

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení a staveb



Bakalářská práce

Technická implementace chování roje

Matěj Kohútek

©2021 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Kohútek

Zemědělské inženýrství

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Technická implementace chování roje

Název anglicky

Technical implementation of swarm behavior

Cíle práce

Cílem práce bude specifikovat technické a logistické požadavky pro skupinovou práci autonomních zařízení (dronů). Popsány budou jak technologické předpoklady (šířka pásma, přenosová rychlost), tak i informační analýza (struktura a velikost dat, jejich vazba). V závěrečné části bude navržený model demonstrován na softwarové platformě dle výběru.

Metodika

1. Cíl práce
2. Metodika
3. Autonomní mobilní prostředek (definice, pojmy, řídicí signály)
4. Možnosti umělé inteligence pro řízení prostředku (skupiny prostředků)
5. Návrh logistického modelu řídicí platformy
6. Předpoklad technického řešení
7. Návrh řídicího modelu
8. Vytvoření softwarového modulu
9. Zhodnocení a závěr

Doporučený rozsah práce

30 až 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

umělá inteligence, modelování, bezpečnost, dron

Doporučené zdroje informací

- GOSMAN, S. *Umělá inteligence a expertní systémy*. Praha: Kancelářské stroje, 1990. ISBN 80-7018-004-8.
- HOROVÁ, I. *3D modelování a vizualizace v AutoCADu pro verze 2009, 2008 a 2007*. Brno: Computer Press, 2008. ISBN 978-80-251-2194-8.
- J. Kocourek a J. Řešátko: *Drony – druhé vydání*, ISBN: 9788073462284, 2019,
- KULAGIN, B. *3 ds Max 8 : průvodce modelováním a animací..*
Manfred Flohr: *Inteligence roje*, CHIP 03/2007
- MAŘÍK, V. – ŠTĚPÁNKOVÁ, O. – LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence. (5)*. Praha: Academia, 2007. ISBN 978-80-200-1470-2.
- MAŘÍK, V. – ŠTĚPÁNKOVÁ, O. – LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence. (6) Vladimír Mařík, Olga Štěpánková, Jiří Lažanský a kolektiv*. Praha: Academia: Praha: Academia, 2013. ISBN 978-80-200-2276-9.
- MERUNKA, V. *Datové modelování*. Praha: Alfa Publishing, 2006. ISBN 80-86851-54-0.
- POKORNÝ, M. *Umělá inteligence v modelování a řízení*. Praha: BEN – technická literatura, 1996. ISBN 80-901984-4-9.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

doc. Ing. Jan Malaták, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 02. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Technická implementace chování roje vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne

.....
Matěj Kohútek

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Zdeňku Votrubovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, podporu a zejména za proaktivní přístup při vedení této práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině za veškerou jejich podporu. A v neposlední řadě spolužákům za to, že to nevzdali a dotáhli to se mnou až sem.

Technická implementace chování roje

Abstrakt: Cílem práce je shrnout všechny základní informace potřebné k pochopení a k vytvoření jednoduchého roje dronů. Toho je dosaženo tak, že se nejdříve představí definice rojového chování a jeho implementace v přírodě. Dále je popsán způsob ovládání, komunikace a hardware používaný v roji dronů. V navazující části je za účelem prohloubení předaných teoretických znalostí představen problém, který je vyřešen pomocí algoritmu použitelného jako řídicí jednotka dronu. Platnost algoritmu je poté otestována v simulaci. Na konci je sestaven hardwarový model, který může sloužit jako opěrný bod při sestavování vlastního roje dronů.

Klíčová slova: emergentní chování, rojová inteligence, rojová robotika, dron

Technical implementation of swarm behavior

Abstract: The aim of this bachelor thesis is to summarise all the basic information necessary to understand and to be able to create a simple drone swarm. At first by introducing the definition of swarm behaviour and its implementation in nature. Then by describing the control, communication, and hardware of drone swarms. In the next section of the bachelor thesis a real-world problem is used to test and strengthen the understanding of the theoretical information. The problem is solved by an algorithm usable as the drone control unit. Then the validity of the algorithm is tested in a simulation. And at the end, suitable hardware is proposed to serve as a starting point for assembling a real drone swarm.

Keywords: emergent behaviour, swarm intelligence, swarm robotics, drone

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika	2
3	Rojová inteligence	3
3.1	Definice roje	3
3.2	Velikost roje	3
3.3	Rojové chování v přírodě	4
3.3.1	<i>Hejno ptáků a ryb</i>	5
3.3.2	<i>Mravenčí kolonie</i>	5
3.4	Rojová robotika	7
4	Emergentní chování	8
5	Ovládání roje dronů	9
5.1	Řetěz řízení	9
5.2	Řízení pomocí umělé inteligence	10
5.3	Vývoj a projekce.....	11
6	Bezdrátová komunikace	12
6.1	Parametry bezdrátové komunikace.....	12
6.2	MANET – Mobilní ad hoc síť	14
6.2.1	<i>Způsob fungování</i>	14
6.2.2	<i>Kategorie</i>	15
6.2.3	<i>Zabezpečení</i>	15
6.2.4	<i>Kategorie routovacích protokolů</i>	16
6.2.5	<i>Ad hoc síť v rojové robotice</i>	17
6.3	Infračervená komunikace	17
6.4	Bluetooth komunikace	17
6.5	Wi-Fi komunikace	18
6.6	ZigBee komunikace	18
7	Struktura komunikace	19
8	Elektronické komponenty dronů	21
8.1	Baterie.....	21
8.2	Senzory	22
8.2.1	<i>Gyroskop</i>	22

8.2.2	Akcelerometr.....	22
8.2.3	GPS.....	23
8.2.4	Magnetometr.....	23
8.2.5	Určení výšky	24
8.2.6	Inerciální měřicí jednotka (IMU)	24
8.2.7	Detekce překážek	24
8.3	Motor	25
8.4	ESC.....	26
8.5	Ovladač řízení.....	26
8.6	Kamera.....	26
9	Způsoby určování relativní polohy jedinců	27
10	Legislativa v ČR.....	29
10.1	Kategorie bezpilotních letadel	29
10.2	Nástroje na kontrolu vzdušného prostoru	30
11	Praktická část.....	31
12	Návrh algoritmu	32
13	Simulace.....	34
13.1	Parametry simulace.....	35
13.2	Vyhodnocení výsledků	35
13.3	Limitace a nedostatky simulovaného prostředí	36
14	Návrh dronu.....	37
14.1	Způsob řízení	37
14.2	Komunikace.....	37
14.3	Výběr komponent	38
15	Závěr.....	40
16	Seznam použitých zdrojů.....	41
	Seznam příloh.....	48

Seznam obrázků

Obrázek 1 Rojové chování v přírodě. Zleva včely [6], husy [7], mravenci na vodě [8]	4
Obrázek 2 Pravidla hejna ptáků, (a) separace (b) směřování (c) koheze. [65].....	5
Obrázek 3 Řetěz řízení; vlastní dle [24].....	9
Obrázek 4 Rozdělení druhů umělé inteligence; vlastní dle [24]	10
Obrázek 5 Klasifikace MANET útoků [38]	15
Obrázek 6 MANET routovací protokoly; vlastní dle [39]	16
Obrázek 7 Vizualizace triangulace [55]	28
Obrázek 8 Podkategorie "otevřené" kategorie provozu [57].....	29
Obrázek 9 Webová stránka AisView [61].....	30
Obrázek 10 Webová stránka DronView [60]	30
Obrázek 11 První krok algoritmu – formování; a – koheze; b – separace	32
Obrázek 12 Krok sběr a vyhodnocení dat	33
Obrázek 13 Zjednodušený vývojový diagram průběhu simulace	34
Obrázek 14 Grafické zobrazení průměrné naměřené chyby v simulaci.....	36

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry bezdrátových komunikací	13
Tabulka 2 Příklad struktury sdílených dat.....	20
Tabulka 3 Orientační hodnoty spotřeby vybraných elektronických zařízení [47]	21
Tabulka 4 Informační paket pro roj.....	37
Tabulka 5 Paket základní stanici	38
Tabulka 6 Komponenty a jejich sledované parametry	38

Seznam zkratek

AC	Alternating Current
AI	Artificial Intelligence
ALFUS	Autonomy Levels for Unmanned Systems
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
AOMDV	Ad hoc on-demand multipath distance vector
AV	Autonomous Vehicle
BLE	Bluetooth Low Energy
DC	Direct Current
DPRAODV	Detection, Prevention and Reactive AODV
ESC	Electronic Speed Controller
FPV	First Person View
GPS	Global Positioning System
IDSAODV	Intrusion Detection System AODV
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMU	Inertial Measurement Unit
InVANET	Intelligent Vehicle Ad hoc NETWORK
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IR	Infra-Red
IrDA	Infrared Data Association
LADAR	Laser Detection And Ranging
LIDAR	Light Detection And Ranging
MANET	Mobile Ad hoc NETWORK
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
RADAR	RADIO Detection And Ranging
RF	Radio Frequency
RREP	Route Reply
RSSI	Received Signal Strength Indicator

SAE	Society of Automotive Engineers
SANET	Static Ad hoc NETWORK
SAR	Segmentation and Reassembly
SiMEMS	Silicon-Microelectro-mechanical Systems
TCP	Transmission Control Protocol
TTL	Time To Live
UAS	Unmanned aircraft systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UI	User Interface
UID	Unique ID
ÚCL	Ústav pro civilní letectví
VANET	Vehicle Ad hoc NETWORK
Wi-Fi	Wireless Fidelity
Wi-Le	Wi-Fi Low Energy
ZHLS	Zone-Based Hierarchical Link-State Routing
ZPR	Zone Probabilistic Routing

1 Úvod

Úspěšný systém řízení ve většině odvětví vyžaduje vlastnosti, jako je stabilita, škálovatelnost a schopnost se samo-opravovat. Vlastnosti, obtížně dosažitelné, musejí být aplikovány již od samého začátku návrhu struktury každého uskupení, skládajícího se z více vzájemně propojených částí. Zajímavé je, že jednotlivé části, které zvenku vypadají jako definitivní, jsou dále pouze dalšími uskupeními.

Příkladem může být státní uskupení. Skládající se z jednotlivých orgánů (kraje, soudy, ministerstva, ...), kde každý orgán je samostatný, ale zároveň se navzájem ovlivňují. Uskupení funguje správně do té doby, dokud jsou jednotlivé orgány agilní, dokážou efektivně komunikovat a navzájem se hlídat. Pokud se objeví problém, který dokáže proniknout do více orgánů, není se pak uskupení schopno samo opravit a je nutná intervence zvenčí.

Plošné pátrání, mapování prostorů, vojenské akce, zábavní představení, a nejen na to se využívají skupiny dronů – bezpilotních letadel. Tak jako státní uskupení, musí i systém, kterým se skupina dronů řídí být stabilní, škálovatelný a schopný se dynamicky přizpůsobovat variabilnímu prostředí.

Při návrhu řídicího modelu skupiny dronů se často vychází z fenoménu hejna ptáku, ryb a také roje včel a mravenců. Nezávisle na sobě si jsou schopni samostatně určovat profese (mravenci), schraňovat efektivně jídlo (včely), pohybovat se ve skupině bez kolizí, a hlavně bez jednoho jedince určujícího směr pohybu (ptáci a ryby).

S rozvojem IoT (Internet věcí) a Průmyslu 4.0 se využívá stále více autonomních vozidel pozemních i vzdušných. Zefektivňují se díky nim procesy na všech úrovních. Vývoj těchto zařízení je drahý a zdoluhavý, ale následné zvýšení efektivity je znatelné. Odchýlení od lidské pracovní síly k automatizaci a užití UAV (bepilotní letadlo) lze již nyní pozorovat u monotónních prací, člověk je v těchto případech velice náchylný k chybám. Dále u profesí, při kterých je vysoké nebezpečí zranění, jako jsou záchranáři, hasiči, nebo vojáci.

Protože jsou prvky rojového chování nadějným směrem pro zefektivnění systémů, rozhodl jsem se o tomto tématu napsat bakalářskou práci. Věřím, že díky tomu, lépe proniknu do světa efektivních autonomních systémů. A že pomůžu přiblížit problematiku rojové robotiky těm, kteří nevědí kde začít.

2 Cíl práce a metodika

Cíl práce

Cílem práce je provést analýzu problematiky rojové robotiky, specifikovat její technické a logistické požadavky, popsat technologické předpoklady a provést informační audit. V praktické části je cílem sestavit model roje, demonstrovat vybrané aspekty rojového chování a pro daný model navrhnout ideální hardwarovou sestavu. Mezi dílčí cíle práce patří popis přírodních principů, na kterých je rojová robotika postavena a také uvedení způsobů aplikace umělé inteligence v procesu řízení.

Metodika

V první části práce, založené především na literární rešerši, se práce zabývá definováním základních konceptů rojové robotiky a specifikací technických a logistických požadavků. Definované závěry z této kapitoly jsou demonstrovány pomocí vybraných příkladů zejména proto, aby byla zřetelně koncipována rojová robotika především z pohledu diferenciací automatů s dopředným naprogramováním – neinteragujících robotů. Na základě těchto příkladů byl navržen a sestaven řídicí algoritmus schopný plnit zadaný úkol. Navržený algoritmus je pomocí naprogramovaného simulačního prostředí otestován a odladěn. Výstupem z uvedeného modelu je optimalizační mechanismus definující změnu chybovosti chování roje v závislosti na velikosti tohoto roje (zmenšení o jednu pětinu).

V závěru této práce byl navržen hardwarový model z běžně dostupných modulů, tak aby byl schopen plnit zadaný úkol. Detailní hardwarový popis však není součástí této práce.

3 Rojová inteligence

Rojová inteligence je obor, zabývající se přírodními a umělými systémy, které jsou tvořeny mnoha jedinci, kteří se koordinují použitím decentralizovaného řízení a sebeorganizace [1]. Zabývá se kolektivním chováním, které je tvořeno z lokálních interakcí jedinců mezi sebou a se svým okolím.

Vlastnosti systému rojové inteligence jsou:

- Roj je sestaven z mnoha jedinců
- Jedinci jsou relativně homogenní (buď jsou identičtí, nebo patří k několika topologiím)
- Interakce mezi jednotlivci jsou založeny na jednoduchých pravidlech chování, které využívají pouze lokální informace, které může jedinec předat přímo nebo pomocí prostředí (stigmergie)
- Celkové chování systému vyplývá z interakcí jedinců mezi sebou a prostředím, tím se systém samo-organizuje

3.1 Definice roje

Předtím než se může člověk podrobněji zabývat problematikou rojové inteligence, měl by si odpovědět na otázku „*Co je to roj?*“ [2], [3]. Je zajímavé, že termín roj, jako takový zatím nebyl definován. Odborné texty a naučná literatura se definici termínu roj vyhýbá. Při hledání definice roje často narážíme na definici rojové inteligence, což ale není to samé. Prozatím, než se vymyslí obstojná definice, můžeme usoudit, že **roj je definován jeho chováním**.

3.2 Velikost roje

Problémem minimální a maximální velikosti roje se zabýval italský profesor G. Beni, který v roce 2005 popsal definici velikosti roje tak, že definoval, jak velký roj NENÍ [3]. Beni určil, že počet jedinců v roji, by neměl být tak veliký, aby se řešil statistickými průměry a ani tak malý, aby se nezpracovával jako *problém pár těl*. Z toho lze získat definici, že velikost roje N je $10^2 < N < 10^{23}$. Což se může interpretovat jako:

- a. Maximální počet jedinců by neměl být „Avogadro-large“ (česky *Avogadro-veliký*), kde Avogadrova konstanta je $N_A \approx 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ [4]. To proto, že Avogadro-large systémy jako plyny, tekutiny, anebo pevné látky jsou většinou zpracovávány statisticky.

- b. Dolní ohraničení je natolik vysoké, aby se problematika systému řízení nezpracovávala jako *problém pár těl* (viz kniha z roku 1976 „Few Body Dynamics“ [5]). Příkladem může být jeden jedinec. Zde chybí všechny zajímavé vlastnosti, využívané v rojovém chování, jako komunikace a kolaborace.

Problém velikosti roje souvisí se sorites paradoxem (sorites z řeckého soros, znamená halda). Je to otázka, ptající se, kolik zrn musí obsahovat halda, aby to byla halda. Mohli bychom minimální velikost určit prahovou hodnotou např. 10 000 zrn. To by ale znamenalo že 9 999 zrn již není halda. Východisko tohoto dilematu je stejné jako tomu bylo výše při definici roje, i zde použijeme definici přítomností rojového chování:

Velikost roje není určena počtem jedinců, nýbrž přítomností rojového chování.

3.3 Rojové chování v přírodě

Díky jednoduchým pravidlům, můžeme rojové chování v přírodě pozorovat u hub, buněk a živočichů [1]. Pozorování a definování pravidel chování, podle kterých interagují mezi sebou a s prostředím jednotlivci v přírodě, nám pomáhá stanovit základy, na kterých vytváříme umělé decentralizované systémy.

Z živočišné říše se nejčastěji jako příklady uvádí (viz *Obrázek 1*):

- Hejna ptáků a ryb
- Stáda pozemních živočichů
- Mravenčí kolonie
- Kolonie termitů



Obrázek 1 Rojové chování v přírodě. Zleva včely [6], husy [7], mravenci na vodě [8]

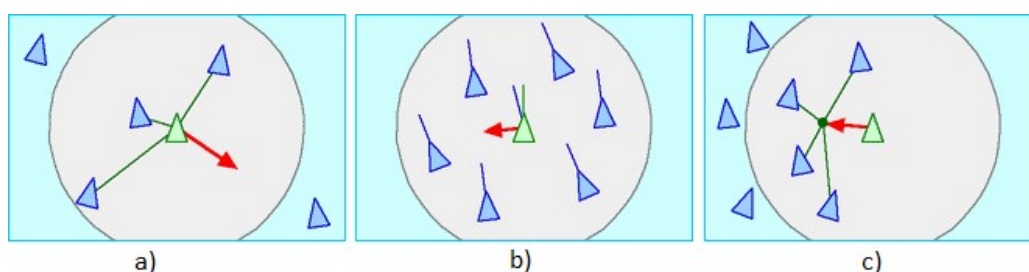
Hojení živočichů se také řídí rojovým chováním [9]. Když se člověk zraní¹, začne z něj vytékat krev. Bez mechanismu, který by krvácení zastavil by člověk nepřežil. Zde nastupují na pomoc buňky v krvi, které dokážou detekovat změnu v prostředí (otevřená rána). Při detekci rány se nafouknou a přichytí se k okraji. Do prostředí vyšlou signál, že je rána uzavřená a na řadu přicházejí jiné buňky, které tento další signál detekují, přichytí se na uzavřenou ránu a začne proces hojení.

¹ Proces hojení je zde za účelem demonstrace rojového chování markantně zjednodušen.

3.3.1 Hejno ptáků a ryb

Při sestavování základních pravidel pro veliký počet jedinců, například dronů, létajících v malých vzdálenostech od sebe, přichází inspirace právě od hejna ptáků či ryb [10]. Při pohledu na hejno letících ptáků je možné pozorovat formaci ve tvaru V. A z toho se často mylně vyvozuje, že pták letící jako první je velitel. Tato hejna nemají žádného velitele, který by udával směr, nebo rychlost. Všechny tyto parametry jsou ovlivňovány chováním celého hejna. Jejich chování je sestaveno pomocí tří základních pravidel – **separace**, **směrování** a **koheze**, kterými se každý řídí každý jedinec, viz *Obrázek 2*.

Pro demonstraci těchto pravidel, vytvořil Craig W. Reynolds simulaci „Boids“, ve které je pták znázorněn objektem jménem boid (anglicky přibližně „jako pták“). Aplikováním základních pravidel tvoří skupiny boidů hejna, napodobující chování hejn ptáků v přírodě.



Obrázek 2 Pravidla hejna ptáků, (a) separace (b) směrování (c) koheze. [65]

Při výpočtech vektorů se počítá pouze s boidy v zorném poli a do určité vzdálenosti, která může být pro každý výpočet jiná (například separace mívá nižší maximální vzdálenost než soudržnost) [11].

1. **Separace** vytváří vektor směřující nejvíce ode všech ostatních.
2. **Směrování** ovlivňuje směr pohybu. Směr každého jedince je ovlivňován sklonem ostatních. Tím pomáhá hejnu udržovat přibližně stejný směr.
3. **Koheze** drží jedince pohromadě. V simulovaném prostředí se toto pravidlo aplikuje jako síla působící do průměrné polohy všech jedinců v zorném poli

3.3.2 Mravenčí kolonie

Mravenci jsou jako malí quasi-homogenní roboti, tvořící propojené kolonie obsahující v rekordních případech miliardy pracovníků [12]. Při tak velkých počtech pracovníků není možné řídit kolonie centralizovaně, je třeba upustit od hierarchického modelu řízení, a delegovat rozhodovací činnost na každého jedince v kolonii.

Mravenec je při svém rozhodování ovlivňován prostředím, ve kterém je [13], [14], [15]. Jedny z faktorů prostředí, ovlivňujících rozhodování mravence jsou vlhkost, teplota a tlak. Naopak, mravenec je také schopný zpětně toto prostředí různými způsoby ovlivňovat. K tomu

převážně používá zvuky a feromony, které za různých okolností vypouští. Využívá těkavosti vypuštěných feromonů, jejichž intenzita se bez obnovování (vysvětleno níže) s časem snižuje, až se postupně vytratí úplně. Mravenci jsou schopni vycítit tyto feromony pomocí tykadel.

Za pomoci feromonů jsou schopni efektivního sběru jídla nebo, náboru na pracovní pozice při nedostatku pracovníků určité profese [16]. Některé druhy mravenců jsou monogynní (tzn. mají pouze jednu královnu). Také se může v mraveništi objevit královen více. Jeden ze způsobů, jakým mravenci vyberou, kterou královnu nechají naživu, je intenzita feromonu plodnosti. Ta je ovlivněna množstvím mladých, které vyprodukovala. S vyšší produkcí stoupá královně šance, že si mravenci vyberou právě jí, a nechají ji naživu.

Na příkladech popsaných níže můžeme pozorovat, že pro správné fungování rojové inteligence není potřeba, aby byli všichni členové roje identičtí tělesně, nebo ve stylu rozhodování. Je ale důležité, aby se navzájem doplňovali a aby byla celková skupina co nejméně závislá na jednotlivcích a určitých skupinách.

Postup při sběru jídla

Sběr jídla je činnost zahrnující různé profese mravenců, kteří spolupracují, aby našli jídlo, donesli ho zpět do mraveniště a chránili se přitom před predátory. Rozdělení profesí je ovlivněno proporčními rozdíly těl mravenců [13]. Menší mravenec hledá zdroje potravy, zatímco větší mravenec nosí nalezené jídlo zpět.

Krok 1: Mravenci, kteří hledají potravu, za sebou zanechávají cestu z feromonů. Když potravu najdou, vrátí se po vlastní cestě zpět, a přitom na cestu přidávají další feromony. Když potravu nenajdou, po cestě zpět nepřidávají feromony na cestu žádné.

Kroj 2: Mravenci nosiči se potulují okolo mraveniště. Dokud nenarazí na dostatečně silnou stopu z feromonů, po které by se vydali. Pokud na konci cesty najdou jídlo, kus odnesou a po cestě zpět přidávají na cestu další feromony. Tím přilákají více mravenců nosičů. Po vyčerpání zdroje jídla se cesta z feromonů začne vytrácet, protože ji vracející se mravenci přestanou udržovat, až se nakonec vypaří.

Decentralizované rozdělování rolí

Za normálního chodu mraveniště musejí mravenci udělat mnoho různorodé práce [14], [15]. Sběr jídla, ochrana kolonie před predátory, údržba kolonie, pečování o mladé a také o královnu atp. V každém momentu je k dispozici pouze určitý počet mravenců na každé pozici. Pokud se stane, že při nějaké činnosti chybí pracovní síla, mravenci to vycítí a naverbují další mravence na svou pozici. Například neaktivního mravence na nosiče. Je důležité poznamenat, že po naverbování na pozici mravenec na té pozici zůstane.

3.4 Rojová robotika

Je studie toho, jak velká skupina *relativně jednoduchých*, fyzicky ztělesněných agentů může být navržena, tak aby požadované chování vycházelo z lokálních interakcí mezi agenty a prostředím [3]. Termínem „relativně jednoduchých“ agentů se myslí neschopný, nebo neefektivní v porovnání s uvažovaným úkolem.

Vlastnosti rojové inteligence stanovují potřebu agentů na přímou anebo nepřímou komunikaci. Tudiž fakt, že by agenti měli být schopni vnímat prostředí, vyžaduje, aby byli roboti opatřeni lokálními senzory (viz kapitola 8.2 *Senzory*) a prostředky pro komunikaci (viz kapitola 6 *Bezdrátová komunikace*). Komunikace je důležitým prvkem, umožňujícím robotům kooperovat a kolaborovat.

Názory na to, jaké jsou vlastnosti rojové robotiky se s časem mění. Této skutečnosti napomáhá neustále se vyvíjející hardware (procesní výkon, a kapacita baterií). Proto není překvapivé, že před osmdesáti lety se v oboru rojové robotiky přiklánělo k minimalistickému přístupu, který byl inspirován chováním přírody. Tento přístup byl populární z důvodu nedostatku výpočetního výkonu.

Jak bylo řečeno v kapitole 3.3 *Rojové chování v přírodě*, decentralizované řízení čili paradigma kontroly zakazující řízení jedinců jinými jedinci, se promítá i do rojové robotiky. Při pohledu na systém rojové robotiky nenajdeme implicitní synchronizaci jednotnými hodinami. Pokud je potřeba synchronizace za účelem provedení úkolu, musí se roj explicitně synchronizovat – roj se synchronizuje pouze za účelem a po dobu provádění úkolu.

Při návrhu škálovatelného systému se preferuje použití quasi-identických členů, jejichž výhodou je levnější hromadná výroba díky úsporám z rozsahu. Avšak použití několika málo variací s modifikovanými parametry je někdy také žádoucí.

Nově se rojová robotika rozděluje na podskupiny:

- Škálovatelná rojová robotika
 - Není minimalistická a není přímo inspirovaná přírodou
- Praktická minimalistická robotika
 - Není přímo inspirovaná přírodou
- Inspirovaná přírodou minimalistická robotika
 - Což se může označovat za originál

Výhody rojové robotiky [17]:

- Robustní, chybám odolný systém, čehož je docíleno obrovskou redundancí
- Roj je quasi-homogenní, takže každý robot může být nahrazen jiným. Kritériem je určitá velikost roje a hustota jedinců v oblasti

4 Emergentní chování

Koncept emergentního chování **vychází z příčiny a následku** [18]. Příčinou se rozumí interakce, které způsobují emergentní chování. Následkem se rozumí emergentní chování způsobené interakcemi. Příčina a následek se řadí do nižší, resp. vyšší vrstvy. Rozdělení jednotlivých vrstev záleží na specifických případech. Rozlišujícími faktory mohou být agregace, měřítko, čas, organizace, funkce atp. Často se stává, že pozorovatel si je vědom pouze jedné z vrstev – pozorujeme určité vzory chování, ale nedokážeme určit příčinu tohoto chování, nebo naopak. Příkladem může být město, les nebo vědomí.

Autonomii těchto dvou vrstev lze vysvětlit dvěma způsoby. První z nich vysvětluje fenomén autonomie pomocí statistiky [19]. Když se několik mikro stavů navzájem ovlivňuje, vytváří dohromady makro stav, který je od mikro stavů autonomní. To znamená, že se změny mikro stavů viditelně neprojevují na makro stavu, a to i když jsou při bližším zkoumání pozorovány veliké změny mikro stavů. Tudíž platí autonomie jednotlivých vrstev. Druhý je argument nelinearity, ten říká, že změny nižší vrstvy jsou nelineárně škálovány do vrstvy vrchní [18]. Veliká změna v nižší vrstvě vyvolá malou až žádnou změnu ve vyšší vrstvě, kdežto malá změna může vyvolat změnu obrovskou. Toto oddělení příčiny a následku je interpretováno jako autonomie. Kvůli tomuto fenoménu autonomie je složité předpovídat emergenci bez hlubokého pochopení všech příčin.

Poté co Craig Reynolds publikoval svou studii o boids se mnoho vědců z této simulace snažilo vyčíst důvod emergence [20]. S přednastavenými pravidly lze vidět emergenci, nicméně nelze takto vysvětlit její důvod či výhodnost [21]. Proto se místo přednastavených pravidel začaly zkoumat skupiny jedinců fungujících s mozkem tvořeným umělou inteligencí, učící se pomocí genetických algoritmů [22], [23]. Z těchto pokusů se vypožovalo, že emergence rojové inteligence přináší skupině výhody nad jedinci, kteří nespolupracují při hledání jídla, ochraně, či stavění obydlí.

Znalost principu fungování emergentního chování umožňuje vytvořit efektivní systém roje dronů, který se řídí nepřímě. Tím se myslí, že není nutné ovládat pohyb jednotlivých dronů, ale drony jako jednotlivci provádějí komplexní úkoly pomocí aplikace jednoduchých pravidel. Výhodou je decentralizace výpočetního výkonu a nezávislost na jednotlivci. Při vytváření pravidel se doporučuje rozložit cílené chování do co nezákladnějších konceptů. Jednodušší pravidla jsou jednodušší na testování a diagnostiku. Více jednoduchých pravidel dohromady vytváří pochopitelnější výkonný systém.

5 Ovládání roje dronů

Ve vozidlech řízených člověkem je ovládání pod plnou kontrolou člověka, který ho ovládá buď přímo, nebo pomocí dálkového ovládání [24]. V AV (Autonomní Vozidlo) tuto činnost zajišťují aktuátory, pomocí zpracovaných dat ze senzorů (např. kamera, lidar, GPS, senzor rychlosti větru) [25]. Proces, který určuje, jak se bude AV chovat, se nazývá řetěz řízení viz *Obrázek 3*.

Samostatnost

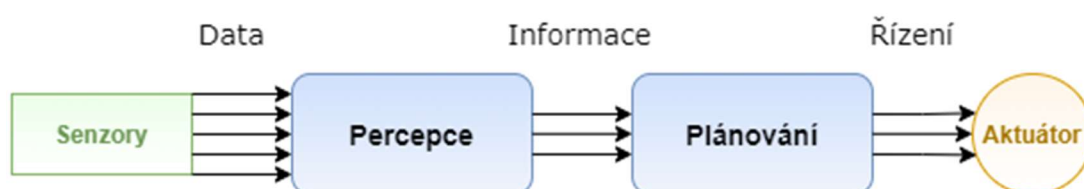
Neexistuje jedna definice míry samostatnosti, podle které by se hodnotily systémy rojového chování [24]. Již existující definice nejsou globálně akceptované. Jedna z používaných definic „Autonomy Levels for Unmanned Systems“ (ALFUS) byla vytvořena Americkým armádním sborem inženýrů. Dalším příkladem může být definice od Society of Automotive Engineers (SAE), která definuje samostatnost vozidla na škále od neautomatizované po plně automatizované, s volitelným volantem.

5.1 Řetěz řízení

Řetěz řízení obsahuje tři fáze viz *Obrázek 3*:

- **Percepce** – zpracovávání dat ze senzorů do použitelné podoby
 - Vytváří se koncepce prostředí, které je jednodušší na zpracování v následujících fázích
- **Plánování** – rozhoduje se jaké se provedou kroky, aby se splnil zadaný úkol
 - Při rozhodování využívá zpracovaných dat z fáze percepce
- **Řízení** – provádí se kroky naplánované ve fázi plánování

Může se říct, že fáze percepce a fáze ovládání jsou místa kde dochází k automatizaci řízení. V autonomních vozidlech zastává tuto funkci umělá inteligence viz *5.2 Řízení pomocí umělé inteligence* [25], v případě vozidel neautonomních je řidič člověk, pomocí dálkového ovládání.



Obrázek 3 Řetěz řízení; vlastní dle [24]

Pokroky v oblasti hardwarové a softwarové výkonnosti umožňují použití pokročilých metod v řetězu řízení. Paralelní zpracovávání dat umožňuje ve stejnou dobu zpracovávat data z telemetrických zařízení (senzorů, kamer), komunikovat s ostatními jedinci a plánovat. To by nebylo možné bez více jádrových procesorů.

Příklad způsobu ovládání roje

Roj se může ovládat například tak, že operátor stanoví, jak daleko mají být jedinci od sebe. Poté jednomu jedinci pošle příkaz, aby se držel určitou vzdálenost od jednoho či více bodů na mapě – tím mu efektivně nařizuje, kam má letět. Jednoduchost tkví v tom, že zbytek roje drží formaci, a když se i jen jeden dron začne ubírat nějakým směrem, transitivně se tím směrem bude pohybovat i zbytek roje.

5.2 Řízení pomocí umělé inteligence

Proces řízení se nahrazuje umělou inteligencí, a to tak, že jsou sesbírané informace z vlastních senzorů a senzorů dalších jedinců a ze základní stanice předzpracovány a poté předány algoritmu AI (umělá inteligence) [26]. Existují různé typy AI a každá vyhodnocuje sesbírané informace jiným způsobem. AI nakonec vybere, či vytvoří další kroky – výstup z AI totiž může být jak přímý, tak abstraktní. Přímé hodnoty jsou např. procentuální výkon motoru, nebo úhel pootočení. Abstraktním ovládním dronu se myslí nařazení akce, která se provede předdefinovaným způsobem. Například příkaz dolet' na určité souřadnice, zrychli nebo zastav.



Obrázek 4 Rozdělení druhů umělé inteligence; vlastní dle [24]

Existují různé algoritmy, které se mohou použít jako řídicí jednotka jedince v roji a každý z nich je vhodnější k použití v různých situacích viz *Obrázek 4*. Algoritmy umělé inteligence nemusejí fungovat pouze zvlášť, mnohokrát se využívá navzájem propojených algoritmů [24]. Skupinu může tvořit hluboká neuronová síť, která zpracovává obraz jdoucí z kamery a expertní systém rozhodující o nadcházejících krocích na základě pravidel. Příkladem je projekt udělaný vědci z Microsoftu, ti použili zpětnovazební učení propojené s hledacím algoritmem Monte Carlo procházení stromu a vytvořili autonomní kluzák [27].

Strojové vidění

Stále se vyvíjející strojové vidění nalézá uplatnění i v sektoru AV [24]. Stejně jako lidé používají zrak, jako svůj primární zdroj informací při řízení, dovoluje strojové vidění autonomním vozidlům vyhodnocovat své okolí pomocí dat z kamery. Je možné detekovat objekty a určovat směr a rychlost pohybu, za využití pouhé kamery.

Nyní převážná většina AV používá pro řízení hluboké učení (z anglického „deep learning“) se vstupy z palubní kamery. Celý řetězec řízení může být implementován pomocí AI (umělé inteligenci), která již získala znalosti o tom, jak se má za určitých okolností chovat. Využívají se různé druhy umělé inteligence a tím i způsobu učení využívané k řízení AV. Jsou jimi například expertní systém, formální logika, strojové učení pod dohledem (z anglického „supervised machine learning“), evoluční algoritmy, grafové a stromové metody hledání.

5.3 Vývoj a projekce

Nedávný vývoj AV technologií v hardwarové i softwarové oblasti umožňuje zpracovávání a ukládání mnohem většího objemu dat [24]. Tím dovoluje AV operovat na základě IoT architektury a vysoko výkonnostního distribuovaného výpočetního prostředí. Velmi dobře shrnuje nedávný vývoj AV technologií posouzení od (Plathottam, S. J. a Ranganathan, P. 2018), kde v předkladu píše:

„Výzkum distribuovaných robotických systémů se provádí od 80. let 20. století a [28] poskytuje taxonomii různých používaných metodik. Novější práce v [29] poskytuje rozsáhlý průzkum současných trendů v algoritmech plánování pohybu u více robotů. V [30] byl navržen decentralizovaný řídicí algoritmus pro transport jednoho objektu pomocí dvojice robotů, aniž by mezi nimi bylo nutné sdílet informace o poloze. V [31] bylo navrženo paradigma přidělit konkrétní role každému robotovi ve skupině robotů a umožnit robotům dynamickou výměnu rolí. Distribuované architektury pro řízení pozemní vozidlo byly modelovány pomocí Petrinets v [32]. Práce v [33] popisovala návrh a stavbu prototypu distribuované architektury pro bezpilotní prostředky (UAV). Rovněž demonstrovali experimentální lety s UAV pomocí této architektury.“ [24]

Počítá se s tím, že v průběhu příštích let nebude potřeba člověka, aby řídil AV. Ta se budou řídit sama pomocí umělé inteligence a zadaných pokynů [24].

6 Bezdrátová komunikace

Dosah je jedním z důležitých parametrů správného fungování robotického roje. Existuje mnoho faktorů ovlivňujících dosah bezdrátové komunikace [34]. Limitující faktory se dělí na vnitřní a vnější. Vnitřními faktory jsou parametry komunikačního modulu, limitovaná spotřeba elektrické energie (s větším dosahem roste spotřeba), velikost roje (s rostoucím počtem jedinců musí informace cestovat přes více uzlů, a tím spotřebovává energii). Optimální vzdálenost mezi uzly, pro minimalizování celkové energie potřebné k doručení zprávy je řešeno v [35]. Vnější faktory ovlivňující dosah jsou prostředí, ve kterém dochází ke komunikaci (zdi markantně snižují dosah), dále jiné systémy komunikující na stejném pásmu atp.

Nejlepší topologií pro robotický roj se v současnosti zdá být *ad hoc* síť. Dovoluje totiž dynamické připojování jedinců do sítě. Více v kapitole 6.2 *MANET – Mobilní ad hoc síť*. Většinou se vyplatí posílat větší pakety, protože každý paket obsahuje také duplicitní hlavičku. Při poslání relativně malé zprávy může být hlavička paketu i větší než posílaná data.

6.1 Parametry bezdrátové komunikace

Využití určité metody bezdrátové komunikace se odvíjí od *prostředí*, ve kterém se bude roj pohybovat, *vzdáleností* mezi jedinci navzájem a mezi rojem a základní stanicí, dále od maximální přípustné *latence* komunikace, *množství přenášených dat* a dostupné *infrastruktury* (např. mobilní telefonní síť – 5G). Všechny tyto parametry se navzájem ovlivňují, proto se při návrhu systému vychází ze známých (zadaných) parametrů, zbytek se poté odvodí při nahlédnutí, k již existujícím komunikačním modulům.

Vzdálenost:

- krátký dosah – při malé vzdálenosti mezi jedinci se používají technologie krátkého dosahu (Bluetooth, IR), které mají nižší spotřebu
- dlouhý dosah – komunikace mezi rojem a základní stanicí při větších vzdálenostech vyžaduje více energie to samé platí pro zachování přenosové rychlosti

Přenosová rychlost komunikace: [34]

- vysoká – je potřeba mezi jedinci při letu v těsné vzdálenosti a při letu v prostředí s mnoha překážkami, nebo při přenášení velkého množství naměřených dat, využívá se například Wi-Fi
- nízká – při pomalejším letu s většími rozestupy, může se použít RF, nebo IR

Prostředí můžeme obecně rozdělit na:

- vnitřní prostory – robot se pohybuje uvnitř budov (továrny, nemocnice, sklady ...)
- vnější prostory – robot se pohybuje venku v prostoru, který není ohraničen zdmi při průzkumu terénu, zemědělství, vojenských akcích, trasování ...

Ve *vnitřních prostorách* budou jednotlivci rozděleni překážkami (zdmi), které jim znemožní vizuální kontakt a omezí dosah komunikačních zařízení. Při komunikaci ve vnitřních prostorách se klade důraz na výkonnější způsob komunikace, který projde zdmi, vyšší přenosovou rychlost, nemusí dosahovat velikých vzdáleností (Bluetooth, Wi-Fi). *Venku* jsou nároky na komunikaci na velkou vzdálenost s nízkou spotřebou energie (Zigbee).

Živé streamování videa potřebuje rychlou a spolehlivou komunikaci uzpůsobenou na přenášení velkého množství dat (např. Wi-Fi) [34]. Na rozdíl od struktury odesílaných dat, která se může, i když ne triviálně, změnit přeprogramováním dronu, se při změně požadavků na rychlost či způsob komunikace musí vyměnit bezdrátový modul. Proto je důležité, stanovit si, jaké činnosti bude roj vykonávat a jaké přenosové parametry budou ke splnění úkolu o něco lepší než dostačující. Zároveň je třeba myslet ekonomicky, předimenzovaný dron by byl zbytečně drahý. Parametry bezdrátových komunikací lze vidět v *Tabulka 1*.

Výčet a využití jednotlivých technologií:

- IR – krátká vzdálenost, komunikace za účelem identifikace
- Bluetooth – do 100 metrů, vysoká přenosová rychlost
- RF – komunikace z bodu do bodu, nízká přenosová rychlost
- Wi-Fi – do stovek metrů, při velkém počtu přístupových bodů
- ZigBee protokol – mesh síť střední vzdálenosti s mnoha jedinci při nízké spotřebě
- XBee – při využití více protokolů (může být ZigBee protokol)
- Z-Wave – kontrolní a stavové aplikace
- Thread – jednoduchý, bezpečný, spolehlivý, škálovatelný

Parametr	IrDA	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee
Standard	-	802.15.1	802.11	802.15.4
Fyzické médium	IR	RF	RF	RF
Komunikační dosah	jednotky metrů	100 metrů	100 metrů	>100 metrů
Max. přenosová rychlost	4-16 Mbps	2-24 Mbps	54 Mbps - 9.4 Gbps	
Frekvenční pásmo	504THz - 300 GHz	2.4 GHz	2.4 / 5 / 6 GHz	
Max. počet uzlů v síti	-	8	256	65 000
Zabezpečení (Šifrování)	-	autentikace a volitelné šifrování	WPA2, RC4, WEP	AES
Spotřeba energie	nízká	střední	vysoká	nízká
Síťová topologie	bod do více bodů	ad-hoc	hvězdicová	ad-hoc, mesh

Tabulka 1 Parametry bezdrátových komunikací

Další vlivy na komunikaci

Rušení komunikace nemusí být pouze příčinou vědomé sabotáže. Slunce, magnetická pole, okolní zařízení komunikující na stejné frekvenci a také železné odrazové plochy by mohly způsobovat rušení komunikace mezi drony. *Velikost roje* neboli počet dronů v roji, zvyšuje požadavky na rychlost, latenci a výkon zpracování zpráv v celém systému.

6.2 MANET – Mobilní ad hoc sítě

Ad hoc sítě dovolují dynamické připojování jedinců do sítě. Existují dva typy ad hoc sítí: MANET (Mobilní Ad hoc sítě) a SANET (Statické Ad hoc sítě) [36]. V SANET mají jednotlivé uzly nastavenou přesnou geografickou polohu. Není zde mezi uzly žádná flexibilita, tudíž jsou známé jako sítě statické. Role přístrojů se po připojení do sítě nemění. Zato v síti MANET mohou uzly dynamicky měnit svou polohu. To ale způsobuje komplikace pro algoritmy hledající cestu pro pakety, protože na rozdíl od SANET se optimální cesta z bodu A do bodu B mění velice často.

6.2.1 Způsob fungování

V sítích MANET se přístroje mohou pohybovat náhodně. To je umožněno tak, že jsou přístroje propojeny pomocí bezdrátového připojení např. Wi-Fi. Přístroje se mohou do sítě libovolně připojovat a odpojovat. Kvůli náhodně se měnícímu uspořádání se uzly samy umějí organizovat – MANET topologie je dynamická a rychle se mění. Zařízení si při pohybu přetvářejí svou routovací tabulku. Každé zařízení funguje jako koncové zařízení, a navíc musí fungovat jako bezdrátový router. Podmínkou fungování MANET sítě je schopnost konzistentně uchovávat informace potřebné k efektivnímu vedení komunikace čili schopnost efektivně posílat co nejméně paketů, přes co nejmenší počet uzlů.

Takovéto sítě mohou fungovat samostatně, nebo mohou být propojeny na internet. Podobně se může síť MANET, na které probíhá komunikace mezi jedinci, propojit se sítí, pomocí které komunikuje řídicí jednotka s rojem. Přes tento bod by se poté posílala naměřená data od dronů směrem k řídicí jednotce a příkazy od řídicí jednotky směrem k jedincům v roji [34].

Protože se MANET spoléhá na kolaboraci mezi jedinci, představuje výhodnou formu rychle nasaditelné komunikace v oblastech bez dostatečné infrastruktury a bez centrálního operátora. Což je přesně požadavek na komunikaci v roji. Roje dronů jsou z velké části případů vypouštěny v takovýchto oblastech bez dostatečné infrastruktury, kterážto mohla být zničena živelnými pohromami, nebo nebyla nikdy nainstalována [34], [36].

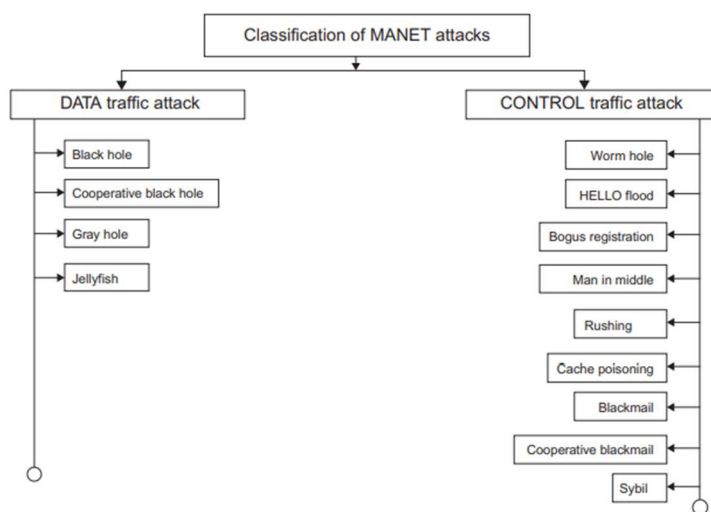
Nejdříve byl MANET vytvořen pro použití v armádě, ale díky jeho užitečnosti se dnes používá při záchranných akcích a v komerční sféře např. na festivalech [36]. Při vyšším počtu připojených zařízení začíná být znatelný problém samo-organizace a dynamické topologie sítě. Tomu se předchází například segmentací sítě na menší části, které jsou jednodušší na správu. MANET funguje na slepé interaktivní důvěře mezi jednotlivými zařízeními, což dává prostor pro napadení sítě. Typické vlastnosti MANET jsou nespolehlivost bezdrátových spojení mezi zařízeními a konstantně se měnící topologie.

6.2.2 Kategorie

MANET sítě jsou rozděleny do tří kategorií – VANET, InVANET a iMANET. Do kategorie s celým názvem **automobilní ad hoc sítě (VANET)** se řadí sítě nevyžadující dodatečnou infrastrukturu [36]. Veškeré vybavení je přítomno v mobilním zařízení. Další jsou **inteligentní automobilní ad hoc sítě (InVANET)**. MANET se v této kategorii tvoří s použitím komunikace WiMax IEEE 802.16 a Wi-Fi 802.11. Hlavním cílem InVANET je zamezení srážek mobilních zařízení tak, aby byli pasažéři v co největším bezpečí. Tyto sítě se také používají při armádních akcích pro komunikaci. Poslední kategorií je **MANET založený na internetu (iMANET)**. Používá se při propojování mobilních zařízení k fixním internetovým přístupovým bodům.

6.2.3 Zabezpečení

Charakteristikou MANET sítí je otevřenost, dynamicky se měnící topologie, nepřítomnost centrálního monitoringu a správy, kooperativní algoritmy a žádný mechanismus obrany proti vnějšímu napadení [36], [37]. Proto jsou tyto sítě často terčem útoků. Útoky můžeme rozdělit na pasivní, aktivní, interní, externí a útoky v síťové vrstvě, routovací útoky a útok předávání paketů [38]. Pro výpis některých útoků viz *Obrázek 5*. MANET sítě jsou založené na vzájemné důvěře a komunikují v bezdrátové podobě. To umožňuje útočníkům jednodušeji odposlouchávat komunikaci a poté se infiltrovat.



Obrázek 5 Klasifikace MANET útoků [38]

Black hole útok

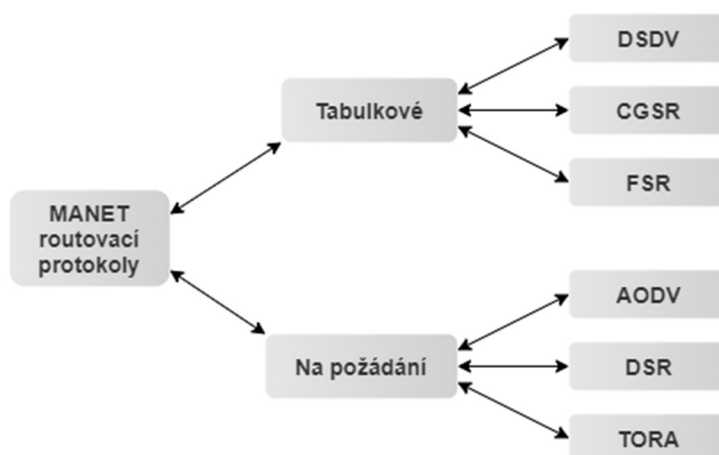
Při útoku zvaném *black hole attack*, narušitel využívá routovacího protokolu MANET sítě tak, že se vydává za bod nejkratší cesty k cílovému nodu paketu [37]. Tuto zprávu posílá i v případě, kdy nejkratší cestou není. Při tomto útoku má útočník možnost změnit reálnou zprávu na zprávu s vlastním obsahem a reálnou zprávu následně zahodit.

Způsoby ochrany proti útokům na MANET sítě při použití AODV protokolu: [36]

- DPRAODV metoda
- AOMDV metoda
- Modifikovaná AODV
- IDSAODV metoda

IDSAODV (Intrusion Detection System)

Intrusion Detection System (IDSAODV) se snaží chránit proti útoku s názvem černá díra (angl. black hole attack) [36]. Proces, jakým to provádí je, že při podezření na útok se při přepisování routovacích tabulek z různých míst v síti rozešlou odpovědi na cestu RREP (angl. route reply). Protokol předpokládá, že první RREP, který přijde je od útočnicka, a tudíž ho ignoruje, aby zamezil vytvoření špatné cesty. Tato ochrana není dokonalá, protože se může stát, že náhodou přijde RREP zpráva od útočnicka jako druhá a tím se prolomí ochrana IDSAODV.



Obrázek 6 MANET routovací protokoly; vlastní dle [39]

6.2.4 Kategorie routovacích protokolů

MANET fungují často na základě TCP/IP. Protože jsou zařízení mobilní s limitovanými prostředky, musel být TCP/IP protokol upraven tak, aby podporoval dynamičnost mobilních ad hoc sítí [36]. Výzkum zaměřující se na definování nových protokolů pro MANET, poháněný zvyšující se popularitou MANET sítí, přinesl již několik protokolů podporujících dynamickou národu, kterou základní TCP/IP v4 protokol postrádá. V protokolu TCP/IP v6 je problematika ad hoc sítí řešena již v základu. Tyto protokoly můžeme rozdělit do dvou kategorií, a to na routovací metodu proaktivní (na zakázku) a reaktivní neboli založenou na tabulkách. Rozdělení je možné vidět na Obrázek 6. Existují i další routovací metody, jako jsou ZHLS a ZPR, které využívají vlastností obou kategorií.

6.2.5 *Ad hoc síť v rojové robotice*

Neexistuje jeden nejlepší univerzální routovací protokol pro roj dronů. Vždy záleží na specifikacích roje: počet jedinců, použitý hardware, použitý systém řízení, úkol. Roje čítající mnoho jedinců, nebo roje ve kterých se posílá velké množství informací, by se měly vyhnout použití sítě typu flooding, která by byla náchylnější na zahlcení komunikace. Systém s centrálním ovládáním za použití méně výkonných dronů profituje z protokolu, který si ukládá jednotlivé cesty ke koncovým uzlům. Je totiž jasné, že nejvíce komunikace bude putovat z, a do centrálního serveru.

6.3 Infračervená komunikace

Infračervená (IR) komunikace funguje na bázi světla v infračerveném spektru. IR se používá na krátkou vzdálenost (standardně do 2 metrů). Neprochází zdmi a ani podobnými překážkami, funguje tedy pouze při přímé viditelnosti vysílače a přijímače [34]. IR komunikace se využívá převážně na dvě věci, a to na identifikaci jedince, a jako vedlejší efekt, detekce překážek. Tento způsob komunikace je náchylný na světelné rušení, kde největším emitentem infračerveného záření bývá přes den slunce. Pro minimalizaci rušení se používají kryty, které pomáhají ve chvíli, kdy na IR senzor dopadají pod úhlem paprsky slunečního záření. Výhoda infračervené komunikace tkví v možné nízké spotřebě, která prodlužuje dobu letu dronů. Avšak s nižší spotřebou se také snižuje efektivní komunikační vzdálenost. IrDA (Infrared Data Association) je skupina spravující protokol pro bezdrátovou infračervenou komunikaci [40]. Tento protokol je již od základu zabezpečený. Komunikace pomocí IR dosahuje rychlostí od 2,4 kbit/s do 1 Gbit/s. Využívá se vlnové délky světla od 850-950 nm.

6.4 Bluetooth komunikace

Bluetooth Mesh je mesh standard založený na BLE (Bluetooth Low Energy), který byl zamýšlen pro komunikaci s periferními zařízeními [34]. Bluetooth Mesh se používá pro komunikaci v průmyslu 4.0 a IoT. Specifikace jsou popsány v Mesh Model a Mesh Profile specifikacích [41].

Funguje na principu flood network, kde každý node přepośle packet všem sousedům, než se dostane ke svému cíli [41]. Aby nedocházelo k nekonečnému oběhu paketů je v hlavičce uveden TTL (time to live) parametr. Pokaždé když se paket přepośle, TTL se o jedna sníží. Maximální velikost jedné zprávy je 384 byte, při použití mechanismu SAR (Segmentation and Reassembly). Bez použití SAR je maximální velikost pouze 11 byte.

Zprávy jsou před odesláním šifrovány dvěma klíči, a to sít'ovým klíčem a aplikačním klíčem. Sít'ový klíč je jeden pro celou mesh síť. Aplikační klíč je pro specifickou funkcionalitu, např. změna nastavení nebo poslání statusu. Přidat zařízení lze pouze přes již připojené zařízení,

kteřé všem rozešle o novém zařízení základní informace. Při použití v roji by to znamenalo, že se musejí všichni jedinci přidat předem. Přidávání nového jedince do roje za běhu není v tuto chvíli praktické.

6.5 Wi-Fi komunikace

Wi-Fi je celosvětově běžně používaná technologie, která k přenosu dat využívá rádiové frekvence [42]. Wi-Fi umožňuje rychlé bezdrátové připojení k internetu. Používá standard IEEE 802.11 skládající se z dílčích tříd 802.11 b / a / g / n / ac / ax. Dnes běžně používané verze, pro vysokorychlostní přenos dat s vysokou účinností, jsou n, ac a ax. Verze n byla uvedena na trh v roce 2009, díky svým novým funkcím jako jsou MIMO (*angl. Multiple Input and Multiple Output*), OFDM (*angl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), Space Time Block Coding, cyklické zpoždění atd. se zvýšily možnosti využití a tím i poptávka po Wi-Fi technologiích. Tyto nové funkce zlepšily propustnost a pokrytí až na 150 Mbps, resp. 250 m.

Abedi et. al píše, že i přes všudypřítomnost Wi-Fi se Bluetooth používá pro komunikaci v zařízeních s nízkou spotřebou a nižšími přenosovými rychlostmi. Je to, protože Bluetooth spotřebuje mnohem méně energie než Wi-Fi, což zvyšuje životnost baterie [43]. Vyšší spotřeba Wi-Fi je způsobena dodatečnou komunikací potřebnou k vytvoření a udržování spojení s přístupovým bodem.

Vysokou spotřebu Wi-Fi technologie, způsobenou dodatečnou komunikací, řeší Abedi et. al v článku „*Wi-LE: Can WiFi Replace Bluetooth?*“. V tomto článku uvádí, že zvládli vytvořit Wi-Le, Wi-Fi kompatibilní komunikační systém, který se vyhýbá energeticky náročnému procesu vytváření a udržení komunikace. Využívají běžně dostupný Wi-Fi modul. Podle uvedených výsledků je vidět, že Wi-Le má podobné energetické nároky, jako BLE (Bluetooth Low Energy) [43].

6.6 ZigBee komunikace

Ghori et. al o ZigBee píšou „ZigBee je technologie podporující bezdrátovou síť založená na standardu IEEE 802.15.4 [34]. Navíc má dobrý poměr cena–výkon s kapacitou pracovat měsíce nebo roky na baterie. Tato technologie je díky své spolehlivosti a nízké ceně využívána po celém světě v různých aplikacích.“ [44]. Výhodami ZigBee komunikace jsou nízká spotřeba umožněná nízkou přenosovou rychlostí, levná implementace velkého počtu nodů, velká vzdálenost komunikace (více jak 1 km s XBee Pro), nízká latence a vysoká spolehlivost [34].

ZigBee protokol přidal do 802.15.4 standardu: routovací tabulky, ad hoc síť (automatické vytváření sítě) a samo opravování mesh sítě a to tak, že automaticky nalezne chybu v síti a pozmění topologii sítě. Díky těmto vlastnostem se často používá při vytváření bezdrátové mesh sítě s nízkou spotřebou.

7 Struktura komunikace

Roj nepotřebuje mnoho informací, protože ze základních aspektů fungování roje vyplývá, že by každý jedinec měl být co nejvíce nezávislý od ostatních [3]. Různé systémy potřebují sdílení jiných informací. Mnoho informací (např. poloha, výška, natočení) může být získáváno samotnými jedinci ze senzorů a modulů viz kapitola 8.2 *Senzory*, z těch se dále dopočítávají další potřebné informace jako jsou například zrychlení, rychlost, nebo relativní poloha viz kapitola 9 *Způsoby určování relativní polohy jedinců*.

Pokud se mluví o roji s plným, či částečným centrálním rozhodováním, ve kterém jedinci neprovádí rozhodovací část řízení, je zapotřebí shromažďovat veškeré informace potřebné pro správné určení dalších kroků v centrálním uzlu (centrálním počítači). V takovémto případě se budou sdílet všechna data ze senzorů, která se většinou za účelem optimalizace před odesláním vyčistí a normalizují. Tento systém se například využívá v případech, kdy je předem známá dráha v roji o mnoha jedincích. V takovémto případě je ekonomicky výhodnější sestavit jedince pouze s nezbytným minimem – nižším výpočetním výkonem, lehčí baterií atp.

Roj bez centrálního rozhodování bude sdílet pouze data, která umožní každému jednotlivci rozhodovat se za sebe a popřípadě přijímat příkazy od operátora. Úplným základem je absolutní poloha v prostoru, UID (jednotné identifikační číslo) a čas platnosti. Zbytek parametrů je možné dopočítat na jejich základě, což není optimální, a proto se sdílí také parametry, jako jsou orientace a rychlost. Popřípadě údaje specifické pro daný úkol – aktuální status, stav baterie, detekce cíle atp.

Příklad struktury dat

Při návrhu struktury sdílených dat pro roj navržený podle druhého výše zmíněného příkladu se vychází z hardwarových a systémových limitací. V tomto případě je potřeba vybrat hardware, který umožňuje mesh zapojení, jako například XBee Digi Mesh 2.4 (S1). Každý komunikační modul má stanovenou maximální velikost paketů, která je v tomto případě 84 byte [45]. V optimálním případě se je možné všechna data poslat v jednom paketu, což snižuje množství redundantně posílaných duplicitních hlaviček paketů.

Jak je vidět v *Tabulka 2*, všechny informace potřebné pro správné fungování roje se vejdou do paketu o velikosti dat 36 byte. Toto číslo však není to nejmenší dosažitelné, všechny zmíněné položky mají určité rozpětí a rozlišení. Při další optimalizaci je možné snížit jednu či obě části a tím limitovat například maximální rychlost, či počet možných statusů. Je však potřeba důkladně zvážit a otestovat, zda by tato optimalizace příliš neomezila schopnost jedinců jednat na základě takto omezených dat (např. menší rozlišení, či rychlost).

Název	Velikost (byte)
UID	4
Čas	8
Poloha	8
Rychlost X	4
Rychlost Y	4
Rychlost Z	4
Status	4
Celkem	36 byte

Tabulka 2 Příklad struktury sdílených dat

8 Elektronické komponenty dronů

Pro létání, komunikaci, koordinaci a rojové chování je potřeba, aby měl dron mnoho komponent optimálně vybraných pro specifické účely. Vybrání správných komponent výrazně zlepší provozní podmínky. Základní komponenty, které se mohou použít, a často také používají jsou: motor, ESC (angl. Electronic Speed Controller), ovladač řízení, GPS Modul, senzory, přijímač, anténa, baterie, kamera, IMU (angl. Inertial Measurement Unit) [46].

Při specifikaci logistických a technických požadavků se musí brát v potaz všechny elektronické komponenty. Většina z nich spotřebovává nezanedbatelné množství elektrické energie (viz *Tabulka 3*), při komunikaci se odesílají data ze senzorů a kamery atp. Rychlost robotického roje a schopnost reagovat na vnější podmínky je ovlivněna rychlostí komunikace (šířka pásma, přenosová rychlost) a parametry použitých senzorů, jako je efektivní vzdálenost a přesnost senzoru vzdálenosti.

Zařízení	Proudové nároky [mA]	Maximální spotřeba [W]
Kamera	120	0,60
CPU	400	3,04
Wi-Fi	275	
Motory (Quadrotor)	3700	13,69
GPS modul	450	2,25
Celkem	4,95 A	19,58

Tabulka 3 Orientační hodnoty spotřeby vybraných elektronických zařízení [47]

8.1 Baterie

Baterie se používají jako zdroj elektrické energie. V dnešní době je lze nalézt skoro všude. Ve vozidlech se využívá baterie zvané akumulátor. Akumulátor je typ baterie, kterou je možné opakovaně dobíjet. Výhodou využití baterií v autonomních vozidlech je nižší hlučnost oproti využití spalovacích motorů. Používají se také jako záložní zdroje v kombinaci se spalovacími motory, tím zajišťují plynulý a bezpečnější let. V případě selhání hlavního motoru dokáže UAV pomocí baterie bezpečně přistát a vyslat SOS signál. [35]

Pro malé UAV jako jsou drony je cenově, váhově a technologicky výhodnější použít elektrický než spalovací motor. Často používané baterie fungují na bázi lithia, protože mají velkou kapacitu čili dobrý poměr váhy ku výkonu. Nejpopulárnější lithiové baterie jsou lithium polymer (Li-Pol) a lithium ion (Li-ion). Vyvíjejí se nové baterie na bázi lithia a síry, které by měly mít ještě lepší poměr váhy ku výkonu. Hlavní parametry, na které se hledí při výběru baterií jsou: [35], [46]

- Napětí
- Kapacita
- *Dále se sleduje: doba nabíjení, životnost, cena, čas aktivace, míra vybití*

Baterie musejí snášet variabilní velikost zátěže – aktivace senzorů, kamery, přistávání, vzletání, vznášení se. Bez žádné ochrany by se mohlo stát, že se baterie přetíží, nebo přehřeje. Proto jsou při chodu, a nabíjení monitorovány systémem správy baterie. Tento systém kontroluje teplotu, stav napětí a proud, chrání baterii před přepětím (over-voltage) a na neposledním místě varuje před úplným vybitím baterie, které by způsobilo pád a následné poškození dronu [35].

8.2 Senzory

Senzory snímají okolí, a tím umožňují UAV detekovat a náležitě reagovat na změny v prostředí, což je jeden z předpokladů rojové inteligence (viz kapitola 3 *Rojová inteligence*). Existují různé typy senzorů, které se využívají v rojové robotice. Používají se na zjišťování polohy a náklonu, vzdálenosti od překážek, výšky nad zemí, atd. Bez těchto informací nemohou roje spolupracovat na týmových úkolech. Příkladem může být mapování prostoru, podmíněné bez možností komunikace (IR senzor) a znalosti polohy (IMU nebo GPS).

Automatický let roje vyžaduje ke své činnosti data z IMU, nejlépe v kombinaci s GPS a dalšími senzory, podle kterých určují jedinci svou relativní polohu k ostatním jedincům (viz kapitola 9 *Způsoby určování relativní polohy jedinců*).

Neúplný seznam senzorů: Gyroskop, barometr, akcelerometr, GPS, magnetometr, výškoměr, IMU, detekce překážek, lidar, ultrasonický radar, kamera, senzor rychlosti větru a akustický senzor, IR senzor.

8.2.1 Gyroskop

Gyroskopické senzory jsou velice levné, využívají se v řízených raketových střelách ale i v těch nejběžnějších zařízeních (mobilní telefony, chytré hodinky) [48]. Gyroskopy nalézají uplatnění i ve vesmíru, kde se používají pro navigaci.

Fungují na principu zachování momentu hybnosti [49]. Samotný gyroskop se skládá z točícího se disku, který je připojený k rámu. Tři akcelerometry jsou zapojeny ve třech osách (x, y, z), díky nimž je možné vypočítat stupeň otočení, náklonu a úhlovou rychlost pohybujícího se tělesa [48].

8.2.2 Akcelerometr

Jak už z názvu vyplývá, akcelerometr měří akceleraci, ze které se počítá, většinou integrační metodou, rychlost [50]. V kombinaci s dalšími senzory (Gyroskop, GPS) umožňuje přesnější stanovení polohy. Většina akcelerometrů funguje na principu piezoelektrického jevu – krystal, na kterém se při namáhání vytváří napětí. Z důvodu vysoké přesnosti se piezoelektrický jev také využívá například v hodinkách.

Kombinaci 3-osého akcelerometru a 3-osého gyroskopu se obecně říká 6-osá gyroskopická stabilizace [48]. Vyvíjejí se také nové akcelerometry Si-MEMS (*angl. Silicon-Microelectromechanical Systems*) integrované přímo do IMU [50]. Což jim umožňuje díky menší vzdálenosti komunikovat mnohem rychleji, a tím se i zvyšuje přesnost při bezpilotním létání.

8.2.3 GPS

Nejpoužívanějším lokalizačním zařízením je GPS (global positioning system) modul [46]. Je to díky jeho levné a jednoduché implementaci a množství již existujících modulů, které jsou rovnou připraveny k použití [48].

John Kyes [51] o GPS píše: „*Globální poziční systém (GPS) je navigační systém využívající satelity, přijímač a algoritmy k synchronizaci údajů o poloze, rychlosti a času pro leteckou, námořní a pozemní dopravu. Družicový systém se skládá ze skupiny 24 satelitů v šesti oběžných rovinách zaměřených na Zemi, každý se čtyřmi satelity, obíhající ve vzdálenosti 20 000 km nad Zemí a pohybující se rychlostí 14 000 km / h. I když k vytvoření polohy na zemském povrchu potřebujeme pouze tři satelity, k ověření informací z ostatních tří se často používá čtvrtý satelit. Čtvrtý satelit nás také přesouvá do třetí dimenze a umožňuje nám vypočítat nadmořskou výšku zařízení.*“

Nevýhodou GPS je, že funguje pouze pokud je dron na nezakrytém, nebo minimálně odstíněném místě, s viditelností minimálně tří satelitů [46]. Což není možné například v podzemních prostorách, lese nebo v budově. Se snižující se dostupností signálu se snižuje i přesnost určené polohy v prostoru [48]. Kvůli těmto nevýhodám se GPS většinou využívá v kombinaci s dalšími senzory (např. magnetometr).

Za částečnou náhradu GPS modulu, bych označil IMU spolu s dalšími senzory, a to především v místech, kde je GPS nepoužitelný. GPS je ale přesnější a chyby při určování polohy se s každým dalším určením opraví, kdežto IMU je náchylné k exponenciálnímu znásobení naměřených chyb (viz kapitola 8.2.6 *Inerciální měřící jednotka (IMU)*).

8.2.4 Magnetometr

Magnetometr se využívá k určení směru, ukazujícího na magnetický severní pól [48]. Směr se určuje z měření směru a síly magnetického pole. Pro určení správného směru je potřeba vyvarovat se místům produkujícím magnetické pole. Ta by při měření zasahovala do magnetického pole země a způsobila by nemožnost správného určení směru. Místa, která produkují magnetické pole jsou například dráty vysokého napětí, nebo elektrické motory atp.

8.2.5 Určení výšky

K určení výšky se využívá barometru, nebo výškoměru. Každý z těchto způsobů využívá jiného média k určení výšky. Barometr pracuje s atmosférickým tlakem, zatímco výškoměry využívají elektromagnetického vlnění. Výhodou výškoměru je vysoká přesnost měření ($\pm 0,05$ metrů), čímž je přesnější než barometr [48], [52]. Spolehlivě funguje pouze v malé výšce (stovky metrů).

Výškoměry jsou založené buď na technologii RADAR, nebo přesnější technologii LIDAR, resp. LADAR. Rozdíl mezi technologiemi LIDAR a LADAR je, že LIDAR je založen na laserových senzorech a LADAR senzorech obecných. RADAR pracuje s elektromagnetickými pulsy. Je náchylnější k rušení, protože používaná vlnová délka je o hodně větší než v případě technologie LIDAR. To způsobuje vyšší citlivost na malé artefakty v úhlu pohledu, od kterých se mohou vysílané elektromagnetické vlny odrazit. Nevýhodou výškoměru je, že při měření musí být polohován kolmo k zemi.

8.2.6 Inerciální měřicí jednotka (IMU)

IMU je anglická zkratka pro „Inertial Measurement Unit“, v češtině to znamená inerciální měřicí jednotka [48]. IMU je skupina senzorů seskupená v jednom modulu (akcelerometr, gyroskop a magnetometr). Pomocí těchto senzorů dokáže vypočítat pozici dronu i ve vnitřních prostorech, kde není možné využít GPS [53]. IMU podle naměřených hodnot zrychlení, náklonu a směru průběžně během letu počítá rychlost a z rychlosti pozici.

Výpočet se většinou provádí metodou integrace, z integrace zrychlení dostaneme rychlost a integrací rychlosti dostaneme vzdálenost. Nevýhodou této metody je, že chyba způsobená špatným měřením ze senzoru se v průběhu výpočtu exponenciálně zvyšuje a s každým dalším měřením se poziční chyba sčítá [48]. Je proto nutné při sestavování AV dbát na tuto skutečnost a nějakým způsobem čas od času pozici, pomocí dalších systémů kalibrovat. Kalibrovat se také musejí senzory uvnitř IMU, ty jsou naštěstí převážně kalibrovány softwarově a není proto nutná manuální kalibrace.

8.2.7 Detekce překážek

Let v roji dronů, uhýbání stromům v lese a podobné činnosti jsou podmíněné včasnou a přesnou detekcí překážek [48]. Tyto překážky se mohou detekovat pomocí dvou kamer, které jako lidské oči vytvoří třidimenzionální obraz okolního prostředí. Také se používají ultrasonické senzory, ty měří, jak dlouho trvá, než se vyslané ultrasonické vlny odrazí a vrátí zpět. Při výpočtu vzdálenosti překážek je potřeba počítat s proměnlivou rychlostí dronu. Infračervené senzory fungují velice podobně jako ultrasonické, s tím rozdílem, že vyzařují infračervené záření.

Výpočet maximální bezpečné rychlosti

Ze známých parametrů o senzorech a letových možnostech dronu čili z efektivní vzdálenosti detekce d_{ef} , zjednodušeného lineárního zrychlení dronu a lze vypočítat maximální bezpečnou rychlost v_{max} , kterou by neměly drony za standardních podmínek překročit, a to pomocí rovnice (1).

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2d_{ef}^2}{a} \cdot f} \quad (1)$$

kde:

v_{max} = maximální bezpečná rychlost dronu [$m \cdot s^{-1}$]

d_{ef} = efektivní vzdálenost detekce [m]

a = zrychlení dronu [$m \cdot s^{-2}$]

f = koeficient bezpečnosti

Efektivní vzdálenost detekce je menší než dosah senzoru, což je způsobeno chybami při měření. Takové chyby mohou být způsobeny vnějšími vlivy, jako jsou velikost detekované překážky, vnější zdroje záření, kde největším zdrojem IR záření bývá slunce, a další. Pro rovnici na výpočet efektivní vzdálenost detekce d_{ef} viz rovnice (2). Protože se ve zjednodušené rovnici (1) nepočítá s proměnnými jako je pohyb způsobený větrem, zpoždění mezi detekcí překážky a následnou reakcí, a také nelineárnost zrychlení, resp. zpomalení, musí se snížit maximální bezpečná rychlost dronu v_{max} koeficientem bezpečnosti f . Ten se může pohybovat podle použitých součástí v intervalu $f \in (0.5, 1)$.

$$d_{ef} = r - \delta - d_{min} \quad (2)$$

kde:

d_{ef} = efektivní vzdálenost detekce [m]

r = dosah senzoru [m]

δ = chyba senzoru při měření [m]

d_{min} = minimální vzdálenost od překážky [m]

8.3 Motor

Motory se podle způsobu fungování dělí na kartáčové a bezkartáčové. Populárnější a efektivnější jsou bezkartáčové (*angl. brushless*) motory, protože jak již název napovídá, nemají kartáče, které by se při pohybu opotřebovávaly [48]. Při normálním letu (se základním vybavením) spotřebují motory většinu energie, proto je důležité při vybírání motoru dbát

na design, který je optimalizovaný pro aktivity, které bude daný dron provozovat. Aktivitami se myslí – rychlé lety s prudkým manévrováním mezi překážkami, nošení těžkého nákladu, nebo průzkum, při kteréžto aktivitě se bude motor zatěžovat konstantně dlouhou dobu. Pro průzkum se vybírá model, který se nepřehřívá a je efektivní při stabilním dlouhém letu ve venkovních prostorech.

Při výběru motoru je dobré rovnou vybírat i vrtule. Různé kombinace motorů a vrtulí mají rozdílné letové vlastnosti a hodí se proto pro různé činnosti. Například vrtule s velkou plochou či stoupáním se kvůli odporu vzduchu roztácejí pomaleji, a proto s nimi nejsou optimální rychlé průlety mezi stromy.

8.4 ESC

ESC, anglický akronym pro *Electronic Speed Controller* (v češtině „Elektronický ovladač rychlosti“), je komponenta, která ovládá rychlost otáček motorů a jejich směr otáčení [46]. Funguje také jako dynamická brzda. Konvertuje DC (stejnoseměrný proud) na třífázový AC (střídavý proud), kterým se napájí motory.

8.5 Ovladač řízení

Ovladač řízení, anglicky *flight controller*, se při použití v neautonomních vozidlech používá jako mozek dronu [46]. Přijímá vstupy z přijímače, GPS modulu, baterie, IMU a dalších senzorů. Přes ESC reguluje rychlost otáček jednotlivých motorů, čímž dron naklání a otáčí. Dále má funkce autopilota, body na trase (waypoints), následuj mě (follow me), failsafe.

8.6 Kamera

Kamera se využívá k nahrávání videí, vzdálenému ovládní a také strojovému vidění [46]. Vždy se snažíme mít na dronu kameru s nejlepšími parametry, jsme ale omezeni velikostí, vahou, spotřebou energie, šířkou pásma a cenou. Tudíž limitujícím faktorem jsou ostatní komponenty, podle kterých se nakonec vybere vyhovující kamera. Podle kvality videa, se při živém přenosu v HD kvalitě může posílat rychlostí až 10 Mbps. To je v některých situacích příliš velká zátěž na síť, a proto se může využít tzv. edge computing. Různé metody snižování zatěžování sítě při posílání živého videa v roji dronů popisuje Junjue Wang, et. al. 2018 v *Bandwidth-efficient Live Video Analytics for Drones via Edge Computing* [54]. Nevýhodou použití edge computingu jsou jeho nároky na výkon CPU (central processing unit) a GPU (graphical processing unit), zvyšující finální cenu dronu.

9 Způsoby určování relativní polohy jedinců

Některé činnosti nepotřebují znalost absolutní (geografické) polohy v prostoru, stačí relativní poloha k danému bodu. Bodem se myslí bod v prostoru položený v místě nějakého objektu, např. sousední jedinec, nebo objekt se kterým má dron interagovat. Činnosti, které mohou využívat relativní polohy mohou být například vyhýbání se překážkám, udržování určité vzdálenosti od sousedního jedince, nebo přistání.

Relativní polohu je možné určovat více způsoby [55]. Využívají se k tomu různé senzory a zařízení, jako jsou gyroskop, kamera, laserový zaměřovač, GPS, LIDAR atp. [56]. Některé z nich jsou zmíněné v kapitolách 8.2 *Senzory* a 8.6 *Kamera*. Mnoho metod určujících relativní polohu využívá více senzorů a zařízení najednou, čímž se zvyšuje přesnost při výpočtu směrového vektoru.

Určit relativní polohu je možné přímým, nebo nepřímým způsobem. Přímým způsobem se rozumí použití veličin přímo souvisejících s objektem, ke kterému se zjišťuje relativní poloha. Takovéto veličiny jsou např. absolutní vzdálenost, nebo poloha v obraze z kamery [55]. Nepřímo se počítá relativní poloha pomocí přepočtu přes polohu určenou k jinému bodu, tím může být absolutní poloha. Touto metodou by se mohlo postupovat tak, že se pomocí laserového zaměřovače a výškoměru zjistí naše absolutní poloha [56]. Absolutní poloha hledaného objektu je známa. Nakonec se pomocí rovnice (3) vypočítá relativní poloha, resp. směrový vektor.

$$\vec{S} = \vec{p}_j - \vec{p}_o \quad (3)$$

kde:

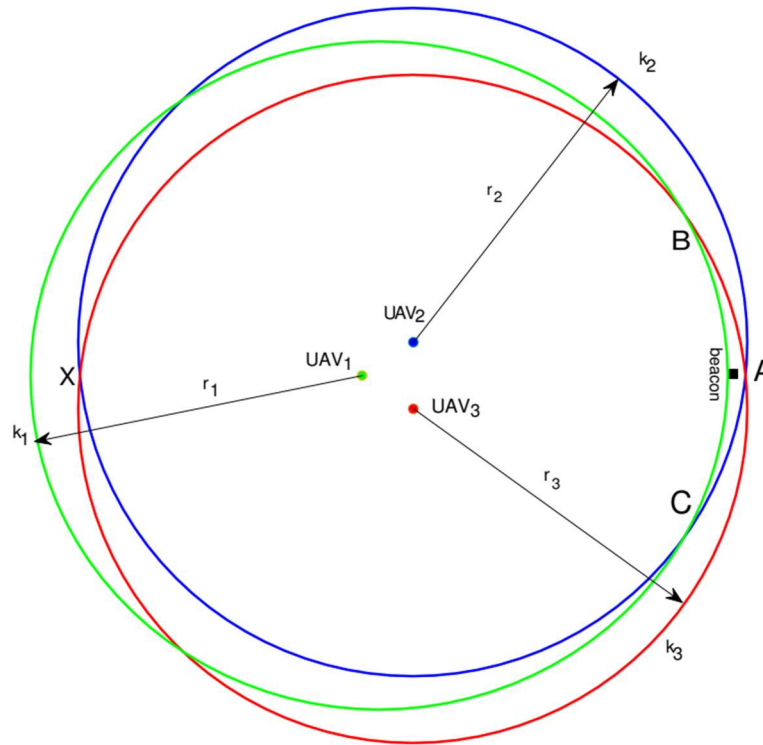
\vec{S} = směrový vektor

\vec{p}_j = polohový vektor jedince

\vec{p}_o = polohový vektor objektu

Další často užívaný způsob, jak určovat relativní polohu je pomocí **triangulace**. Tento způsob vychází z předpokladu, že se vzdálenost objektu měří minimálně ze tří různých míst a je známa relativní poloha těchto tří bodů [55]. Po změření těchto tří vzdáleností se pomocí trigonometrie vypočítá přesná poloha v třírozměrném prostoru. **Na stejném principu také funguje GPS navigace.**

Vzdálenost se může měřit jakýmkoli způsobem, kde různé způsoby se hodí do různých situací. Výhodou roje dronů je možnost vytvořit formaci, kde je známa vzdálenost mezi jednotlivými jedinci [55], [56] viz *Obrázek 7*. Ti poté změří úhel, či vzdálenost pomocí kamery, sonaru, LIDARu atp. Naměřené hodnoty se vyhodnotí a efektivně se zjistí poloha nějakého vysílače, nebo osoby ztracené v lese, která má zapnutý mobilní telefon.



Obrázek 7 Vizualizace triangulace [55]

Popis obrázku: Formace dronů, kde kružnice k₁, k₂, k₃ představují vzdálenost vypočítanou z naměřeného RSSI. A body A, B, C a X jsou jedny z možných průsečíků určujících hledanou polohu.

10 Legislativa v ČR

V České republice spravuje vzdušný prostor Ústav pro civilní letectví (ÚCL). ÚCL se řídí směrnicemi a nařízeními komise EU, což umožňuje sjednocovat legislativu v zemích Evropské Unie. Protože se bezpilotní letouny již často používají v komerčním odvětví, a to hlavně v posledních pár letech, vydala Komise EU v roce 2020 nařízení o operování bezpilotních letounů. V České republice vstupuje v platnost od začátku roku 2021.

10.1 Kategorie bezpilotních letadel

V České republice se bezpilotní letadla dělí do 3 kategorií:

1. Otevřená kategorie (OPEN)
2. Specifická kategorie (SPECIFIC)
3. Certifikovaná kategorie (CERTIFIED)

„**Otevřená (Open) kategorie** je kategorie provozu bezpilotních systémů, u kterých s ohledem na související rizika není vyžadováno předchozí povolení příslušného úřadu, ani prohlášení provozovatele UAS před uskutečněním provozu.“ [57]

Podkategorie „otevřené“ kategorie provozu	Štítek s označením třídy typu dronu
A1 Urbanistické oblasti, ale ne nad davy, nebo mimo urbanistické oblasti	Štítek s označením třídy C0, C1
	Soukromě zhotovený dron s MTOM < 250 g a rychlostí < 19 m/s
	Dron bez štítku s označením třídy s MTOM < 500 g (do 1. ledna 2023)
A2 Urbanistické oblasti při udržování nejméně 30 m (ve zvláštních případech až 5 m) od lidí, nebo mimo urbanistické oblasti	Dron bez štítku s označením třídy s MTOM < 250 g včetně paliva a užitečného zatížení. (od 1. ledna 2023)
	Štítek s označením třídy C2
A3 Mimo urbanistické oblasti	Dron bez štítku s označením třídy s MTOM < 2 kg (do 1. ledna 2023) (minimální vzdálenost od osob je v tomto případě navýšena na 50 m)
	Štítek s označením třídy C2, C3, C4
	Soukromě zhotovený dron s MTOM < 25 kg rychlost < 19 m/s
	Dron bez štítku s označením třídy s MTOM < 25 kg

Obrázek 8 Podkategorie "otevřené" kategorie provozu [57]

„**Specifická (Specific) kategorie** je kategorie provozu bezpilotních systémů, u kterých je s ohledem na související rizika vyžadováno povolení příslušného úřadu (v případě ČR Oprávnění k provozu vydané Úřadem pro civilní letectví) před uskutečněním provozu, s uvážením zmírňujících opatření identifikovaných v posouzení provozního rizika.“ [58]

„**Certifikovaná (Certified) kategorie** je kategorie provozu bezpilotních systémů, u kterých s ohledem na související rizika je vyžadována certifikace bezpilotního systému, osvědčení způsobilosti dálkově řídicího pilota a schválení provozovatele příslušným úřadem, aby byla zajištěna odpovídající úroveň bezpečnosti.“ [59]

10.2 Nástroje na kontrolu vzdušného prostoru

Řízení letového provozu České republiky vytvořilo speciální modul webové aplikace jménem **AisView**, ve kterém může provozovatel bezpilotních letadel najít informace o omezeních v jednotlivých zónách [60]. AisView je volně dostupný pro každého na webových stránkách [61]. Jelikož bylo potřeba aktualizovat AisView z důvodu modernizace a změn v legislativě, byla vytvořena nová webová aplikace DronView. AisView a DronView lze vidět na *Obrázek 9*, resp. *Obrázek 10*.

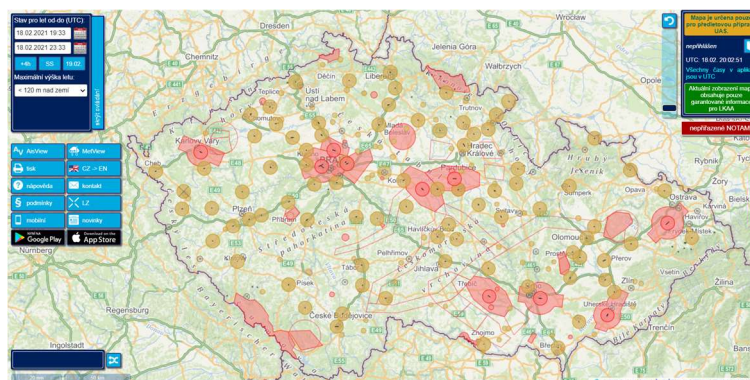


Obrázek 9 Webová stránka AisView [61]

DronView

Nová aplikace DronView, zahrnující změny legislativy platné od 31.12.2020 byla spuštěna 04.01.2021 [62]. Jedná se o mapový nástroj provozovaný Řízením letového provozu s. p., který slouží k předletové přípravě dálkově řídicích pilotů UAS v ČR. Obsahuje informace o omezení letových činností, a to ve vztahu ke vzdušnému prostoru pro:

- Řízené okrsky (CRT a MCTR) a koncové řízené oblasti (TMA)
- Letištní provozní zóny (ATZ) neřízených letišť
- Zakázané prostory (LKP), omezené prostory (LKR), nebezpečné prostory (LKD) a jiným uživatelem aktivované dočasně vyhrazené prostory (TSA a dočasně rezervované prostory (TRA)
- Heliporty a plochy SLZ, PGT a PG



Obrázek 10 Webová stránka DronView [60]

11 Praktická část

Praktická část bakalářské práce je rozdělena do dvou částí. V první části je navržen algoritmus, kterým se budou drony řídit. Navržený algoritmus je simulován v simulaci naprogramované pro tuto bakalářskou práci v objektově orientovaném programovacím jazyce Processing [63]. V druhé části je proveden návrh dronu z hardwarového a komunikačního hlediska a způsobu řízení, tak aby dokázal splnit úkol, který je popsán níže.

Zadání úkolu

Úkolem roje dronů je lokalizovat osobu v bezvědomí, ztracenou v nepřátelském prostředí, bez žádné použitelné komunikační infrastruktury, které se aktivoval SOS signál. Aby se minimalizovala možnost odhalení nepřítelem musí se roj shromáždit co nejbliž k sobě. Poté co se shromáždí, začnou snímat sílu vysílaného SOS signálu. Nakonec tuto informaci předají záchrannému týmu. Protože není známo kolik dronů bude možné aktivovat, je potřeba navrhnout algoritmus, podle kterého se budou řídit drony, tak aby fungoval pro jakékoliv množství dronů s reálnou horní hranicí 30 dronů.

Zadání simulace

Po vytvoření algoritmu se vytvoří simulace, která se zaměří na problematiku řídicího algoritmu a triangulace bodu. To znamená, že nebude brát v potaz některé prvky a akce z reálného prostředí. Takovými prvky jsou vítr, realistické zrychlování, latence komunikace atp. Akcemi se myslí např. vzlet, přistání, vyhýbání se jiným překážkám než ostatním dronům. Simulace má za úkol vizuálně zobrazit fungování algoritmu a určit od jakého množství dronů je průměrná chyba menší než jedna pětina odchylky při měření.

12 Návrh algoritmu

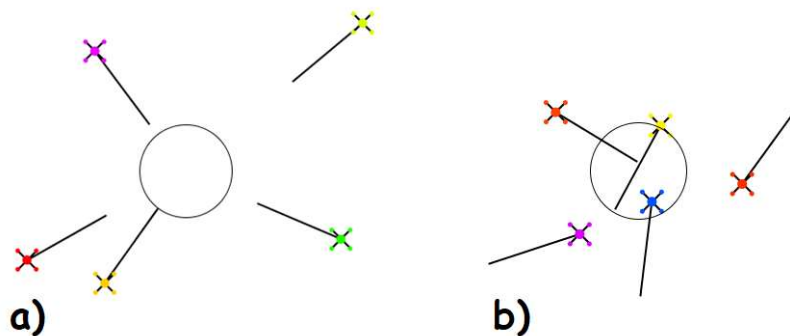
Algoritmus vychází z pravidel použitých v simulaci hejna ptáků nazvanou boids, kterou vytvořil Craig Reynolds. Přesněji, využívá pravidla separace a koheze. Způsob, jakým tato pravidla fungují je popsán v kapitole 3.3.1 *Hejno ptáků a ryb*. Návrh je konstruován podobně jako algoritmus *grafcet* [64]. Podobnost spočívá v tom, že je algoritmus rozdělen do kroků. Přejít do dalšího kroku je podmíněn splněním přechodové podmínky pro daný krok. V tomto případě však není algoritmus zacyklen.

Algoritmus je rozdělen do tří kroků:

1. Formování
2. Lokalizace
3. Sběr a vyhodnocení dat

Formování

V prvním kroku, nazvaném formování, se všichni jedinci, kteří spolu komunikují, přesunou do určité vzdálenosti od průměrné pozice všech jedinců. V *Obrázek 11* lze vidět úsečku u každého jedince, která udává směr pohybu. V případě a) všechny úsečky směřují ke středu roje čili průměrné pozici všech jedinců. V případě b) lze vidět modrého jedince, který již doletěl do určité vzdálenosti ke středu roje, avšak přiletěl k němu moc blízko žlutý jedinec. Proto se teď snaží dostat to bezpečné vzdálenosti.



Obrázek 11 První krok algoritmu – formování; a – koheze; b – separace

Pravidla tohoto kroku jsou:

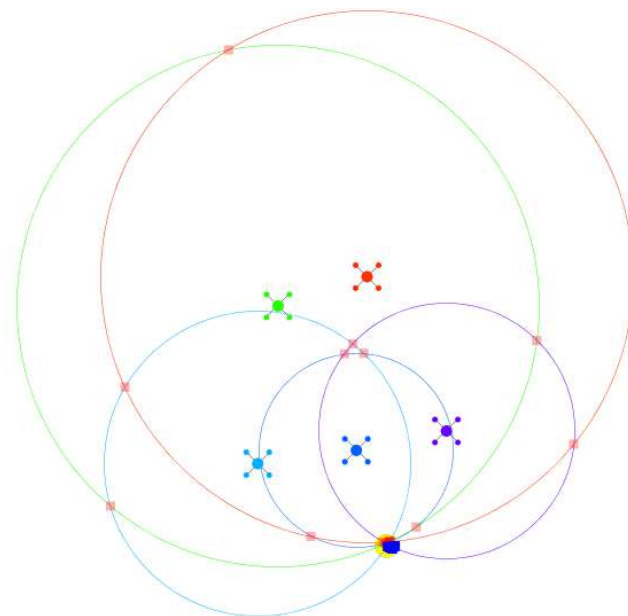
- Když je moc daleko od středu roje
 - ↳ zrychluj určitou silou směrem do středu roje
- Když je moc blízko k sousedním jedincům
 - ↳ zrychluj určitou silou směrem od průměrné pozice těchto jedinců

Lokalizace

Druhý krok lokalizace spočívá v tom, že se dron snaží udržet na jednom místě, aby proběhlo měření co nejpřesněji. Přitom probíhá měření síly signálu. Pokud by byl senzor pouze na jedné straně, mohlo by být v tomto kroku zahrnuto několikanásobné měření, vždy s pootočením na stranu s větší silou signálu.

Pravidlo tohoto kroku je:

- Proveď měření tolikrát, dokud neproběhne úspěšné naměření síly signálu



Obrázek 12 Krok sběr a vyhodnocení dat

Sběr a vyhodnocení dat

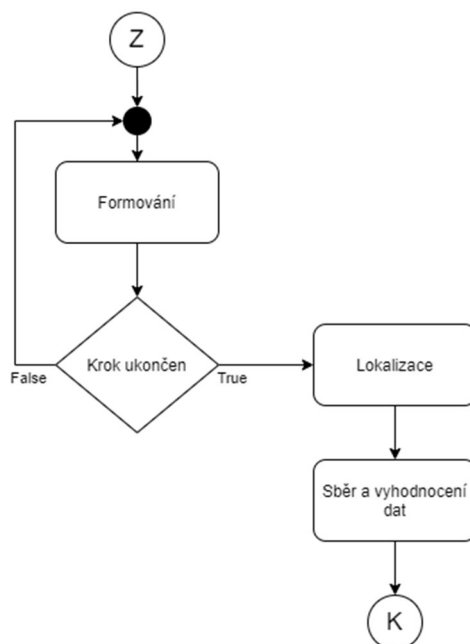
Posledním krokem ze strany jedinců je sběr dat. Druhá část kroku, vyhodnocení dat, proběhne na serveru. Sběr dat proběhne tak, že každý dron pošle informace o měření na server. Tuto akci provede tři-krát s pětisekundovým rozestupem. Také je možné změnit tuto podmínku na – tuto akci provede každých deset sekund, dokud nedostane potvrzení o přijetí od serveru. Způsob vyhodnocení informací serverem přijatých od všech jedinců je vidět na *Obrázek 12*.

Pravidlo tohoto kroku je:

- Pokud je počet poslaných zpráv menší než tři
 - └ pošli informace o měření na server a počkej pět sekund

13 Simulace

Simulace je naprogramovaná v programovacím jazyce Processing, který je podobný Javě a je na ní také postaven [63]. Programovací jazyk Processing vznikl za účelem přiblížení programování umělecky zaměřeným studentům, pro které by bylo zbytečně přehnané učit se čistou Javu. Základem programu v Processing jsou funkce `setup()`, která na začátku proběhne jednou a `loop()`, která je volaná stále dokola. Jako jednotky jsou v simulaci použity pixely, které je možné interpretovat v poměru 1 : 2 jako centimetry (jeden pixel jsou dva centimetry).



Simulace je naprogramovaná tak, že v objektu Simulace je metoda Krok, která se volá stále dokola a tím simuluje ubíhání času. Uvnitř metody Krok se podle pravidel stanovených v kapitole 12 *Návrh algoritmu* rozhoduje, který krok je v dané době aktivní. V *Obrázek 13* je vidět, že krok Formování může proběhnout vícekrát, zatímco Lokalizace a Sběr a vyhodnocení dat pouze jednou. To je z toho důvodu, že se v simulaci předpokládá pouze chyba v měření, ale obecně měření je úspěšné ihned na první pokus. To samé platí pro Sběr a vyhodnocení dat, simulace předpokládá úspěch po prvním odeslání dat na server. Ukázku kódu kroku formování lze vidět v *příloze A*, dále ukázku kódu kroku lokalizace v *příloze B*.

Jak je zřejmé z entity-relationship diagramu v *příloze C*, v objektu Dron probíhají všechny výpočty, které mají jako vstupy unikátní vlastnosti, jako je například pozice jedince. V objektu simulace jsou agregované funkce z Dronu, které by pouze počítaly to samé stále dokola. Příkladem je výpočet průměrné pozice roje, která je pro všechny drony stejná, a je proto netřeba ji počítat vícekrát. Většina parametrů, které jsou zásadní při výpočtech, a také různé parametry v UI lze změnit v nastavení. Další informace o nastavení parametrů jsou blíže popsány v následující kapitole 13.1 *Parametry simulace*.

13.1 Parametry simulace

V souboru s názvem *settings.txt*, viz příloha F, jsou uloženy parametry, které může uživatel měnit. Pro načtení nastavení do simulace se v okně simulace zmáčkne tlačítko *Load settings*, které lze vidět v příloze E. Soubor s nastavením je uložen v root složce simulace. Formát nastavení je ve stylu *parametr=hodnota* např. *droneCount=10*. Jak nejdůležitější parametry, tak výsledek simulace je vidět v levém dolním rohu okna simulace.

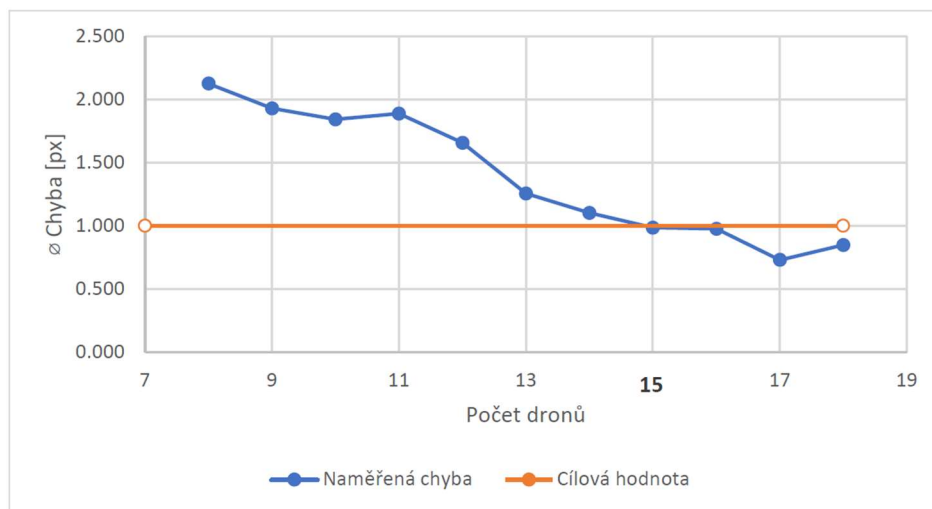
Parametry simulace jsou (optimální hodnoty jsou nastaveny jako defaultní):

- **worldSize** – velikost simulovaného světa; ovlivňuje také velikost okna simulace
- **droneCount** – počet dronů, které se budou simulovat
- **droneSize** – vizuální velikost dronu
- **droneCollisionRange** – vzdálenost na kterou si bude dron držet odstup od ostatních
- **gatherCircleRadius** – minimální vzdálenost od středu roje do které se bude snažit doletět v prvním kroku
- **droneMaxSpeed** – maximální rychlost dronu
- **droneCenterPower** – středová síla; určuje velikost síly, která působí na dron ve směru středu roje
- **droneCollisionPower** – síla střetu; určuje velikost síly, která působí na dron ve směru od dronů, které jsou blíže, než je *droneCollisionRange*
- **signalError** – chyba signálu; určuje nepřesnost při měření polohy signálu
- **threshholdMult** – násobek prahu; koeficient kterým se násobí chyba signálu; používá se pro nalezení průsečíků okolo signálu, při triangulaci
- **signalSize** – velikost signálu; určuje vizuální velikost signálu (žluté kolečko)
- **maxError** – maximální chyba; podle maximální chyby se určuje, zda proběhla simulace úspěšně čili zda byl nalezený signál lokalizován s dostatečnou přesností
- **buttonFontSize** – velikost fontu tlačítek

13.2 Vyhodnocení výsledků

Jedním požadavkem je, ať se drony po celou dobu prvního kroku drží v bezpečné vzdálenosti od zbytku jedinců, zároveň se přibližují ke středu roje na určenou vzdálenost. Dalším z požadavků na použitý algoritmus je, aby byl škálovatelný, a to alespoň pro roj o 30 jedincích. Simulace proběhla v obou ohledech pro tři až třicet dronů úspěšně. Ze simulace je také možné vyzorovat fakt, že se s vyšším počtem jedinců, kteří se podílejí na hledání signálu, snižuje výsledná chyba nalezené polohy. Tato skutečnost nahrává možnému budoucímu použití roje dronů v terénu.

Po vyhodnocení simulací pro roje s osmi až osmnácti jedinci, kde pro každý počet jedinců proběhla simulace desetkrát, lze dojít k závěru, že pro udržení průměrné chyby v měření pod jednou pětinou odchylky měřících přístrojů, je potřeba roj o minimální velikosti 15 dronů. Průběh průměrné naměřené chyby lze vidět v *Obrázek 14* a data jsou dostupná v *příloze D*. Lze očekávat, že při optimalizaci vzdálenosti jedinců mezi sebou lze dosáhnout lepších výsledků s nižším počtem dronů. V této oblasti je mnoho prostoru pro zlepšení. Jak je možné z grafu vyčíst, průměrná chyba pro 18 dronů je vyšší, než pro 17 dronů. To může být způsobeno náhodnou odchylkou, která by se ztratila při provedení většího počtu simulací. To samé lze pozorovat u průměrné chyby pro 10 a 11 dronů.



Obrázek 14 Grafické zobrazení průměrné naměřené chyby v simulaci

13.3 Limitace a nedostatky simulovaného prostředí

V simulaci lze pozorovat nedostatky, které nejsou v případě této bakalářské práce omezující. Simulace je vytvořena za účelem ověření konceptu navrženého algoritmu. Tudiž jsou v simulaci zanedbány vnější vlivy a limitace komunikace. Vlivem prostředí se rozumí výdrž baterie, existence překážek, proudění vzduchu, přesnost GPS atp. Limitacemi komunikace jsou například přenosová rychlost, ztráta paketů atp. Další rozšíření simulace je možné, ale je k tomu zapotřebí seznámit se se strukturou simulace. Rozšíření, nebo úprava se poté provede samotnou změnou zdrojového kódu. Při větším počtu jedinců se zvyšuje šance, že se dva jedinci vytvoří moc blízko k sobě. Také se může stát, že vzdálenost mezi nimi bude menší než velikost jedince. Algoritmus však, při nastavení adekvátních parametrů, všechny jednice do začátku druhého kroku oddělí na vzdálenost větší, než je velikost jedince. Použitý algoritmus na nalezení hledaného bodu pomocí triangulace není, s časovou složitostí $\Theta(n!)$, optimální pro simulaci většího počtu dronů.

14 Návrh dronu

Jsou tři věci, které se při návrhu dronu vhodného pro použití v roji řeší: 1) způsob řízení, 2) způsob komunikace, 3) výběr komponent. Nejlépe je postupovat v daném pořadí nebo od konce. Většinou je totiž daný buď způsob řízení, nebo jsou již vybrané komponenty. Všechny prvky by měly být co nejjednodušší na sestavení. Cílem tohoto návrhu je předvést, že roj dronů lze sestavit z běžně dostupných komponent. Komunikační část je zaměřená na výběr vhodného protokolu a topologie. Orientačně se určí velikost posílaných dat.

14.1 Způsob řízení

Vzhledem k jednoduchosti algoritmu je možné i při použití levnějšího hardware nechat proces rozhodování v dronech. V případě, že by bylo rozhodování přesunuto do centrálního serveru, který by pouze vysílal příkazy, by se navíc musela otestovat komunikace. Probíhalo by totiž mnohonásobně více komunikace jak ze strany serveru k dronům, tak i zpět, což by mohlo přetěžovat síť.

Protože bude všechna rozhodovací činnost probíhat lokálně, je potřeba vybavit všechny drony počítačem, který zvládne zpracovávat příchozí komunikaci a zpracovávat data ze senzorů. Při tom by měl být dron schopen stíhat plánovat další kroky pomocí vytvořeného řídicího algoritmu a výsledné akce interpretovat pomocí ESC a dalších modulů.

14.2 Komunikace

Jedinci budou posílat dva typy paketů: 1) pro zbytek roje a 2) pro základní stanici. Oba typy paketů si jsou velice podobné, jak je možné vidět v *Tabulka 4* a *Tabulka 5*.

Název	Velikost (byte)
ID dronu	4
Časové razítko	8
Aktuální poloha	8
Status	4
Celkem	24 byte

Tabulka 4 Informační paket pro roj

Informační paket pro roj

Jedinci si mezi sebou musejí vyměňovat informace o poloze a svém statusu (připraven, pohyb). Aby se zamezilo chybě v rozhodování z důvodu použití dat ze starých zpráv je v paketu časové razítko. A aby bylo možné spojit paket s jedincem, je v tomto paketu přítomno ID dronu.

Informační paket pro základní stanici

Se základní stanicí budou jedinci komunikovat pouze po naměření síly signálu, a to za účelem shromáždění naměřených dat, které se poté vyhodnotí. Při výpočtu polohy pomocí triangulace bude potřeba aktuální poloha dronu v prostoru, změřená síla signálu, časové razítko a ID dronu – pro stejný důvod jako v paketu pro zbytek roje.

Název	Velikost (byte)
ID dronu	4
Časové razítko	8
Aktuální poloha	8
Změřená síla signálu	8
Status	4
Celkem	32 byte

Tabulka 5 Paket základní stanici

14.3 Výběr komponent

V Tabulka 6 jsou uvedeny dostupné možnosti pro každý komponent s jeho sledovanými parametry a cenou. Z uvedených možností je vybrán nejvhodnější komponent. Důraz je kladen na vytvoření stabilního, levného dronu. Výhodou z hlediska vytvoření vlastního řídicího algoritmu jsou open source projekty s aktivní komunitou.

Název	Cena	Váha	Modul	Max. odběr proudu	Stabilní / FPV
Flycolor X-Cross BL-32 35A	CZK 259	N/A	ESC	35 A	FPV
Flycolor X-CROSS BL-32 36A	CZK 293			36 A	FPV
Turnigy Plush-32 30A	CZK 259			30 A	Stabilní
				Takt	Připraveno k použití
Arduino Pro Mini 328	CZK 260	9 g	Flight controller	16 MHz	ne
Foxeer F722 V2 FPV	CZK 643	18 g		216 MHz	ano
				Takt	RAM
Arduino MEGA	CZK 906	37 g	Palubní PC	16 MHz	8 KB
Raspberrypi pico	CZK 109	32 g		133 MHz	2 MB
Raspberrypi 4B	CZK 1 059	50 g		1500 MHz	4 GB
				Přesnost	
GPS NEO-6M GYNEO6MV2	CZK 195	7 g	GPS Modul	±2.5 m	
				Frekvenční rozpětí	Přesnost
AD8318 RF Logarithmic Detector	CZK 283	10 g	Detektor signálu	1 MHz až 8 GHz	±1 dB
				Dosah	Přenosová rychlost
Xbee S2C	CZK 587	4.7 g	Komunikační modul	> 1 Km	5 Mbps

FPV - anglicky first person view, tyto ESC se používají pro závodní drony

zdroj: amazon.com a hobbyking.com

Tabulka 6 Komponenty a jejich sledované parametry

ESC

Jako ESC modul byl nejlepší možností *Turnigy Plush-32 30 A*, pro svou cenu, a hlavně proto, že se druhé dva moduly zaměřují na FPV drony. Pro splnění zadaného úkolu není třeba rychlých dronů, ale spíše dronů stabilních.

Flight controller

Protože je v roji více než jeden dron, vychází výhodněji *Arduino Pro Mini 328*. Toto Arduino je upravená verze, vhodná pro použití v UAV. Bez otestování nelze určit, zda zde bude nižší takt hrát negativní roli, či zdali nezpůsobí, že dron nebude schopen stabilního letu.

Palubní PC

V palubním počítači poběží řídicí algoritmus, bude také komunikovat přes komunikační modul se zbytkem roje a zpracovávat komunikaci. Také je třeba dbát na spotřebu energie, kterou ovlivňuje takt a váha počítače. Dobrým kompromisem mezi rychlostí, váhou a cenou se zdá být *Raspberrypi pico*.

Ostatní

Podle vybraného počítače je možné vybrat zbytek modulů. V tomto případě jsou vybrané moduly ty, které jsou nejvíce zmiňovány v různých komunitních fórech. Nepřesnost GPS modulu je přijatelná v případech, kdy je nastaven velký rozestup mezi jedinci. Detektor signálu je modul specifický pro zadaný úkol (triangulace signálu). A nakonec komunikační modul XBee S2C je modul schopný komunikovat přes několik různých protokolů. Nabízí také nadstavbu pro komunikaci v mesh síti. Není tedy potřeba starat se o tuto část problému.

15 Závěr

Cílem teoretické části bylo analyzovat, definovat a popsat koncept emergence a rojové robotiky. Rojová robotika, do značné míry, vychází z pozorování přírody. Například z pozorování komplexního chování kolonií a skupin zvířat, nebo složitého systému spolupráce jednotlivých buněk organismů. Proto jsou ihned na úvod popsány příklady rojové inteligence v přírodě, které se často aplikují při tvorbě rojů bezpilotních vozidel a letounů. Stejně jako v přírodě dochází i v rojové robotice k přenosu informací mezi jedinci. Proto se následné kapitoly zabývají způsoby bezdrátové komunikace a strukturou posílaných dat.

Z provedené analýzy vyplývá, že i když je o rojovou robotiku v posledních letech zvýšený zájem, je to stále odvětví plné teorií, a konceptů ověřených v simulovaném prostředí, čekajících na implementaci v reálném světě. Velkou limitací se zdá být omezená kapacita dostupných akumulátorů, která neumožňuje lety delší než jednotky minut. Další limitací je velká šance poškození drahého vybavení. Drony mohou letět vysoko, poměrně velkou rychlostí a při nesprávném nastavení algoritmu může dojít ke srážce.

Informace z teoretické části jsou v praktické části použity pro vytvoření algoritmu, schopného řídit z palubního počítače rozhodovací proces dronu, který by společně s neurčitým počtem dalších dronů, tvořil jedince existujícího a kooperujícího v roji. V roji vykazujícím komplexní chování za použití jednoduchých pravidel. Pro vytvořený algoritmus se poté naprogramovala simulace, která měla za úkol zjistit, zda je schopen teoreticky splnit zadaný úkol. Nesmírnou výhodou simulace je možnost jednoduše měnit konstanty použité ve výpočtech a tím najít optimální nastavení pro daný roj. Toho bylo využito pro zjištění optimálního množství dronů za podmínky maximální průměrné chyby při měření signálu. Poté co se v simulaci navržený algoritmus ověřil, byl sestaven návrh dronu i z hardwarové stránky. Velký důraz byl dbán na použití open-source nástrojů a jednoduše programovatelných modulů.

Při procesu návrhu algoritmu vyšlo najevo, že vytvořit obecný návrh, který se zaměřuje na úplný základ, je jednoduché. Avšak reálně použitelný řídicí algoritmus musí řešit detaily, jako jsou latence v komunikaci či korekce pohybu způsobené povětrnostními podmínkami, a to přidává algoritmu velmi rychle na složitosti.

Roj běžně čítá desítky jedinců, kteří se čas od času rozbijí, proto je žádané snižovat pořizovací cenu na minimum. Z hardwarového hlediska se ukázalo, že když se při návrhu systém zbytečně nepředimenzuje, mohou se jen například u palubního počítače při nákupu ušetřit stovky korun.

Námětem pro toho, kdo by chtěl pokračovat v této práci je použít algoritmus a hardware popsány v praktické části a vytvořit prototyp schopný letu a kooperace v roji. Samozřejmě, pro doopravdy autonomní jednotku, bude nutné algoritmus upravit tak, aby zahrnoval i fázi vzletu a přistání, které nejsou, kvůli omezenému rozsahu této práce, zahrnuty.

16 Seznam použitých zdrojů

- [1] DORIGO, Marco a Mauro BIRATTARI. Swarm intelligence. *Scholarpedia* [online]. 2007, **2**(9) [cit. 2021-04-30]. ISSN 1941-6016. Dostupné z: [doi:10.4249/scholarpedia.1462](https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1462)
- [2] BONABEAU, E., M. DORIGO a G. THERAULAZ. *Swarm intelligence*. New York: Univerzity Press, 1999. ISBN 0-19-513159-2.
- [3] HAMANN, Heiko. *Swarm Robotics: A Formal Approach* [online]. Springer, Cham, 2018 [cit. 2021-04-30]. ISBN 978-3-319-74528-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74528-2>
- [4] The International System of Units (SI). *Bureau International de Poids et Mesures* [online]. Sèvres: Bureau International de Poids et Mesures, 2018 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/>
- [5] MITRA, Asoke, ed. *Few body dynamics* [online]. North Holland: North Holland, 1976 [cit. 2021-04-30]. ISBN 9780444601094. Dostupné z: ScienceDirect
- [6] Obrázek včelího roje. In: *Pxfuel* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.pxfuel.com/en/free-photo-oefaz>
- [7] Obrázek hejna divokých hus. In: *Pixabay* [online]. 2016 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://pixabay.com/photos/geese-flock-of-birds-bird-birds-1171581/>
- [8] RIFA Raft After Heavy Rain. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/>
- [9] LENAU, Torben a Thomas HESSELBERG, Akhlesh LAKHTAKIA, Raúl J. MARTÍN-PALMA. Chapter 13 - Biomimetic Self-Organization and Self-Healing. In: *Engineered Biomimicry* [online]. Elsevier, 2013, s. 333-358 [cit. 2021-04-30]. ISBN 9780124159952. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415995-2.00013-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415995-2.00013-1)
- [10] REYNOLDS, Craig W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* [online]. 1987, **21**(4), 25-34 [cit. 2021-04-30]. ISSN 0097-8930. Dostupné z: [doi:10.1145/37402.37406](https://doi.org/10.1145/37402.37406)
- [11] POSPÍŠIL, Jan. *Modelování hejn* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/uxxnh/>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky. Vedoucí práce Radek PELÁNEK.

- [12] GIRAUD, T., J. S. PEDERSEN a L. KELLER. Evolution of supercolonies: The Argentine ants of southern Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2002, **99**(9), 6075-6079 [cit. 2021-04-30]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.092694199
- [13] RUSSELL, R.A. Ant trails - an example for robots to follow?. In: *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)* [online]. IEEE, 1999, s. 2698-2703 [cit. 2021-04-30]. ISBN 0-7803-5180-0. Dostupné z: doi:10.1109/ROBOT.1999.774005
- [14] TRIPET, Frederic a Peter NONACS. Foraging for Work and Age-Based Polyethism: The Roles of Age and Previous Experience on Task Choice in Ants. *Ethology* [online]. 2004, **110**(11), 863-877 [cit. 2021-04-30]. ISSN 0179-1613. Dostupné z: doi:10.1111/j.1439-0310.2004.01023.x
- [15] VRIONIDES, Pavlos. *Swarm Intelligence: An Artificial Life Simulator...* [online]. Sheffield, 2006 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: DOI:10.1.1.124.7554. Diplomová práce. The University of Sheffield. Vedoucí práce Dr. Amanda Sharkey.
- [16] HOLMAN, Luke, Stephanie DREIER a Patrizia D'ETTORRE. Selfish strategies and honest signalling: reproductive conflicts in ant queen associations. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* [online]. 2010, **277**(1690), 2007-2015 [cit. 2021-05-01]. ISSN 0962-8452. Dostupné z: doi:10.1098/rspb.2009.2311
- [17] DORIGO, Marco a Erol ŞAHIN. Guest Editorial. *Autonomous Robots* [online]. 2004, **17**(23), 111-113 [cit. 2021-05-01]. ISSN 0929-5593. Dostupné z: doi:10.1023/B:AURO.0000034008.48988.2b
- [18] DE HAAN, J. How emergence arises. *Ecological Complexity* [online]. 2006, **3**(4), 293-301 [cit. 2021-05-01]. ISSN 1476945X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecocom.2007.02.003
- [19] BEDAU, Mark A. Weak Emergence. *Noûs* [online]. 1997, **31**, 375-399 [cit. 2021-05-01]. ISSN 00294624. Dostupné z: doi:10.1111/0029-4624.31.s11.17
- [20] WITKOWSKI, Olaf, Takashi IKEGAMI a Dante R. CHIALVO. Emergence of Swarming Behavior: Foraging Agents Evolve Collective Motion Based on Signaling. *PLOS ONE* [online]. 2016, **11**(4) [cit. 2021-05-01]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0152756

- [21] EBERHART, R. a J. KENNEDY. A new optimizer using particle swarm theory. In: *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* [online]. IEEE, 1995, s. 39-43 [cit. 2021-05-01]. ISBN 0-7803-2676-8. Dostupné z: doi:10.1109/MHS.1995.494215
- [22] TU, Xiaoyuan a Demetri TERZOPOULOS. Artificial fishes. In: *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '94* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 1994, s. 43-50 [cit. 2021-05-01]. ISBN 0897916670. Dostupné z: doi:10.1145/192161.192170
- [23] OLSON, Randal S., Arend HINTZE, Fred C. DYER, David B. KNOESTER a Christoph ADAMI. Predator confusion is sufficient to evolve swarming behaviour. *Journal of The Royal Society Interface* [online]. 2013, **10**(85) [cit. 2021-05-01]. ISSN 1742-5689. Dostupné z: doi:10.1098/rsif.2013.0305
- [24] PLATHOTTAM, Siby Jose a Prakash RANGANATHAN. Next generation distributed and networked autonomous vehicles: Review. In: *2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)* [online]. IEEE, 2018, s. 577-582 [cit. 2021-05-01]. ISBN 978-1-5386-1182-1. Dostupné z: doi:10.1109/COMSNETS.2018.8328277
- [25] CAMPION, Mitch, Prakash RANGANATHAN a Saleh FARUQUE. UAV swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* [online]. 2019, **7**(2), 93-106 [cit. 2021-05-01]. ISSN 2291-3467. Dostupné z: doi:10.1139/juvs-2018-0009
- [26] M. ALPHAN, Ulusoy. *Optimal temporal logic control of autonomous vehicles* [online]. Boston, 2014 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/2144/12242>. Disertace. Boston University.
- [27] LINN, Allison. Science mimics nature: Microsoft... AI-controlled soarnig machine. *Microsoft* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://news.microsoft.com/>
- [28] E. PARKER, Lynne. Current State of the Art in Distributed Autonomous Mobile Robotics. In: E. PARKER, Lynne, Bekey G. a Barhen J. *Distributed Autonomous Robotic Systems 4* [online]. Tokyo: Springer, 2000, s. 3-12 [cit. 2021-05-01]. ISBN 978-4-431-67919-6. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/978-4-431-67919-6_1
- [29] OTA, Jun. Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems. *Advanced Engineering Informatics* [online]. 2006, **20**(1), 59-70 [cit. 2021-05-01]. ISSN 14740346. Dostupné z: doi:10.1016/j.aei.2005.06.002

- [30] HIRATA, Y., K. KOSUGE, H. ASAMA, H. KAETSU a K. KAWABATA. Coordinated transportation of a single object by multiple mobile robots without position information of each robot. In: *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)* [online]. IEEE, 2000, s. 2024-2029 [cit. 2021-05-01]. ISBN 0-7803-6348-5. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2000.895268
- [31] CHAIMOWICZ, Luiz, Vijay KUMAR a Mario F. M. CAMPOS. A Paradigm for Dynamic Coordination of Multiple Robots. *Autonomous Robots* [online]. 2004, **17**(1), 7-21 [cit. 2021-05-01]. ISSN 0929-5593. Dostupné z: doi:10.1023/B:AURO.0000032935.30271.a5
- [32] NAGAO, Y., H. OHTA, H. URABE, S. NAKANO, S. KUMAGAI, T. USHIO a S. TAKAI. Net-based cooperative control for autonomous distributed systems. In: *ETFA '94. 1994 IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. (SEIKEN) Symposium) -Novel Disciplines for the Next Century- Proceedings* [online]. IEEE, 1994, s. 350-357 [cit. 2021-05-01]. ISBN 0-7803-2114-6. Dostupné z: doi:10.1109/ETFA.1994.401990
- [33] DOHERTY, P., P. HASLUM, F. HEINTZ, T. MERZ, P. NYBLOM, T. PERSSON a B. WINGMAN. A Distributed Architecture for Autonomous Unmanned Aerial Vehicle Experimentation. In: ALAMI, R., R. CHATILA a H. ASAMA. *Distributed Autonomous Robotic Systems 6* [online]. Tokyo: Springer, 2007, s. 233-242 [cit. 2021-05-01]. ISBN 978-4-431-35873-2. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/978-4-431-35873-2_23
- [34] PRASAD, T., Emaad ZAHUGI a Dr PRASAD. Advanced Communication Protocols For Swarm Robotics: A Survey. *International Journal of Engineering Research and Applications* [online]. **2012**(2), 119 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: ResearchGate
- [35] Battery Management Systems BMS & Battery Packs. *Unmanned Systems Technology* [online]. EchoBlue, c2011-2021 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/>
- [36] FAZELDEHKORDI, Elahe, I. S. AMIRI a Oluwatobi AYODEJI AKANBI. *A Study of Black Hole Attack Solutions* [online]. Syngress, 2015 [cit. 2021-05-01]. ISBN 9780128053799. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128053676>

- [37] BISWAS, Kamanashis a M. L. ALI. *Security Threats in Mobile Ad Hoc Network* [online]. Karlshamn, 2007 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: [oai:DiVA.org:bth-5926](https://oai.DIVA.org/bth-5926). Dissertation. Blekinge Institute of Technology, School of Engineering, Department of Interaction and System Design. Vedoucí práce Rune Gustavsson.
- [38] BHATTACHARYYA, Aniruddha, Arnab BANERJEE, Dipayan BOSE, Himadri N. SAHA a Debika BHATTACHARJEE. *Different types of attacks in Mobile ADHOC Network: Prevention and mitigation techniques* [online]. Kolkata, 2011 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1111.4090>. Research paper. Institute of Engineering and Management.
- [39] NATARAJAN, K. a G. MAHADEVAN. A succinct comparative analysis and performance evaluation of MANET routing protocols. In: *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics* [online]. Coimbatore: IEEE, 2013, s. 1-6 [cit. 2021-05-09]. ISBN 978-1-4673-2907-1. Dostupné z: [doi:10.1109/ICCCI.2013.6466159](https://doi.org/10.1109/ICCCI.2013.6466159)
- [40] W. SUVAK, David, Charles D. KNUTSON a Patrick J. MEGOWAN. IrDA infrared communications: An overview. *Counterpoint Systems Foundry: INC* [online]. ResearchGate, **1996**(96) [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/978-981-15-2693-0_18](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2693-0_18)
- [41] Specifications List. *Bluetooth* [online]. Bluetooth SIG, 2021 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/>
- [42] GHORI, M.R., T.C. WAN a G.C. SODHY. Bluetooth Low Energy 5 Mesh Based Hospital Communication Network (B5MBHCN). In: *Advances in Cyber Security: ACeS* [online]. 1132. Singapore: Springer, 2020, s. 247-261 [cit. 2021-05-01]. ISBN 978-981-15-2693-0. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2693-0_18
- [43] ABEDI, Ali, Omid ABARI a Tim BRECHT. Wi-LE. In: *Proceedings of the 18th ACM Workshop on Hot Topics in Networks* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2019, s. 117-124 [cit. 2021-05-01]. ISBN 9781450370202. Dostupné z: [doi:10.1145/3365609.3365853](https://doi.org/10.1145/3365609.3365853)
- [44] GHORI, M. R., M. A. U. RAHMAN, S. AZAD, N. QUOSTHONI a M. A. MAJID. Hybrid Communication Network Architecture for Palm Oil Supply Chain Traceability (POSCT) System. In: *Sindh University Research Journal: Science Series* [online]. 50(3D). Jamshoro: Sindh, 2018, s. 227-232 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://sujo2.usindh.edu.pk/index.php/SURJ/article/view/82>

- [45] Packet Size by Product. *DIGI* [online]. Digi, 2017 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.digi.com/support/knowledge-base/packet-size-by-product>
- [46] CORRIGAN, Fintan. Quick Drone Parts Overview Along With Handy DIY Tips. *DroneZon* [online]. DroneZon, 2020 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.dronezon.com/>
- [47] DONAHUE, Colin, Samantha KENYON, Jason LOWDEN a Benjamin WHEELER. Aerial Surveillance Drone: Power Management. In: *RIT Multidisciplinary Engineering* [online]. 2018 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/edge/C12401/public/documents/Investigations/PowerManagement.pdf>
- [48] FLYNT, Joseph. What Sensors Do Drones Use?. In: *3DInsider* [online]. DInsider, 2019 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/drone-sensors/>
- [49] Co je gyroskop. *Gyroskopy.cz* [online]. 2017 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <http://www.gyroskopy.cz/?co-je-gyroskop,24>
- [50] The High-Performance Accelerometer Brings Greater Stability to UAV Navigation and Control. In: *Inside unmanned systems* [online]. Autonomous Media, 2020 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://insideunmannedsystems.com/>
- [51] What is GPS?. *Geotab UK* [online]. Geotab, 2020 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.geotab.com/blog/what-is-gps/>
- [52] HENTSCHKE, Matheus, Edison PIGNATON DE FREITAS, Carlos HENNIG a Igor GIRARDI DA VEIGA. Evaluation of Altitude Sensors for a Crop Spraying Drone. *Drones* [online]. 2018, 2(3), 25 [cit. 2021-05-01]. ISSN 2504-446X. Dostupné z: [doi:10.3390/drones2030025](https://doi.org/10.3390/drones2030025)
- [53] AZHARI, Faris, Sam KIELY, Charlotte SENNERSTEN, Craig LINDLEY, Maciej MATUSZAK a Simon HOGWOOD. A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology* [online]. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2017, s. 419-430 [cit. 2021-05-01]. ISBN 9780992481070. Dostupné z: [doi:10.36487/ACG_rep/1710_33_Sennersten](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1710_33_Sennersten)
- [54] WANG, Junjue, Zhuo CHEN, Shilpa GEORGE, Mihir BALA, Padmanabhan PILLAI, Shao-Wen YANG a Mahadev SATYA. Bandwidth-Efficient Live Video Analytics for Drones Via Edge Computing. In: *IEEE* [online]. Seattle, 2018, s. 159-173 [cit. 2021-05-11]. ISBN 978-1-5386-9445-9. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1109/SEC.2018.00019](https://doi.org/10.1109/SEC.2018.00019)

- [55] POGRAN, Jakub. *DECENTRALIZOVANÁ LOKALIZACE AKTIVNÍCH RFID ČIPŮ SKUPINOU BEZPILOTNÍCH HELIKOPTÉR* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/68414>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Martin Saska.
- [56] JIN, Young-Hoon, Kwang-Woo KO a Won-Hyung LEE. An Indoor Location-Based Positioning System Using Stereo Vision with the Drone Camera. *Mobile Information Systems* [online]. 2018, **2018**, 1-13 [cit. 2021-05-01]. ISSN 1574-017X. Dostupné z: [doi:10.1155/2018/5160543](https://doi.org/10.1155/2018/5160543)
- [57] Otevřená kategorie (OPEN). *CAA* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2021 [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/otevrena-kategorie-open/>
- [58] Specifická kategorie (SPECIFIC). *CAA* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/specificka-kategorie-specific/>
- [59] Certifikovaná kategorie (CERTIFIED). *CAA* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/certifikovana-kategorie-certified/>
- [60] DronView. *Létejte Zodpovědně* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2020 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://letejtezodpovedne.cz/aplikace/dronview>
- [61] *AisView* [online]. Praha: Řízení letového provozu [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://aisview.rlp.cz/>
- [62] Bezpilotní letadla. *CAA* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2021 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/>
- [63] FRY, Ben a Casey REAS. Processing.org. *Processing* [online]. Boston, New York, San Francisco: Processing Foundation, 2001 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://processing.org/>
- [64] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION AND OTHERS. *GRAFCET specification language for sequential function charts*. 3.0. Global: International Standard, IEC, 2013, 109 s. 60848.
- [65] REYNOLDS, Craig. Boids. *Red3d* [online]. Reynolds Engineering & Design, 2001 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.red3d.com/cwr/boids/>

Seznam příloh

Příloha A: Ukázka kódu – první krok algoritmu.....	I
Příloha B: Ukázka kódu – druhý krok algoritmu.....	II
Příloha C: Entity-relationship model objektů v simulaci.....	III
Příloha D: Průměrná naměřená chyba v simulaci	III
Příloha E: UI simulace.....	IV
Příloha F: Soubor <i>settings.txt</i>	IV

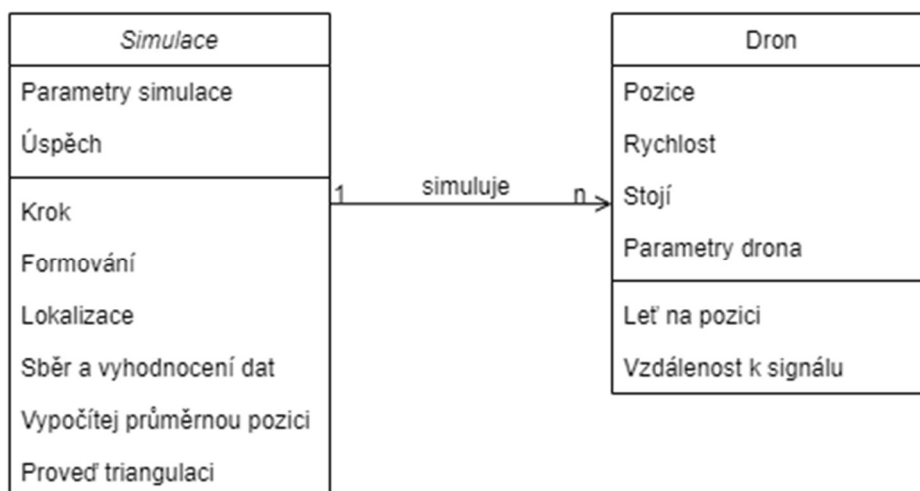
Příloha A: Ukázka kódu – první krok algoritmu

```
1 void FirstStep_Gathering() {
2   PVector averagePosition = CalculateAverageDronePosition(drones);
3   for (Drone drone : drones) {
4     drone.moveToPoint(
5       new PVector(averagePosition.x, averagePosition.y),
6       gatherCircleRadius,
7       0,
8       drones
9     );
10    drone.show();
11  }
12  boolean moving = false;
13  for (Drone drone : drones) {
14    moving = moving || !drone.stopped;
15  }
16
17  if (!moving) {
18    stepNumber++;
19  }
20
21  noFill();
22  colorMode(RGB);
23  stroke(255);
24  strokeWeight(1);
25  circle(averagePosition.x, averagePosition.y, gatherCircleRadius);
26 }
```

Příloha B: Ukázka kódu – druhý krok algoritmu

```
1 void SecondStep_LocateSignal() {
2     ShowSignal();
3     fill(0, 255, 0);
4
5     for (Drone drone : drones) {
6         drone.setDistanceToPoint(GetPointPositionWithError(signalPosition));
7     }
8     for (Drone drone : drones) {
9         drone.showFoundRadius();
10        drone.show();
11    }
12    ArrayList<PVector> allIntersections = new ArrayList<PVector>();
13    for (int i = 0; i < drones.size() - 1; i++) {
14        Drone curDrone = drones.get(i);
15        for (int j = i+1; j < drones.size(); j++) {
16            ArrayList<PVector> newIntersections =
17                IntersectTwoCircles(
18                    curDrone.position,
19                    curDrone.distance,
20                    drones.get(j).position,
21                    drones.get(j).distance
22                );
23            if (newIntersections != null) {
24                allIntersections.addAll(newIntersections);
25            }
26        }
27    }
28    ShowIntersections(allIntersections);
29    ArrayList<PVector> closestCluster = FindCluster(allIntersections);
30    this.measuredError = CalculateMeasuredError(closestCluster);
31    for (PVector intersection : closestCluster) {
32        fill(0, 0, 255);
33        rect(intersection.x, intersection.y, 8, 8);
34    }
35
36    stepNumber++;
37    snapshot = get();
38 }
```

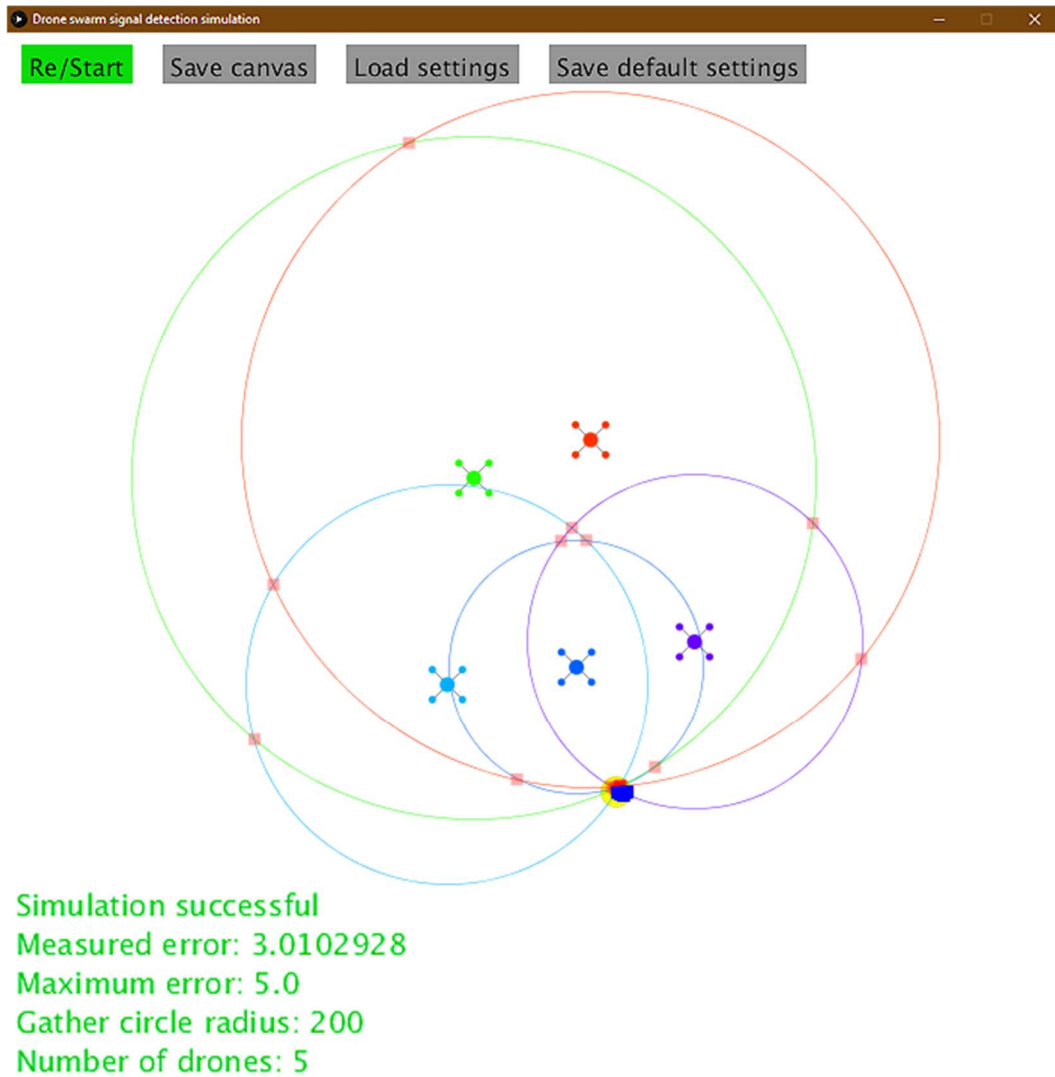
Příloha C: Entity-relationship model objektů v simulaci



Příloha D: Průměrná naměřená chyba v simulaci

Počet jedinců	Ø chyba [px]
8	2.127
9	1.930
10	1.843
11	1.890
12	1.657
13	1.256
14	1.102
15	0.986
16	0.977
17	0.731
18	0.849

Příloha E: UI simulace



Příloha F: Soubor *settings.txt*

```
1 worldSize=700.0
2 droneCount=11.0
3 droneSize=10.0
4 droneCollisionRange=80.0
5 gatherCircleRadius=260.0
6 droneMaxSpeed=1.5
7 droneCenterPower=0.2
8 droneCollisionPower=0.8
9 signalError=5.0
10 tresholdMult=3.0
11 signalSize=20.0
12 maxError=5.0
13 buttonFontSize=12.0
```