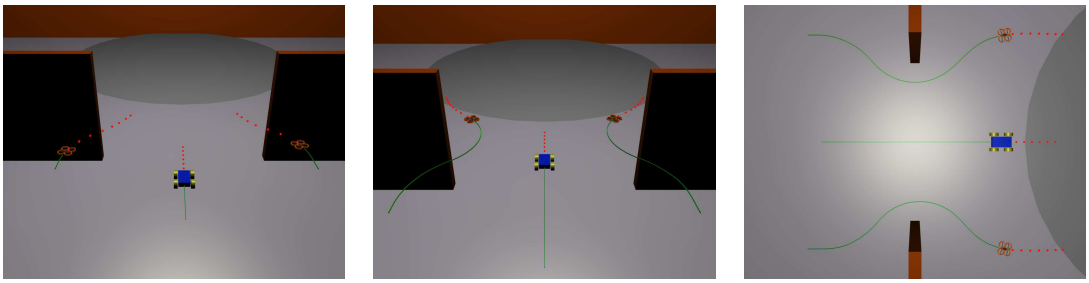


(b) Průběh dopředných rychlostí členů formace.



(c) Průběh horizontálních rychlostí členů formace.

Obrázek 5.1: Průběhy naplánovaných řídících vstupů pro členy formace.



Obrázek 5.2: Naplánovaná trajektorie formace.

[2]Jak je možné vidět na grafu průběhu rychlosti, pohyb nebyl plynulý. Je možné, že jinak nastavené hodnoty plánování by změnily tento průběh pohybu.

Obrázek 5.3: Snímky formace při realizování naplánované trajektorie.

KAPITOLA

ŠESTÁ

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo rozšíření plánování řízení formace pozemních robotů o bezpilotní helikoptéry a o integraci možnosti predikce pohybu dynamických překážek do konceptu řízení. Pro řízení formace byl využit přístup lídr-následovník díky kterému byla kompletní trajektorie do cílové oblasti počítána jen pro virtuálního lídra. Trajektorie virtuálního lídra byla poté přepočítána na trasy jednotlivých následovníků. Pro optimalizaci trajektorie virtuálního lídra a stabilizaci následovníků byla využita metoda vycházející z prediktivního řízení.

Na začátku práce bylo popsáno implementované rozšíření algoritmu o bezpilotní helikoptéry. Byly zde předloženy informace nezbytné pro vysvětlení metody plánování heterogenní formace. Dále byl čtenář seznámen s problémem plánování pohybu formace v prostoru s dynamickými překážkami. Bylo předloženo jak řešení tohoto problému tak i jeho integrace do plánování. Následně byly uvedeny výsledky z experimentů navržených metod.

Simulacemi byla ověřena schopnost algoritmu naplánovat takovou trasu formace, kterou se úspěšně vyhne všem překážkám, jak statickým tak dynamickým. Algoritmus se při plánování snažil udržet požadovaný tvar formace a přímou viditelnost mezi členy, která je podstatná pro využití vizuální relativní lokalizace členů.

Sérií simulací byla také ověřena funkčnost rozšířeného plánování řízení formace s využitím uvažované znalosti pohybu překážek. Byl uveden experiment, kterým bylo dokázáno, že implementované plánování s úplnou znalostí pohybu překážek je nejlepší pro dosažení cílové oblasti formací v nejkratším čase. Při plánování byla dodržena také požadovaná minimální vzdálenost překážek od virtuálního lídra. Tím bylo zaručeno, že při plánování v dynamickém prostředí se dokáže zachovat přímá viditelnost mezi členy. V následujícím experimentu bylo také zjištěno, že plánování alespoň s odhadovanou rychlostí pohybu překážky bez znalosti její trajektorie pohybu umožní nalézt lepší řešení než plánování bez uvažování pohybu překážky.

V robotice lze rychlost pohybující se překážky odhadnout přesně, ale je těžké určit trajektorii jejího pohybu pomocí senzorů. Proto v dalším experimentu s plánováním, které je rozšířeno o možnost uvažovat predikci pohybu překážek, byla ověřena schopnost naplánovat bezkolizní trajektorii i při nepřesném odhadu trajektorie překážek. Posledním experimentem bylo ukázáno možné využití navrženého algoritmu v praxi.

LITERATURA

[1] M. Saska, V. Vonasek, T. Krajnik, and L. Preucil. Coordination and navigation of heterogeneous UAVs-UGVs teams localized by a hawk-eye approach. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2166–2171, 2012.

[2] M.S.M. Hashim, Tien-Fu Lu, and H.H. Basri. Dynamic obstacle avoidance approach for car-like robots in dynamic environments. In *2012 IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE)*, pages 130–135, 2012.

[3] M. Saska, J. S. Mejia, D. M. Stipanovic, and K. Schilling. Control and navigation of formations of car-like robots on a receding horizon. In *Proc of 3rd IEEE Multi-conference on Systems and Control*, 2009.

[4] M. Saska, J. S. Mejia, D. M. Stipanovic, V. Vonasek, K. Schilling, and L. Preucil. Control and navigation in manoeuvres of formations of unmanned mobile vehicles. *European Journal of Control*, 19:157–171, 2013.

[5] M. Saska, V. Vonasek, and T. Krajnik. Airport snow shoveling. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2531–2532, 2010.