



Faculteit Bedrijf en Organisatie

Bachelorproef-Houd de dief! (met een drone). Een zoektocht naar de optimale drone voor politiediensten.
Hardware, software en juridische factoren in rekening gebracht.

Wout Maes

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor:
Jens Buysse
Co-promotor:
Koen Henderickx - Easycopters

Instelling: —

Academiejaar: 2019-2020

Tweede examenperiode

Faculteit Bedrijf en Organisatie

Bachelorproef-Houd de dief! (met een drone). Een zoektocht naar de optimale drone voor politiediensten.
Hardware, software en juridische factoren in rekening gebracht.

Wout Maes

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor:
Jens Buysse
Co-promotor:
Koen Henderickx - Easycopters

Instelling: —

Academiejaar: 2019-2020

Tweede examenperiode

Woord vooraf

Initieel had ik nooit verwacht dat ik een opleiding Toegepaste Informatica ging volgen. In mijn eerste achttien levensjaren had ik niet echt veel opgestoken van informatica. Dat ik dan besliste om informatica te gaan studeren aan de Hogeschool van Gent was dan ook een verrassing voor velen, ook voor mezelf. Maar toch ben ik blij dat ik gekozen heb voor deze richting. Ik was altijd al geïnteresseerd in het maken van nieuwe oplossingen voor alledaagse problemen. Daarom denk ik dat ik diep van binnen eigenlijk altijd al een programmeur was. De keuze voor deze opleiding is dus een goede keuze geweest voor mij. En ik ben er van overtuigd dat ik nog een boeiende carrière tegemoet ga.

Deze bachelorproef is voor mij dan ook de afsluiter van een driejarige periode waarin ik veel plezier heb beleefd en waarin veel heb geleerd. Ik ben enorm te vreden dat ik gekozen heb voor dit onderwerp. In deze bachelorproef heb ik niet enkel mij mogen verdiepen in het theoretische luik maar ook in het praktische luik. Voor mij was het enorm leerrijk om te leren hoe je een drone kan programmeren en hier allerlei alledaagse problemen kan mee oplossen. Ik ben er dan ook van overtuigd dat er in de toekomst nog veel meer scripties rond dit thema zullen geschreven worden. Voor studenten die in de toekomst ook rond dit thema willen werken raad ik aan om zo snel mogelijk te beginnen met het maken van een prototype met je eigen drone. Door het maken van je eigen prototype leer je heel snel hoe je een drone kan programmeren en wat alle mogelijkheden en beperkingen zijn.

Op drie jaar tijd heb ik enorm veel geleerd. En door mij te verdiepen in de gegeven leerstof en 's avonds en in de vakantie zelf te experimenteren met de aangeleerde leerstof, kan ik zelf zeggen dat ik een nieuwe passie heb gevonden. Daarom wil ik eerst en vooral alle lectoren van de Hogeschool Gent bedanken voor de aangename periode die ze mij de afgelopen jaren hebben geschonken. Dankzij jullie inzet zullen de komende jaren nog heel wat jonge studenten hun passie verder kunnen ontwikkelen binnen de Hogeschool Gent.

Tevens wil ik van deze gelegenheid gebruik maken om een aantal mensen te bedanken want zonder hen zou dit nooit het eindresultaat geweest zijn.

In de eerste plaats wil ik mijn promotor dhr. Jens Buysse bedanken. Dhr. Jens Buysse is de persoon die mij in de juiste richting heeft gestuurd en steeds voor kritische bemerkingen en de nodige ondersteuning heeft gezorgd. Hij heeft mij de mogelijkheid gegeven om aan deze bachelorproef te werken en zonder hem zou deze bachelorproef niet tot standgekomen zijn. Ik dank hem voor de tijd die hij voor mij heeft vrijgemaakt gedurende deze drukke en stressvolle periode. Kortom dhr. Jens Buysse heeft voor mij een nieuwe passie gecreeërd en daarvoor verdient hij mijn dank en respect.

Ten tweede zou ik mijn co-promotor willen bedanken. Dit is dhr. Koen Henderickx, zaakvoerder van Easycopters. Tijdens de coronacrisis was het niet mogelijk om fysiek af te spreken. Toch heeft dhr. Koen Hendrickx mij enorm geholpen bij het technische luik van deze bachelorproef. Daarom verdient hij hier een speciale vermelding in het voorwoord.

Wout Maes

Samenvatting

Deze bachelorproef richt zich op een zeer actueel thema in de IT-wereld. Drones komen steeds meer in opmars en de huidige generatie drones kan ongetwijfeld voor grote veranderingen zorgen in vele verschillende sectoren, gaande van verzekeringssector tot de agrarische sector. Met deze bachelorproef wensen wij dan ook bij te dragen aan de groeiende populariteit van drones in het dagelijkse leven. Maar specifiek wordt in deze scriptie een onderzoek gevoerd naar hoe politiediensten kunnen gebruik maken van drones of andere onbemande vliegende toestellen (voortaan wordt een UAV -Unmanned Aerial Vehicle- gebruikt als afkorting voor een onbemand vliegend toestel, als het specifiek gaat om de drone in de POC, dan wordt wel gewoon drone gebruikt) om een persoon te vatten die in overtreding is met de wet. Dit kan zowel betekenen dat deze persoon een misdrijf aan het plegen is of reeds een misdrijf heeft gepleegd in het verleden en daar nu voor wordt gezocht. Aangezien dit onderwerp nog redelijk nieuw is en politiediensten in België nog maar weinig gebruik maken van deze technologie bestaan er nog heel wat vragen.

Deze bachelorproef bestaat uit een theoretisch luik en een praktisch deel, ook wel de Proof Of Concept genoemd (voortaan afgekort als POC). Dit praktisch deel is te vinden op <https://github.com/WoutMaes/Bachelorproef-Houd-de-dief-Met-een-drone>. en wordt ook gepresenteerd op de verdediging van deze scriptie. De POC bevat computercode geschreven in Python om een Tello DJI drone te besturen en om ervoor te zorgen dat een persoon getraceerd kan worden met geautomatiseerde beeldverwerking tijdens de vlucht van het onbemande vliegtuig. Deze beelden worden doorgestuurd naar een intranetsite op de poort 5000 van uw lokale server. Het is dus niet meer nodig om zelf de drone te besturen.

Voor het theoretische deel van deze bachelorproef wordt er dieper ingegaan op enkel aspecten waaraan een UAV bij de politie moet voldoen. Wij denken hierbij bijvoorbeeld

aan de beveiliging van de camerabeelden die worden doorgestuurd van de UAV naar de server, maar ook aan het aspect van de levensduur van de batterijen. Tevens moeten we in acht nemen dat een UAV vaak in verschillende omstandigheden wordt gebruikt, zowel 's nachts als overdag. Of kunnen de camerabeelden om met schaduw? Deze vragen worden in deze bachelorproef onderzocht in de volgende volgorde: ten eerste gaan we kijken welke batterijen een UAV nodig heeft om goed te kunnen functioneren. Daarna gaan we dieper in op de beveiliging van een UAV. Ten derde wordt er onderzocht hoe je objecten kan detecteren en welke cameravereisten dat hiervoor nodig zijn. En ten slotte wordt er gekeken naar hoe UAV's gebruikt worden in groep, ook wel een zwerm genoemd (swarm in het Engels).

Na het onderzoek van het theoretische deel in de voorgaande paragraaf wordt er onderzocht welke onderdelen er op de markt beschikbaar zijn om een drone samen te stellen die aan al deze vereisten voldoet. Zo kunnen de politiediensten zelf de gewenste drone maken.

Het resultaat van deze scriptie is dat het mogelijk is voor politiediensten om een dief te vangen met een UAV, meer zelfs, zij kunnen er voor kiezen om hun UAV zelf samen te stellen. Zij kunnen hierbij kiezen voor een UAV die meer open source gericht is of zij kunnen kiezen voor de commercieel beschikbare oplossingen. Na het lezen van deze scriptie zou duidelijk moeten zijn dat de open source oplossingen niet de beste oplossingen zijn, behalve voor de object detectie. Voor object detectie kan er perfect gebruik gemaakt worden van OpenCV. Echter als het gaat over het kiezen van een flightcontroller en een mission controller is het beter om te kiezen voor de commercieel beschikbare alternatieven. Deze bevatten minder bugs en hebben vaak een eenvoudige SDK om te gebruiken. Bij open source oplossingen moet de gebruiker namelijk vaak nog veel zelf configureren. Tevens zou het duidelijk moeten zijn dat LiPo-batterijen altijd te verkiezen zijn en dat het MavLink-protocol niet de beste oplossing is. Daarnaast kiezen politiediensten die personen willen detecteren en volgen best voor een DSLR of een systeemcamera met een topklasse L-lens. Dit garandeert volgens dhr. Koen Henderickx de beste kwaliteit.

Het is dus perfect mogelijk voor politiediensten om een UAV te gebruiken om een persoon te detecteren en te volgen. Afhankelijk van de situatie (dag, nacht, wind, geen wind, ...) en de urgentie kunnen politiediensten kiezen welke UAV het meest geschikt is. Het is zeker niet nodig om heel veel geld uit te geven. In de POC is het gelukt om een persoon te detecteren en te volgen met een Tello DJI drone van 90 euro. Maar deze drone is niet geschikt voor in de nacht en om lange afstanden af te leggen. Op het einde van de methodologie wordt er geschreven dat een geschikte drone die dit wel kan en ook goede camerabeelden doorstuurt, een DJI N3 flight controller gebruikt en OpenCV gebruikt als object detectie software enkele duizenden euro's kost. Politiediensten kunnen er uiteraard ook voor kiezen om tussenoplossing te kiezen.

In de toekomst zal er nog veel rond dit thema gewerkt worden. Tijdens de coronacrisis werden er in verschillende landen door verschillende politiediensten en bedrijven volop gebruik gemaakt van UAV's om personen te detecteren. Hier zal de komende maanden veel over geëvalueerd worden. Wij verwachten dat dit zal leiden tot nog betere (open source) oplossingen voor de UAV markt.

In toekomstige bachelorproeven, masterproeven en doctoraten is het opportuun om dit thema verder te onderzoeken. Er zijn tal van thema's die nog verder onderzocht kunnen worden. Zoals. Hoe veilig is de communicatie tussen de UAV en het grondstation?

Inhoudsopgave

1	Inleiding	15
1.1	Probleemstelling	15
1.2	Onderzoeksvraag	16
1.3	Onderzoeksdoelstelling	16
1.4	Opzet van deze bachelorproef	16
2	Stand van zaken	17
2.1	LiPo Batterijen	18
2.2	Communicatie	20
3	Methodologie	25
3.1	Hoofdstuk 1: Proof of concept	25
3.1.1	Tello DJI	26
3.1.2	Objectdetectie: personen herkennen en volgen	27

3.1.3	Waarom geen MavLink in de POC	30
3.1.4	Afsluiten	31
3.2	Hoofdstuk 2: Een UAV samenstellen voor de politie	31
3.2.1	LiPo	31
3.2.2	Camera	32
3.2.3	Objectdetectie software	32
3.2.4	Flight controller	33
4	Conclusie	35
A	Onderzoeksvoorstel	37
A.1	Introductie	37
A.2	State-of-the-art	38
A.3	Methodologie	38
A.4	Verwachte resultaten	39
A.5	Verwachte conclusies	39
A.6	Literatuurstudie	40
B	Bibliografie	41

Lijst van figuren

2.1	MavLink-Frame, bron: wikipedia	22
2.2	Ardupilot, missionplanner, bron: https://ardupilot.org/	23
3.1	Tello DJI, bron: eigen foto	27
3.2	Haar-Cascade, bron: https://docs.opencv.org	28
3.3	Haar-Cascade, bron: https://docs.opencv.org	29
3.4	OpenCV geïmplementeerd	29
3.5	OpenCV geïmplementeerd	30

Lijst van tabellen

3.1	Eigenschappen Tello DJI Drone	27
-----	-------------------------------------	----

1. Inleiding

Deze bachelorproef is door de auteur geschreven om de politiediensten op een gepaste manier te helpen met het detecteren van verdachte personen en is geenszins bedoeld om overheden of politiediensten te helpen met het beperken van de vrijheden van hun burgers. Deze bachelorproef moet dat ook zo gelezen worden dat dit enkel kan gebruikt worden conform het Koninklijk Besluit van 22 februari 2006 betreffende de installatie en de werking van bewakingscamera's in de voetbalstadions en de Camerawet van 21 maart 2007 en het Europees verdrag tot bescherming van de rechten van de mens en de fundamentele vrijheden (EVRM).

1.1 Probleemstelling

De afgelopen jaren hebben UAV's een enorme opmars gekend bij veel hobbyisten en bedrijven. Echter hebben wij geconstateerd dat UAV's in België nog niet vaak gebruikt worden. Dit gaat waarschijnlijk in de toekomst zeer vlug veranderen. Daarom wensen wij via deze bachelorproef ook bij te dragen aan deze interessante ontwikkelingen. Veel instanties kunnen namelijk heel wat voordeel halen uit het inzetten van een UAV. Vooral politiediensten kunnen hier heel wat efficiëntiewinst bij behalen. Politiediensten moeten vaak met weinig manschappen werken en hebben niet altijd de tijd om overal te patrouilleren. Met behulp van een UAV kunnen zij een deel van die taken automatiseren en overlaten aan technologische oplossingen. Aangezien de kostprijs van een UAV goedkoper is dan het inzetten van politiemanschappen en aangezien UAV's 24 op 7 kunnen werken denken wij dat het inzetten van drone een enorme efficiëntiewinst kan opleveren voor politiediensten die vaak over weinig middelen beschikken.

1.2 Onderzoeksvraag

In deze scriptie wordt er onderzocht of het mogelijk is voor politiediensten om een dief te vangen met een UAV, meer bepaald een drone. De hoofddoelstelling is vaststellen of het mogelijk is om een dief te detecteren en te volgen met een drone, maar er worden nog enkele andere zaken onderzocht en er worden subdoelstellingen behandeld in deze scriptie. Zo zal er niet enkel onderzocht worden of het mogelijk is om een dief te vangen met een drone, er zal zelfs onderzocht worden of dit mogelijk is met een zelfgemaakte drone met behulp van open source software. Daarnaast wordt er ook dieper in gegaan op enkele technische aspecten, want het vangen van een dief houdt meer in dan enkel het rondvliegen met een drone. Wij moeten ons enkele zaken afvragen. Welke batterijen zijn het meest geschikt? Je kan namelijk niet elke vijf minuten de interventie stoppen om de batterijen op te laden. Hoe kan je communiceren met je drone? Welke flight controllers kan je zelf programmeren? Is object detectie makkelijk te gebruiken voor politiediensten? Kan je open source software gebruiken, of bevat dit te veel bugs? Welke camera is er het meest geschikt voor het detecteren van een verdachte persoon? Welke camera kan er goed overweg met mist, schaduw, nacht, ...? Al deze vragen zullen behandeld worden in deze scriptie.

1.3 Onderzoeksdoelstelling

Het doel van deze scriptie is dus enerzijds om aan de lezer te tonen aan welke vereisten een zelfgemaakte drone voor politiediensten moet voldoen om een verdacht persoon te detecteren en te volgen. Anderzijds wordt er in de POC van deze scriptie zelf een drone gemaakt die een persoon zal detecteren en volgen. De gedetecteerde persoon zal worden gefilmd en het is ook mogelijk voor de politiediensten om een snapshot te nemen van de gedetecteerde persoon. Op die manier kunnen de politiediensten de ‘verdachte’ persoon identificeren en kan zijn of haar misdrijf op camera vastgesteld worden.

1.4 Opzet van deze bachelorproef

De rest van deze bachelorproef is als volgt opgebouwd:

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken binnen het onderzoeksdomein, op basis van een literatuurstudie.

In Hoofdstuk 3 wordt de methodologie toegelicht en worden de gebruikte onderzoekstechnieken besproken om een antwoord te kunnen formuleren op de onderzoeksvragen.

In Hoofdstuk 4, tenslotte, wordt de conclusie gegeven en een antwoord geformuleerd op de onderzoeksvragen. Daarbij wordt ook een aanzet gegeven voor toekomstig onderzoek binnen dit domein.

2. Stand van zaken

In deze literatuurstudie gaan we dieper in op vier zaken. Ten eerste gaan we kijken wat de literatuur te zeggen heeft over de batterijen van UAV. Daarna gaan we dieper in op de beveiliging van een UAV. Ten derde wordt er onderzocht hoe je objecten kan detecteren. En ten slotte wordt er gekeken naar hoe UAV's gebruikt worden in groep, ook wel een zwerm genoemd (swarm in het Engels).

Ten eerste behandelen we dus het onderdeel over de batterijen van een UAV. Uit verschillende bronnen hebben we geleerd dat de meest gebruikte accu's voor drones LiPo (lithium-ion-polymer) batterijen zijn. Deze batterijen kunnen namelijk een zeer groot vermogen hebben per gewicht en ze kunnen bovendien zeer snel opladen. De reden dat deze batterijen een zeer groot vermogen hebben is omdat deze batterijen een lage interne weerstand hebben en hierdoor kunnen ze een hoge stroom afgeven. Dit zijn twee eigenschappen die zeer belangrijk zijn voor UAV. Het grote nadeel van een LiPo batterij is dat deze zeer ontvlambaar zijn. Deze batterijen moeten dus met grote zorg behandeld worden en correct opgeladen worden. In één studie van Moor, S. en Schneider, P. wordt zelf aangegeven dat de manier waarop de cellen van de batterijen in een LiPo batterij geordend zijn een voordeel geven ten opzichte van vele andere batterijtechnologieën. Het is dus zeker van belang om te kiezen voor een LiPo batterij bij het maken van een UAV.

Ten tweede is het van belang om een UAV goed aan te sturen. De communicatie met UAV's is namelijk niet altijd even gemakkelijk, maar voor politiediensten wordt wel verwacht dat ze zelf een UAV kunnen aansturen en programmeren. Een UAV voor politiediensten moet namelijk wendbaarder zijn dan een speelgoed UAV. In 2.2 Communicatie gaan we eerst het MavLink-protocol bekijken. Dit is een protocol die alleen maar koptekstberichten (header-only) verstuurt tussen UAV's en de server die de UAV aanstuurt. Om te verzekeren dat de berichten goed aankomen wordt er een cyclische redundantiecontrole uitgevoerd

op de laatste twee bytes van elk bericht dat verzonden wordt. Deze technologie gebruikt bovendien verschillende packages voor Python die het gebruik gemakkelijk maken. Daarna kijken we kort ook eens hoe men deze communicatie kan beveiligen. Een drone hacken is namelijk zeer makkelijk omdat de communicatie gebeurt via het draadloos communicatiekanaal (WIFI). Dit is een zeer kwetsbaar kanaal omdat er veel veiligheidsmaatregelen ontbreken.

Ten derde wordt er gekeken hoe men met behulp van een camera objecten kan detecteren zoals personen. Eens deze objecten zijn gedetecteerd moet deze uiteraard ook nog door-gestuurd worden. Voor de POC is er gebruik gemaakt van OpenCV om de objectdetectie af te handelen. Dit is een opensource project van Intel. OpenCV is software waarmee men gezichtsherkenningssystemen kan maken. OpenCV maakt gebruik van verschillende algoritmen om specifieke, onderscheidende details van iemands gezicht te herkennen. Deze details, zoals de afstand tussen de neus en de ogen of de vorm van de mond worden dan vergeleken met gegevens van andere gezichten. Door heel veel data (gezichten in dit geval) te gebruiken om dit algoritme te trainen kan je na verloop van tijd met deze software ook gezichten herkennen van personen die het algoritme nog nooit gezien heeft. Het is dus duidelijk dat *OpenCV*⁷ heel erg handig kan zijn voor deze bachelorproef. Maar dit wil nog niet zeggen dat het voor onze drone in de POC altijd mogelijk zal zijn om iemands gezicht te herkennen., want om iemands gezicht te herkennen heeft onze drone heldere beelden nodig om zijn algoritme op toe te passen. Dit is niet altijd het geval. Er zijn namelijk verschillende factoren die invloed hebben op de kwaliteit van de camerabeelden. Zo kan het zijn regen ...

Tenslotte wordt in deze bachelorproef gezocht naar hoe je één of meerdere UAV's kan laten samenwerken. Volgens de literatuur is het mogelijk om UAV's te laten samenwerken in zwerm. Met een zwerm wordt bedoeld dat er meerdere UAV's worden ingezet om samen te werken. Deze UAV's zijn zo op elkaar afgestemd dat ze elke een kleine taak vervullen om een gemeenschappelijk doel te bereiken. Deze UAV's moeten daarom vaak autonoom kunnen reageren op bijvoorbeeld koersveranderingen van de andere UAV's die mee helpen hetzelfde doel te bereiken. Hier zijn vaak complexe algoritmes voor nodig. Deze technologie wordt vooral ontwikkeld voor militaire doeleinden. Zo is het bijvoorbeeld efficiënter en veiliger om een zwerm van drone te gebruiken bij een bombardement dan om verschillende gevechtspiloten uit te sturen. Deze technologie is nog redelijk nieuw en hier moet nog veel onderzoek naar gebeuren. In de bachelorproef zal deze technologie dieper uitgewerkt worden.

2.1 LiPo Batterijen

Bij UAV's is het natuurlijk zeer belangrijk om de juiste batterij te selecteren. Er zijn enkele voorwaarden waaraan een batterij voor een UAV moet voldoen om geschikt te zijn voor politiediensten. Als men een UAV wilt inzetten om personen te identificeren en te volgen, dan kan men het zich niet permitteren dat de UAV na enkele minuten al zonder vermogen zit en terug opgeladen moet worden. Ook is zal een UAV van een politiedienst heel wat extra gewicht hebben ten opzichte van een voor recreatief gebruik. Er zullen onder een

camera en een GPS gemonteerd worden op deze UAV. Dit zorgt voor extra gewicht die in de lucht moet worden gebracht. Een geschikte batterij zal dus genoeg vermogen moeten kunnen genereren om de UAV in de lucht te houden. Tevens is het belangrijk dat de batterij lang genoeg vermogen kan genereren. Veel UAV's slagen er maar in om maximaal een half uur in de lucht te blijven. De keuze van de juiste batterij is dus cruciaal.

In de literatuur wordt vaak geopteerd voor *Lithium – Polymeer*⁸ (LiPo Batterij). *LiPo's*² zijn ongeveer hetzelfde als lithium-ion, maar worden anders verpakt. Lithium-ion batterijen zijn over het algemeen veel veiliger dan de lithium-polymeer batterijen en werden daarom vroeger vaak gebruikt, maar LiPo's hebben heel wat voordelen ten opzichte van Lithium-ion batterijen daardoor worden deze laatste steeds minder gebruikt.

Ten eerste hebben Lithium-ion batterijen als nadeel dat ze door hun cilindrische stalen vorm meer wegen en meer plaats in beslag nemen in vergelijking met LiPo's. LiPo batterijen kunnen dus gebruikt worden in kleine ruimtes en toch hebben ze een zeer grote *vermogens*¹⁰- en *energiedichtheid*⁹. De energiedichtheid is de hoeveelheid energie per massa-eenheid wordt opgeslagen in de chemische stoffen van de batterij. De energiedichtheid wordt weergegeven als Wh/Kg. LiPo batterijen hebben doorgaans een energiedichtheid van 130 Wh/Kg, dit is lichtjes lager dan de 140 Wh/Kg van een Lithium-ion batterij, maar twee tot vier keer zo veel als andere batterijtypes (Pb, NiCd, NiMH, NiH2, LPF). Er zijn enkele types batterijen die evengoed of beter scoren op vlak van energiedichtheid, zoals NaS (Natriumzwavel) met 117 Wh/KG, maar dit is nog experimenteel en wordt nog niet toegepast. Lithium-zwavel batterijen zouden een energiedichtheid van 350 Wh/Kg hebben, maar deze batterijen worden in 2020 enkel nog maar in de luchtvaart gebruikt en zijn niet makkelijk verkrijgbaar. De vermogensdichtheid daarentegen is de maat voor de effectiviteit van de batterijen. Hoe hoger de vermogensdichtheid, hoe effectiever een batterij is. Dit wordt uitgedrukt in watt per kilogram (W/Kg). Hier zien we dat een Lithium-polymeer-batterij een vermogensdichtheid heeft van 300 W/Kg ten opzichte van 180 W/Kg voor een Lithium-ion-batterij. Dit grote verschil is te verklaren doordat een LiPo batterij geen stalen omhulsel heeft en een Lithium-ion-batterij wel. Daardoor weegt de LiPo-batterij veel minder en heeft deze een kleiner gewicht voor ongeveer hetzelfde vermogen. Hierdoor is de vermogensdichtheid van de LiPo-batterij veel groter en dit maakt een LiPo-batterij veel geschikter voor een UAV waar het gewicht een zeer belangrijke rol speelt. Dit alles zorgt ervoor dat Lithium-polymeer batterijen tot 4 keer meer energiecapaciteit afleveren dan oudere concurrenten zoals NiCd en NiMH batterijen en Lithium-ion-batterijen. Meerdere LiPo batterijen kunnen bovendien ook gemakkelijk parallel geconnecteerd worden met elkaar om hun energiecapaciteit nog te verhogen. Voor politiediensten is dit ideaal. Indien er na verloop van tijd blijkt dat er extra gewicht op de drone geplaatst moet worden voor extra functionaliteiten, dan kan je eventueel nog extra Lithium-polymeer-batterijen aansluiten. Dit kan de initiële kosten van een UAV drukken. Door hun zachte omhulsel kunnen LiPo's bovendien in zo goed als elke vorm gemaakt worden. Je kan deze batterijen zelfs zo produceren dat ze dunner zijn dan 1mm. Dit geeft heel wat vrijheid aan de ingenieurs die deze LiPo batterijen ontwikkelen. Daarom worden ze voor de nieuwste smartphones, laptops, elektrische wagens steeds vaker gebruikt. Deze batterij is volgens de literatuur dan ook ideaal UAV's.

Ten tweede hebben LiPo batterijen ook het voordeel dat ze snel kunnen opladen en LiPo

batterijen ontladen niet zo snel. Normaal gezien is een LiPo-batterij opgeladen in zo'n 1 à 1,5 uur. Deze batterijen hebben ook maar een zelfontlading percentage van 5 procent per maand als je de batterij niet gebruikt. Bij NiCd-batterijen is dit 20 procent per maand en bij NiMH-batterijen zelfs 30 procent. Je kan een LiPo batterij dus gerust een hele tijd ongebruikt laten liggen zonder te vrezen dat je batterij volledig leeggelopen is. Dit is een voordeel voor UAV's van politiediensten die misschien enkele weken niet gebruikt worden en dan plots in actie moeten schieten door een onverwachte gebeurtenis die zich voordoet.

Ten derde geen *geheugeneffect*¹¹ bij batterijen zeer belangrijk. Dit is het effect dat optreedt bij accu's die worden opgeladen wanneer ze nog niet volledig leeg zijn. Het gevolg van dit vroegtijdig opladen is dat de batterij de volgende keer niet meer volledig wilt opladen¹². LiPo-batterijen hebben hier geen last van. Dit is een enorm voordeel voor een UAV bij de politie. Wanneer een UAV er een opdracht heeft opzitten en terugvliegt naar zijn thuisbasis, dan kan deze UAV al opgeladen worden in de tussentijd. Het is dus niet nodig om te wachten tot de batterij volledig leeg is in tegenstelling tot oudere batterijen zoals NiCd en NiMH-batterijen. Tenslotte. Een bijkomend argument om te kiezen voor een LiPo batterij is de prijs. Doordat er geen hoge kosten zijn voor een robuuste, mechanisch sterke behuizing zoals bij Lithium-ion batterijen zijn LiPo batterijen doorgaans goedkoper dan Lithium-ion batterijen.

Het grote nadeel van een LiPo batterij is dat deze zeer ontvlambaar zijn. Deze batterijen moeten dus met grote zorg behandeld worden en correct opgeladen worden. Indien dit niet het geval is kan deze explosief worden en kunnen de chemicaliën van de batterij tegen zeer hoge temperaturen als een vuurbal naar buiten gekatapulteerd worden. Daarom is het belangrijk om steeds de juiste oplader te gebruiken en men mag LiPo's ook nooit opladen aan hogere snelheden dan opgegeven op de batterij. Bovendien moet een LiPo batterij bij de minste vorm van vervorming of beschadiging ook steeds vervangen worden. Maar indien alles correct verloopt hoeft men zich geen zorgen over te maken over de veiligheid.

Algemeen kan men dus concluderen dat LiPo batterijen de voorkeur verdienen tegenover andere soorten batterijen. In deze scriptie worden er dan ook enkel nog UAV's onderzocht die over een LiPo batterij beschikken. Voor het samenstellen van onze eigen drone verderop in deze scriptie wordt er ook gebruik gemaakt van een Lithium-polymeer batterij.

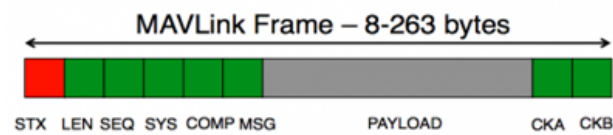
2.2 Communicatie

Ten eerste is het belangrijk om te weten hoe je een drone kan aansturen. Om te communiceren met een UAV wordt er vaak gebruik gemaakt van het MAVLink *protocol*⁵. Het Micro Air Vehicle Link *protocol*⁶, of kortweg MavLink, standaardiseert de communicatie tussen de drone en het grondplatform. Zowel het versturen als het ontvangen van boodschappen tussen een Ground Control Station en de flight controller van de UAV is dan mogelijk. Concreet is MavLink een protocol dat alleen maar koptekstberichten (header-only) verstuurt tussen de flight controllers van de UAV en het grondplatform die de UAV aanstuurt. De berichten die verzonden worden bestaan uit twee soorten signalen, een heartbeat en een controleboodschap. De heartbeat wordt eens per seconde uitgezonden en laat hiermee

eigenlijk weten aan het netwerk dat de UAV (of het grondplatform) bestaat. En hierdoor kunnen andere componenten die verbonden zijn met hetzelfde MavLink-netwerk ook van het bestaan van de UAV (of grondplatform) afweten en er mee communiceren. Een component wordt dus enkel als verbonden beschouwd indien de heartbeat met regelmaat wordt ontvangen. Je kan dit dus vergelijken met de hartslag van een mens. Eens de hartslag van een persoon wegvalt kan je ook niet meer communiceren met die persoon. Het controle signaal duidt aan of een UAV autonoom (dus door de software volledig zelfstandig) of manueel wordt bestuurd. Deze signalen worden vervolgens geconverteerd door codegeneratoren zodat dit een flight controller deze boodschappen kan begrijpen. Om te verzekeren dat de berichten goed aankomen wordt er een cyclische redundantiecontrole uitgevoerd op de laatste twee bytes van elk bericht dat verzonden wordt. Hieronder vindt u in figuur 2.1 hoe een MavLink Frame typisch is opgesteld.

Ten tweede is het van belang om een UAV goed te beveiligen tegen hacking. Zeker voor een UAV bij de politie is dit van cruciaal belang. Politiediensten beschikken namelijk over gevoelige informatie. Men kan het zich niet permitteren dat derde partijen toegang hebben tot de camerabeelden van de UAV. Of nog erger dat een derde partij de UAV van de politiediensten kan onderscheppen en volledig kan overnemen. Daarom is het zeer belangrijk om een UAV goed te beschermen tegen hacking. Een drone hacken is namelijk zeer makkelijk omdat de communicatie gebeurt via het draadloos communicatiekanaal (WIFI). Dit is een zeer kwetsbaar kanaal omdat er veel veiligheidsmaatregelen ontbreken. Enkel het WIFI-netwerk beveiligen is niet goed genoeg. Op de markt zijn er zelfs toestellen die het mogelijk maken om de elektronische signalen van een voorbijvliegende UAV te monitoren en te analyseren om kritische informatie te verkrijgen. Eén van de toestellen die dit mogelijk maakt is de *AeroScope*¹³ van DJI. Dit toestel is bedoelt om gevoelige locaties zoals militaire basissen, gevangenissen en kerncentrales te beschermen tegen de overgrote meerderheid van de populaire drones. Daarmee geeft DJI dus eigenlijk zelf al aan dat het mogelijk is om de meeste drones makkelijk te hacken. DJI is een bedrijf dat zijn reputatie hoog wilt houden, daarom verkopen zij deze toestellen enkel aan klanten die ze vertrouwen, zoals bepaalde overheden en gevoelige bedrijven. De auteur van deze scriptie geloofd dat DJI het beste voor heeft met de maatschappij, maar vindt tevens dat het lichtjes naïef is om te denken dat zo'n toestel nooit eens bij mensen met verkeerde bedoelingen terecht komt. Ook is het waarschijnlijk mogelijk om zo'n toestel na te maken. Daarom achten wij het in deze scriptie zeker nodig om altijd encryptie te voorzien. Dit houdt in dat de boodschappen die men wenst te versturen eerst worden geëncrypteerd en dan pas worden verzonden over het Wifi-netwerk. Ook is het aan te raden om gebruik te maken van een rsa-key en WPA2. Op die manier kan je de berichten die je verstuurd maximaal beveiligen.

Zelf MavLink-berichten schrijven kan zeer moeilijk worden, daarom wordt er vaak een mission planner gebruikt om de communicatie met een UAV te vereenvoudigen. De mission planner vormt een abstractielaag bovenop de MavLink berichten. Op die manier hoeft de gebruiker zich niet bezig te houden met alle technische aspecten hieromtrent. Zo kan de gebruiker gemakkelijk routes plannen, de drone laten opstijgen, landen en zo veel meer. Er zijn verschillende tools die mission planners incorporeren, zoals ArduPilot, Dronekit en QGroundControl. Deze drie tool gebruiken alle drie het MavLink protocol. In de onderstaande figuur wordt weergegeven hoe een mission planner zijn dienst bewijst



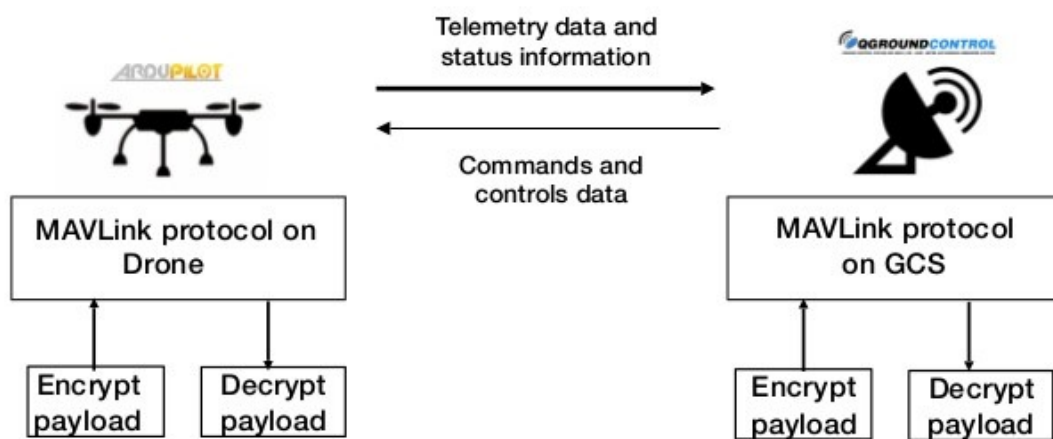
Byte Index	Content	Value	Explanation
0	Packet start sign	v1.0: 0xFE (v0.9: 0x55)	Indicates the start of a new packet.
1	Payload length	0 - 255	Indicates length of the following payload.
2	Packet sequence	0 - 255	Each component counts up his send sequence. Allows to detect packet loss
3	System ID	1 - 255	ID of the SENDING system. Allows to differentiate different MAVs on the same network.
4	Component ID	0 - 255	ID of the SENDING component. Allows to differentiate different components of the same system, e.g. the IMU and the autopilot.
5	Message ID	0 - 255	ID of the message - the id defines what the payload "means" and how it should be correctly decoded.
6 to (n+6)	Data	(0 - 255) bytes	Data of the message, depends on the message id.
(n+7) to (n+8)	Checksum (low byte, high byte)	ITU X.25/SAE AS-4 hash, excluding packet start sign, so bytes 1..(n+6) Note: The checksum also includes MAVLINK_CRC_EXTRA (Number computed from message fields. Protects the packet from decoding a different version of the same packet but with different variables).	

Figuur 2.1: MavLink-Frame, bron: wikipedia

tijdens een vlucht met een UAV. In figuur 2.2 wordt er ook al rekening mee gehouden dat de berichten best beveiligd worden. De UAV zal tijdens de vlucht de geëncrypteerde berichten die hij ontvangt decrypteren om zo te weten te komen wat hij moet doen. Als de UAV zelf berichten wilt versturen via het MavLink protocol, dan worden deze ook eerst geëncrypteerd om vervolgens door de ground control station gedecrypteerd te worden. Op die manier is de communicatie via UAV's veilig.

MAVSEC: SECURING THE MAVLINK PROTOCOL FOR ARDUPILOT/PX4 UNMANNED AERIAL SYSTEMS

SOLUTION



Figuur 2.2: Ardupilot, missionplanner, bron: <https://ardupilot.org/>

3. Methodologie

In de methodologie wordt er in hoofdstuk 1 besproken hoe er te werk werd gegaan in het praktische gedeelte van deze scriptie. In hoofdstuk 2 wordt er gekeken hoe politiediensten zelf hun drone kunnen samenstellen. In dit hoofdstuk wordt vooral de nadruk gelegd op de batterijen, security/flight controllers, camera en de objectdetectiesoftware die nodig is om zelf een drone samen te stellen.

3.1 Hoofdstuk 1: Proof of concept

De auteur van deze scriptie heeft ook een praktisch gedeelte verbonden aan deze scriptie. In het praktische gedeelte werd er onderzocht of het mogelijk was om zelf een drone in elkaar te steken voor de politie. Met deze Proof of Concept (POC) wil de auteur aantonen dat dit mogelijk is voor een klein budget (ongeveer 90 euro). In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de Proof of Concept in elkaar zit.

De bedoeling van deze POC is om politiediensten met een drone personen te laten volgen. Kort samengevat. De drone in de POC heeft een camera. Deze camerabeelden worden doorgestuurd naar de laptop van de drone bestuurder. Hierop wordt objectdetectie toegepast. Eens de objectdetectiesoftware een gezicht van een persoon herkent, zal de drone autonoom vliegen en moet de bestuurder aan de laptop de drone niet meer zelf te besturen. De drone zal de persoon die gedetecteerd is blijven volgen en de beelden doorsturen naar de laptop. Deze beelden worden dan weergegeven op een localhost webpagina. Zo kan de politie live meevolgen wat er gebeurt. De politiediensten kunnen vervolgens ook een snapshot nemen van de persoon op de doorgestuurde beelden. Zo heeft de politie een foto van een “verdacht” persoon kunnen nemen.

Deze POC zal ook gedemonstreerd worden op de verdediging van de scriptie. De code van deze POC kan u ook vinden op <https://github.com/WoutMaes/Bachelorproef-Houd-de-dief-Met-een-drone..git> In het vervolg van dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe deze POC concreet werkt. Eerst wordt er uitgelegd waarom er gekozen is voor de Tello DJI drone. Daarna wordt er aangegeven hoe de OpenCv werkt. Tenslotte wordt er kort uitgelegd hoe de webpagina werkt waarop de politiediensten de beelden kunnen bekijken en de drone kan besturen.

3.1.1 Tello DJI

Een geschikte drone voor een POC voor deze scriptie moet aan enkele voorwaarden voldoen.

Ten eerste is het belangrijk dat men de mogelijkheid heeft om zelf aan deze drone te programmeren. Wij willen namelijk de mogelijkheid hebben om onze drone autonoom te laten vliegen eens er een persoon is herkent. Om een drone autonoom te laten vliegen moeten wij commando's versturen naar de drone. Omdat bij veel commerciële drones het niet mogelijk is om zelf de drone te besturen via code vallen er al heel wat modellen af. Vaak geven fabrikanten van commerciële (geen industriële) drones enkel een controller mee om de drone te besturen. Maar zij bieden geen SDK aan waarmee je de drone zelf kan aansturen.

Daarnaast is het belangrijk dat de drone beschikt over een goede camera. Wij willen namelijk dat de beelden die worden doorgestuurd naar onze laptop voldoende scherp zijn. Ook is het belangrijk dat deze beelden vlot worden doorgestuurd zonder veel ruis op de beelden.

Ten derde is het belangrijk dat deze drone niet te veel tijd in beslag neemt met opladen. En dat de vlucht van de drone niet te kort is.

Ten slotte is de prijs ook van belang. Er zijn namelijk heel wat drones op de markt. Heel vaak kost een drone enkele honderden euro's tot zelf een paar duizend euro. Voor een POC wensen wij de prijs uiteraard zo laag mogelijk te houden.

Op basis van de vier voorgaande punten werd er besloten om te kiezen voor de Tello DJI drone (Hieronder vindt u een afbeelding van de Tello DJI). Deze drone die gecreëerd is door Ryze Tech, DJI en Intel is een van de nieuwkomers op de markt. Zij hebben deze drone speciaal ontwikkeld om studenten goedkoop te laten experimenteren met drones. Deze drone is al te koop voor ongeveer 90 euro en biedt heel wat functies aan die vroeger enkel voor veel duurdere drones voorzien waren. Je kan deze drone namelijk programmeren (wat niet het geval is bij andere drone in deze prijsklasse), deze drone is klein en wendbaar, geschikt voor in huis, heeft een batterij die 13 minuten meegaat en die je kan opladen in een uur en half. En bovendien beschikt deze drone over een 5MP camera die 720p live feed beelden kan doorsturen. Daarnaast heeft deze drone als voordeel dat DJI SDK zeer gemakkelijk te gebruiken is. Indien men dezelfde vereisten wilt bij een andere drone, dan betaal je veel meer. En indien je zelf een drone in elkaar wilt steken

met een Raspberry Pi, flightcontroller, propellers, camera, 4 motoren voor de propellers, LiPo-batterij, batterijoplader voor een LiPo-batterij, gyroscoop en het skelet van de drone, dan betaal je hier ongeveer 350 euro voor volgens onze eigen berekeningen. Kortom, deze voor 90 euro is de Tello DJI ideaal voor deze POC.

Eigenschap	Waarde
Gewicht	80 gram
Dimensies	98mm*92.5*41mm
Propellers	3 inch
Ingebouwde functies	Afstandsmeter, barometer, LED, Vision-systeem, WIFI, 720P Live View
Poort	Micro USB Charging Port

Tabel 3.1: Eigenschappen Tello DJI Drone

Uiteraard heeft deze drone ook enkele beperkingen. Zo kan de Tello DJI maar 100 meter ver vliegen, kan ze niet in een zwerm vliegen en heeft ze geen gps. Deze beperkingen zijn niet zo erg voor deze scriptie. Enkel het feit dat deze drone niet in een zwerm kan vliegen is spijtig. In de originele doelstelling van deze scriptie was de bedoeling om te onderzoeken of UAV's in een zwerm laten vliegen efficiënter is voor politiediensten dan om een drone alleen te laten vliegen. Daarom wordt de originele doelstelling gewijzigd. In de POC wordt er geen gebruik gemaakt van een zwerm drones. In de literatuurstudie wordt er wel nog kort onderzocht of er redenen zijn om drones bij politiediensten in een zwerm te laten vliegen.



Figuur 3.1: Tello DJI, bron: eigen foto

3.1.2 Objectdetectie: personen herkennen en volgen

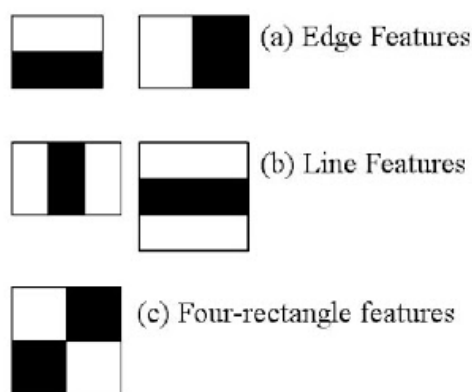
Zoals eerder aangehaald willen wij in deze POC personen detecteren en kunnen volgen. Om dit mogelijk te maken moeten wij gebruik maken van objectherkenningssoftware. Deze software is in staat om automatisch bepaalde objecten te detecteren. Het detecteren

van objecten is zeer complex. Gelukkig is er de afgelopen al veel onderzoek gedaan naar object detectie en moeten wij voor deze scriptie dus niet zelf een algoritme maken om een persoon te herkennen. Dit zou namelijk veel te veel tijd in beslag nemen.

Omdat object detectie de laatste jaren heel erg in opmars is zijn er veel bedrijven die objectdetectiesoftware maken en verkopen. Voor deze POC trachten wij echter zo weinig mogelijk software aan te kopen. Daarom werd er gekozen om gebruik te maken van de gratis open source software van OpenCV. Dit is een library ontwikkeld door Intel die het mogelijk maakt voor ontwikkelaars om vooraf getrainde objectdetectiemodellen te gebruiken. Ook is het mogelijk om met OpenCV zelf je objectdetectiemodel te trainen. Dit kan handig zijn voor als je een specifiek object wilt leren herkennen zoals een bepaalde kankervlek, een machineonderdeel, enz. Echter voor het detecteren van personen kan je OpenCV gebruiken in combinatie met het Haar-cascade detection model. Dit model gaan wij gebruiken om personen te detecteren en te volgen.

i. Haar-Cascade theorie

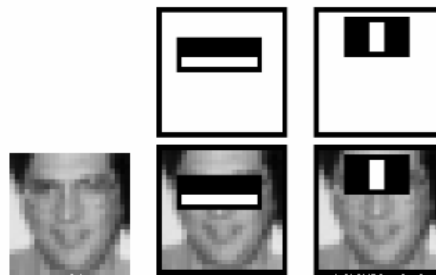
Het Haar-Cascade model werkt als volgt. De basis is zoals bij elke convolutionele kernel. De afbeelding die wordt aangereikt wordt een paar keer opgedeeld in verschillende features (zie bijgevoegde figuren). Elke feature krijgt een waarde die wordt verkregen door de som van pixels onder witte rechthoek af te trekken van de som van de pixels van de zwarte rechthoek. Op basis hiervan kan je waardes die ongeveer aan elkaar gelijk zijn combineren en patronen detecteren op een afbeelding. Zo kan je bijvoorbeeld de ogen van de neus onderscheiden op een afbeelding. In realiteit is de uitleg iets complexer, maar aangezien we het algoritme niet zelf moeten maken volstaat deze uitleg.



Figuur 3.2: Haar-Cascade, bron: <https://docs.opencv.org>

ii. Haar-Cascade geïmplementeerd in code

In de onderstaande figuur wordt weergegeven hoe dit proces werkt in Pythoncode. In lijn 6 wordt de foto ingeladen. Op gekleurde foto wordt op lijn 8 omgezet naar een zwartwit foto, want dit maakt het eenvoudiger om patronen te herkennen op een foto. In regel 12 tot 18 wordt er gezocht naar een gezicht en de ogen op de zwartwit foto. De ogen en het



Figuur 3.3: Haar-Cascade, bron: <https://docs.opencv.org>

gezicht zullen afgebakend worden met een kader. Zoals je kan zien of de figuur hier onder.

Zoals u kan zien zijn er maar enkel lijntjes code nodig om gezichten te herkennen met OpenCV en Python. Eigenlijk moet je enkel cv2 importeren en de bijhorende Cascade-Classifiers. Deze classifiers zijn voorgetrainde modellen die gemakkelijk te vinden zijn op GitHub. Dit zijn XML files die je moet downloaden en in je projectfolder moet plaatsen. De eerste classifier (regel 3) die wij gebruiken is een classifier om het gezicht te herkennen. Het tweede (regel 4) dient om de ogen te herkennen.

```

1  import cv2 as cv
2
3  face_cascade = cv.CascadeClassifier('haarcascade_frontalface_default.xml')
4  eye_cascade = cv.CascadeClassifier('haarcascade_eye.xml')
5
6  img = cv.imread('image.jpg')
7
8  gray = cv.cvtColor(img, cv.COLOR_BGR2GRAY)
9  faces = face_cascade.detectMultiScale(gray, 1.3, 5)
10 print(len(faces))
11
12 for (x, y, w, h) in faces:
13     cv.rectangle(img, (x, y), (x+w, y+h), (255, 0, 0), 2)
14     eye_gray = gray[y:y+h, x:x+w]
15     eye_color = img[y:y+h, x:x+w]
16     eyes = eye_cascade.detectMultiScale(eye_gray)
17     for (ex, ey, ew, eh) in eyes:
18         cv.rectangle(eye_color, (ex, ey), (ex+ew, ey+eh), (0, 255, 0), 2)
19
20 cv.imshow('img', img)
21 cv.waitKey(0)
22 cv.destroyAllWindows()
23

```

Figuur 3.4: OpenCV geïmplementeerd

Eens dat het mogelijk is om een gezicht van een persoon te herkennen kunnen we deze persoon uiteraard ook volgen. In deze scriptie is er voor gekozen om de persoon autonoom te laten volgen. Via de SDK die DJI aanbiedt is dit perfect mogelijk met de Tello DJI. In de onderstaande afbeeldingen wordt er duidelijk gemaakt hoe een drone op basis van objectdetectie in combinatie van de DJI SDK een persoon kan volgen. Kort samengevat (want Pythoncode schrijven is niet de kern van deze scriptie) : in de regels 307 tot 312 wordt berekend waar het gezicht zich bevindt ten opzichte van de frame. Op basis hiervan

wordt in de regels 315 tot 328 de drone in de juiste richting gestuurd, zodat de drone zich het gezicht van de persoon in het midden van de frame probeert de brengen. Als de drone op die manier steeds zijn richting zal aanpassen, dan kan de drone de persoon volgen. Dit zal ook gedemonstreerd worden op de verdediging van de scriptie.

```

296     def video_jpeg_generator(self):
297         for frame in self.video_binary_generator():
298             if self.is_enable_face_detect:
299                 if self.is_patrol:
300                     self.stop_patrol()
301
302                 gray = cv.cvtColor(frame, cv.COLOR_BGR2GRAY)
303                 faces = self.face_cascade.detectMultiScale(gray, 1.3, 5)
304                 for (x, y, w, h) in faces:
305                     cv.rectangle(frame, (x, y), (x+w, y+h), (255, 0, 0), 2)
306
307                     face_center_x = x + (w/2)
308                     face_center_y = y + (h/2)
309                     diff_x = FRAME_CENTER_X - face_center_x
310                     diff_y = FRAME_CENTER_Y - face_center_y
311                     face_area = w * h
312                     percent_face = face_area / FRAME_AREA
313
314                     drone_x, drone_y, drone_z, speed = 0, 0, 0, self.speed
315                     if diff_x < -30:
316                         drone_y = -30
317                     if diff_x > 30:
318                         drone_y = 30
319                     if diff_y < -15:
320                         drone_z = -30
321                     if diff_y > 15:
322                         drone_z = 30
323                     if percent_face > 0.30:
324                         drone_x = -30
325                     if percent_face < 0.02:
326                         drone_x = 30
327                     self.send_command(f'go {drone_x} {drone_y} {drone_z} {speed}',
328                                     blocking=False)
329                     break
330

```

Figuur 3.5: OpenCV geïmplementeerd

3.1.3 Waarom geen MavLink in de POC

De drone die voor het praktische gedeelte van deze scriptie is aangekocht, is de Tello DJI. DJI ontwerpt voor al hun drones hun eigen DJI flight controller. De DJI flight controller kan enkel aangestuurd worden door de DJI SDK. De flight controllers van DJI gebruiken dus hun eigen protocol, die verschilt van het MavLink-protocol. In het praktische gedeelte

van deze scriptie is er dan ook geen gebruik gemaakt van het MavLink-protocol. Achteraf gezien was het ook niet zo erg dat er geen gebruik werd gemaakt van het MavLink-protocol. Na het erop naslaan van de literatuur leek handig om gebruik te maken van het MavLink-protocol, maar al snel bleek dat dit op korte termijn te hoog gegrepen was. Want voor elke boodschap die je moet versturen naar de UAV moet je een eigen MavLink bericht genereren daarenboven moet je deze berichten ook op het juiste moment versturen. Dit neemt veel tijd in beslag en bovendien is volgens veel reacties op stackoverflow.com de gegenereerde MavLink-code niet gemakkelijk te gebruiken en is de DJI SDK te verkiezen. Indien er een andere drone beschikbaar was, of indien er gekozen werd om volledig zelf een drone te maken, dan kon er uiteraard wel gekozen zijn om gebruik te maken van ArduPilot, Dronekit of QGroundControl. Maar doordat er enkel een Tello DJI beschikbaar is heeft de auteur van deze scriptie deze software niet kunnen uittesten.

In het volgende hoofdstuk wordt er ook uitgelegd hoe politiediensten hun UAV kunnen beschermen via de N3 flight controller van DJI.

3.1.4 Afsluiten

Hieruit hebben we geleerd dat het mogelijk is om personen te detecteren met een commerciële drone en opensource software. De nodige technologie is dus beschikbaar voor politiediensten. Dit praktische gedeelte was uiteraard maar een goedkope POC (proof of concept), deze opstelling is niet geschikt voor in echte situaties. Deze drone is iets te klein en de camera is niet geschikt voor in het donker en met grote schaduw te werken.

3.2 Hoofdstuk 2: Een UAV samenstellen voor de politie

Uit de literatuurstudie en het praktische gedeelte hebben we nu al veel geleerd. Nu wordt er gekeken hoe politiediensten zelf een UAV kunnen samenstellen. Indien je zelf een UAV in elkaar wilt steken dan moet je zoals eerder al is aangegeven met enkele zaken rekening houden. In dit hoofdstuk wordt er onder andere een antwoord gegeven op welke LiPo-batterijen, camera, objectdetectiesoftware en welke flight controller (voor de security) er nu geschikt is voor de politie. Na dit hoofdstuk gelezen te hebben zouden politiediensten in staat moeten zijn om zelf een UAV in elkaar te kunnen steken die geschikt is voor hun politiewerk. Naar dit hoofdstuk hebben we opgebouwd en dit hoofdstuk vormt dan ook de kern van deze scriptie.

3.2.1 LiPo

Uit de literatuurstudie is er gebleken dat je voor een UAV altijd gebruik moet maken van LiPo-batterijen. Dit wordt ook bevestigd door dhr. Koen Henderickx, de co-promotor van deze scriptie. Best wordt er gebruik gemaakt van veel LiPo-batterijen en best koop je er enkele extra aan. Politiediensten gaan waarschijnlijk elk uur de batterijen van de UAV moeten verwisselen door net opgeladen batterijen. Door op die manier batterijen te roteren

kan een UAV van de politie toch een hele dag vliegen.

Ons inziens is het dus nog niet helemaal mogelijk om een UAV volledig te automatiseren. Er zal altijd iemand nodig zijn om de batterijen van de UAV op te laden en te verwisselen.

3.2.2 Camera

Dhr. Koen Henderickx van Easycopters die jaren ervaring heeft met het maken van camerabeelden met UAV stelt voor om een DSLR of een systeemcamera onder een UAV te hangen. Hoe groter de sensor, hoe minder ruis. Volgens dhr. Koen Henderickx heeft een goeie DSLR (EOS 5D bv.) een groot dynamisch bereik waardoor deze heel geschikt is om ook met weinig licht goeie foto's te maken. Dit is precies wat politiediensten nodig hebben. Daarnaast zijn topklasse L-lensen ook een must. Dhr. Koen Henderickx maakt zelf gebruik van een Canon 16-35mm F2.8. Deze lens zou ook ideaal zijn voor de opdrachten van de politie.

Eén camera is op zich voldoende om een persoon te detecteren en te volgen. Natuurlijk kan er voor gekozen worden om meerdere camer's aan te monteren. Maar dit zal echter de kostprijs enorm verhogen, want de camera is het duurste onderdeel van de UAV. Indien gekozen wordt voor de EOS 5D en de Canon 16-35mm F2.8, dan bedraagt de kostprijs ongeveer 5000 euro.

Er wordt in deze scriptie aangeraden om maar één camera te gebruiken. Uiteraard kunnen politiediensten ervoor opteren om er meerdere te gebruiken.

3.2.3 Objectdetectie software

In de POC van deze scriptie werd er gebruik gemaakt van OpenCV. Aangezien er uit de POC gebleken is dat OpenCV makkelijk te gebruiken is en een performant resultaat geeft, worden politiediensten aangeraden om ook gebruik te maken van OpenCV. Deze software is namelijk gratis in tegenstelling tot de alternatieven. Natuurlijk moeten politiediensten dan wel zelf over informatici beschikken die OpenCV kunnen implementeren. Maar eens dat zij dit geïmplementeerd hebben kunnen ze er altijd gratis gebruik van blijven maken. Ons inziens is het dus de moeite waard om hier tijd in te investeren.

Indien politiediensten er toch voor kiezen om een commerciële oplossing aan te kopen, dan hebben ze een ruime keuze. Er zijn heel wat bedrijven die hun kunnen helpen (Studio diip, milestone, mathworks, ...). Echter dan beschik je niet meer zelf over je object detectie software. Naast de kostprijs is dit vooral een ethische keuze voor politiediensten. Willen politiediensten dat privébedrijven afweten van de gezichtsherkenningsssoftware van politiediensten.

Kortom in deze bachelorproef wordt er aangeraden om OpenCV te gebruiken als gezichtsherkenningsssoftware.

3.2.4 Flight controller

Als je een drone wilt aansturen dan moet je je vooral afvragen voor welke flight controller je kiest. De flight controller kan men beschouwen als het brein van de drone. Het is een printplaat waar allerlei sensoren zijn op gemonteerd. Zo goed als alle flight controllers hebben een gyroscoop, een versnellingsmeter, een barometer en een kompas. Deze sensoren kunnen de bewegingen van de drone detecteren, de lokaliseren en kunnen de commando's van de dronepiloot ontvangen. De flight controller zal deze data onder andere gebruiken om de drone te navigeren, beelden door te sturen, de motoren aan te sturen en nog veel meer. De flight controller is dus eigenlijk het belangrijkste onderdeel van een drone. Het kiezen van een flight controller is geen eenvoudige keuze. Er zijn veel verschillende flight controllers beschikbaar op de markt. Maar er zijn kort samengevat twee verschillende categorieën. Enerzijds kan je kiezen voor een flight controller van een groot bedrijf die allerlei extra's biedt (zoals de N3 flight controller van DJI) of je kan kiezen voor een meer generieke flight controller die je vooral zelf moet gaan instellen (zoals de Navio2) en die geen extra's aanbiedt. Wij gaan hieronder eerst bespreken hoe je een UAV kan samenstellen met een meer generieke flight controller, daarna wordt er dieper ingegaan op de N3 flight controller van DJI. Ten slotte wordt er een antwoord gegeven op de vraag welke flight controller te verkiezen is voor politiediensten.

Ten eerste kan men kiezen voor een generieke flight controller. Van deze flight controllers zijn er honderden verschillende keuzes op de markt. Om hier een flight controller te kiezen moet je eerst een hardware keuze maken, zo zijn er flight controllers in verschillende formaten, met meer of minder CPU en met verschillende extra opties, zoals wel of geen GPS, wel of geen sonar, ... Naast de keuze voor de hardware moet men hier ook een keuze maken in de firmware die men wenst te gebruiken. De producenten van deze flight controllers willen namelijk hun eigen firmware opdringen. Indien je deze firmware niet wenst te gebruiken kan je nog altijd gebruik maken van opensource firmware, zoals Betaflight, FC Firmware of RaceFlight. Dit vormt volgens de auteur van deze scriptie het grootste struikelblok om te kiezen voor een generieke flight controller. De firmware die gebruikt wordt voor deze generieke oplossingen zijn vooral bedoeld voor hobbyisten en deze bevatten ook vaak bugs. Dit is dus geen ideale oplossing voor politiediensten, want die kan voor onvoorziene problemen zorgen. Eigenlijk is het kiezen van een generieke flight controller wat ons betreft nooit een ideale oplossing. Want na het kiezen van de hardware en de firmware moet er nog zelf gezorgd worden voor een SDK om te communiceren met de UAV. Zoals eerder al aangehaald kan je om te communiceren met een UAV gebruik maken van MavLink. Tijdens het erop naslaan van de literatuur leek het er op het eerste zicht op dat MavLink een goeie keuze was om berichten te versturen van en naar een UAV. Via de source code van MavLink op github (<https://github.com/mavlink/mavlink>) kan je zelf MavLink messages genereren. Maar dit bleek al snel een hele opgave te zijn. Voor elke boodschap die je moet versturen naar de UAV moet je een eigen MavLink bericht genereren daarenboven moet je deze berichten ook op het juiste moment versturen. Dit neemt veel tijd in beslag en bovendien is volgens veel reacties op stackoverflow.com de gegenereerde MavLink-code niet gemakkelijk te gebruiken en is een SDK zoals die van DJI te verkiezen. Uiteraard kan je er ook voor kiezen om gebruik te maken van mission planner zoals van ArduPilot, Dronekit of QGroundControl, maar zoals eerder vermeld zijn

dit ook open source oplossingen die bugs bevatten. Kortom, in deze scriptie raden wij niet aan om gebruik te maken van een generieke flight controller. Deze flight controllers zijn vooral bedoelt voor hobbyisten, of voor bedrijven die het niet erg vinden dat er enkele bugs in hun UAV zitten. Voor politiediensten die met gevoelige informatie werken, zoals camerabeelden van een verdachte persoon, wordt er aangeraden om te kijken naar andere oplossingen.

Ten tweede kan kiezen voor een meer gesofisticeerde flight controller met extra opties. Deze flight controllers zijn veel gemakkelijker te gebruiken, maar kosten doorgaans wel een stuk meer. In deze paragraaf wordt er vooral gekeken naar de N3 flight controller van DJI. Deze is te koop voor ongeveer 350 euro. Voor het maken van deze scriptie waren er geen middelen beschikbaar om de N3 flight controller aan te schaffen. De bevindingen in deze bachelorproef zijn dus ook louter gebaseerd op wat er in de literatuur wordt geschreven. Maar wij hebben geen reden om aan te nemen dat deze dure flight controller minder goed zou werken dan hun goedkope instapmodellen. De N3 flight controller wordt door tal van professionele gebruikers aangeschaft. Ook door buitenlandse politie-eenheden en overheden. In deze scriptie wordt dan ook geopteerd voor het aanschaffen van deze flight controller. Waarom zou je kiezen voor een flight controller waar je nog alles zelf moet doen en waarom veel open source code bij zit? Dit is zoals zelf je operating system schrijven. Voor hobbyisten en startups is het een mogelijkheid om te kiezen voor een generieke flight controller, maar voor politiediensten wordt in deze scriptie aangeraden om te opteren voor een flight controller met beveiliging van grote dronemakerbedrijven zoals DJI N3 flight controller. De N3 flight controller biedt tal van voordelen ten opzichte van de generieke flight controllers. Deze flight controller is makkelijk te gebruiken via de DJI SDK (zoals eerder beschreven, maakt deze geen gebruik van MavLink, DJI heeft een eigen berichtensysteem ontwikkeld). Deze SDK werd ook gebruikt in het praktische gedeelte van deze bachelorproef. Ook beschikt deze flight controller over allerlei functies om het vliegproces te optimaliseren. Zo is er onder andere een dual IMU redundancy en een ingebouwde black box. Het ingebouwde algoritme van DJI zal bij wanneer één van de IMU uitvalt automatisch overschakelen naar de ander IMU zodat het systeem rustig kan verder werken. De black box zal ervoor zorgen dat elk detail (van de motoren en sensoren) van de UAV zal opgeslagen worden. Deze black box maakt het makkelijk om de UAV in real-time te monitoren. Een bijkomend voordeel van deze flight controller is dat er heel wat software van DJI is die hierbij compatible is. Zo kan je onder ander gebruik maken van de DJI GO en DJI Assistant 2. Deze software laat toe om de videobeelden van je UAV live te volgen, de batterijstatus te controleren, en veel meer. Kortom, de N3 flight controller kan op het eerste zicht duur lijken in de aanschaf, maar je hebt wel het voordeel dat je niet zelf een SDK moet schrijven om je berichten te versturen en je moet ook geen open source software gebruiken die veel bugs bevat. De auteur van deze scriptie is er dan ook van overtuigd dat de N3 flight controller de beste keuze is voor politiediensten.

4. Conclusie

Zoals de leze heeft kunnen vaststellen in de POC is het mogelijk om met een zelf geprogrammeerde drone een persoon te detecteren en te volgen met behulp van een live feed van de camerabeelden. In de POC werd er gebruik gemaakt van open source software voor het herkennen van de persoon en de drone die gebruikt werd is voor slechts 90 euro te koop. Dit wijst er volgens de auteur van dit artikel op dat het zeker mogelijk is voor politiediensten, die over meer middelen beschikken, om een persoon te detecteren en te volgen.

Na de POC werd er in deze scriptie duidelijk gemaakt dat het beter is voor politiediensten om niet te veel te vertrouwen op open source software. Er werd onder andere duidelijk gemaakt dat het gebruiken van het open source MavLink-protocol kan leiden tot heel wat frustraties (met de moeilijk te gebruiken SDK) en waarschijnlijk een heleboel bugs in de software. Ook het gebruik maken van open source mission planner is niet het beste alternatief. Dit leidt ertoe dat het gebruiken van generieke flight controllers ook niet aangewezen is. In deze scriptie opteren wij er daarom voor om gebruik te maken van de commerciële alternatieven zoals de N3 flight controller van DJI. Deze flight controller heeft een eenvoudig te gebruiken SDK en beschikt over heel wat intelligente algoritmes die er automatisch voor zorgen dat de drone stabiel in de lucht blijft in elke omstandigheid. Daarnaast zorgt deze flight controller er dankzij zijn vele redundante functies ook voor dat de drone altijd veilig terugkeert en land bij de eigenaar van de drone, ook wanneer er bepaalde onvoorziene omstandigheden optreden zoals het uitvallen van één van de motoren van de drone.

Tevens wordt er aangeraden om zeker te kiezen voor LiPo-batterijen. En best worden er een heleboel LiPo-batterijen aangekocht. Uit de literatuurstudie is gebleken dat deze batterijen de best geschikte batterijen zijn voor een UAV, maar de batterijen blijven nog steeds het zwakke punt van een UAV. Daarom doen politiediensten er goed aan om verschillende

LiPo-batterijen aan te kopen. De politiediensten zullen helaas om het uur de batterijen van de drone moeten vervangen en opladen, anders staat de drone te lang aan de grond.

Daarnaast wordt er op de drone best een DSLR (zoals de EOS 5D) of een systeemcamera gemonteerd. Deze camera heeft best ook een topklasse L-lens zoals een Canon 16-35mm F2.8. Op die manier zijn de politiediensten zeker dat ze in de meeste situaties zuivere camerabeelden hebben om de gezichtsdetectie op toe te passen.

Voor de object detectie vinden wij het niet nodig om te kiezen voor een commerciële oplossing. Vaak zijn deze oplossingen zeer duur en volgens ons is het mogelijk om met open source software het zelfde resultaat te bereiken. Natuurlijk moeten de ICT-diensten van de politie dan wel zelf kunnen werken met OpenCV. Uit de POC is gebleken dat het integreren van OpenCV geen probleem zou mogen zijn.

Politiediensten zijn dus in staat om een persoon te detecteren en te volgen met een zelf-gemaakte drone. In de POC is dit gelukt met een drone van 90 euro, maar deze drone is uiteraard niet ideaal. Indien politiediensten ervoor kiezen om alle onderdelen te gebruiken die werden aangehaald in het tweede deel van de methodologie, dan zal deze drone waarschijnlijk rond de 5000 à 6000 euro kosten. Uiteraard is het ook mogelijk om te kiezen voor een tussenoplossing.

Wel moet er nog opgemerkt worden dat politiediensten nog meer de nadruk moeten leggen op de beveiliging van hun UAV. In deze scriptie werd er aangeraden om een rsa-key en WPA2 te gebruiken. Dit biedt waarschijnlijk al voldoende beveiliging, maar uiteraard moeten de databanken waarom een UAV verbonden is ook goed beveiligd worden.

Deze scriptie is hopelijk een bron van informatie voor toekomstige studenten en UAV liefhebbers.

A. Onderzoeksvoorstel

Het onderwerp van deze bachelorproef is gebaseerd op een onderzoeksvoorstel dat vooraf werd beoordeeld door de promotor. Dat voorstel is opgenomen in deze bijlage.

A.1 Introductie

Politiediensten zijn steeds op zoek naar de beste manieren om dieven zo snel mogelijk te vatten. Aangezien diefstallen gebeuren op elk ogenblik van de dag en politiediensten en privébewakingsdiensten vaak onderbemand zijn kan het aangewezen zijn om op zoek te gaan naar technologische oplossingen voor het vatten van dieven. In deze bachelorproef wordt onderzocht of een drone kan helpen bij het opsporen van een persoon. Hiervoor wordt deze bachelorproef opgesplitst in vier delen.

Ten eerste wordt er gefocust op de hardware. Niet elke drone is namelijk even geschikt voor in elke situatie. Aangezien België een grillig klimaat kent met veel regen en wind kunnen we ons de vraag stellen welke drone er het meest geschikt is. Zijn er al modellen beschikbaar die in verschillende situaties (even efficiënt) ingezet kunnen worden of zouden men eerder moeten opteren voor meerdere modellen die naast elkaar kunnen opereren?

Ten tweede is het softwareaspect hier zeer belangrijk. Staat de technologie al ver genoeg om de drone onbemand te laten zoeken naar de dief? Of is er permanent iemand nodig om de drone bij te sturen? Bestaat er al software die iets gelijkaardigs doet (bijvoorbeeld zoeken naar wilde dieren, of het opsporen van branden ...) en gemakkelijk kan aangepast worden of moet je je eigen software gaan ontwikkelen? Is het mogelijk om met meerdere drones tegelijkertijd te zoeken, of is de coordinatie tussen drones nog niet goed genoeg hiervoor?

Daarnaast moet er ook gefocust worden op het technischeluik rond beelddetectie. Wat met de omstandigheden (donker, te licht, warme dagen ...). Zijn camerabeelden op een drone scherp genoeg om een degelijk bewijsmateriaal aan te leveren in de rechtbank? Heb je met een camera genoeg of zijn meerdere camera's naast elkaar aangewezen?

Ten slotte zal er ook kort gefocust moeten worden op het juridische aspect. Mogen enkel de politieagenten dieven proberen te vatten met een drone? Of zou dit ook commercieel toepasbaar zijn voor privébewakingsbedrijven op industrieterreinen?

A.2 State-of-the-art

Heel veel wetenschappelijke artikels zijn er op dit moment nog niet over het gebruik van drones in bewakingsopdrachten. Dit komt voornamelijk omdat dit nog een nieuw thema is en er nog niet veel bedrijven een werkbare oplossing hebben. Wel kunnen we ons baseren op Sunflower Labs³, een Amerikaans bedrijf dat met behulp van drones villawijken wilt beschermen. Sunflower Labs gebruikt een serie van bewegingssensoren in en rondom het huis in combinatie met een drone. Als er een van de sensoren een beweging detecteert op het grasperk of de trap. De sensor stuurt het signaal door naar een tablet en de bewoner kan vervolgens van op afstand met een drone naar de plaats delict vliegen. Via het live streamen van 1080p video kan de bewoner observeren wat er aan de hand is. Het gebruik van sensoren in een huis of industrieterrein heeft als voordeel dat de drone niet constant hoeft te surveilleren, dit bespaart heel wat van het vermogen van de batterij. Tevens hoeft je op deze manier niet constant mensen of gebouwen via beeldmateriaal te volgen. Dit is dan weer een voordeel met betrekking tot de privacy. ³ <https://sunflower-labs.com/>. Wel heb ik een wetenschappelijke studie gevonden van Y. Kitamura, T. Tanaka, F. Kishino and M. Ya. Deze studie gaat over het modeleren van 3D omgevingen die een drone filmt. Zij stellen dat er tijdens het ontdekken van de omgeving de drone een niet aflatende stroom van data zal binnenkrijgen. Een groot gedeelte van deze data zal in de vorm van dieptedata zijn, die gebruikt wordt om de omgeving in kaart te brengen. Deze ruwe stroom kan namelijk snel enkele megabytes groot zijn per frame. Zelfs bij een zeer lage beeldsnelheid kan dit nog steeds een probleem vormen. Een manier om dit op te lossen is om datastructuren te definiëren die de ruimte omvatten en de meetpunten toe te voegen aan deze structuren. Voor dit probleem zal dus een oplossing moeten gevonden worden.

A.3 Methodologie

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen van deze bachelorproef kan je het best eerst kijken naar grote bedrijven die droneservices aanbieden hoe dat zij dit. Deze bedrijven kunnen gecontacteerd worden om te vragen hoe zij hun drones aanpassen en inzetten voor bewakingsopdrachten. Voorbeelden van grote bedrijven (bijvoorbeeld: Seris, Elistair, Airobotics, Sunflower Labs en Flytbase) die bewakingsopdrachten doen liggen vooral in Noord-Amerika. Zijn er goede elementen van deze bedrijven die wij kunnen overnemen? Ook zou het verstandig zijn om privébewakingsbedrijven zoals Vigilis te contacteren en

vragen hoe zij over dit probleem denken. Hoe zouden zij dit implementeren in hun eigen bedrijf.

Tevens zou het goed zijn om op basis van wetenschappelijke literatuur een vergelijkende studie over de verschillende soorten camera-, hardware- en softwaresystemen die momenteel beschikbaar zijn. Om op die manier de best mogelijke drone ontwikkelen voor de Belgische markt.

Tenslotte moet er rekening gehouden worden met het juridische aspect. Hiervoor moet er advies ingewonnen worden externe personen, bijvoorbeeld van laatstejaarsstudenten in de rechtenopleiding.)

Mijn eigen praktische bijdrage aan dit project zou zijn dat ik zelf een API zou schrijven voor een onbemand vliegtuig om ervoor te zorgen dat een persoon getraceerd kan worden. Eventueel kan ik dit nog uitbreiden en ervoor zorgen dat er ook al geautomatiseerde beeldverwerking aan te pas komt tijdens de vlucht van het onbemande vliegtuig.

A.4 Verwachte resultaten

Ik verwacht dat uit de resultaten zal blijken dat er een haalbare oplossing is voor politiediensten. Er bestaan namelijk al veel goedkope onderdelen voor drones en er zijn ook allerlei API beschikbaar waarop we kunnen verderwerken.

A.5 Verwachte conclusies

Ik verwacht dat er een betaalbare oplossing mogelijk, maar dat er nog geen volledig op maat gemaakte drones op de markt zijn die een bewakingsopdracht kunnen vervullen. Er zullen volgens mij een reeds aanpassingen moeten gebeuren. Ook vermoed ik dat er meerdere drones naast elkaar nodig zijn die met elkaar in communicatie moeten staan. Deze drones hebben meerdere camera's, om betere beeldkwaliteit te verkrijgen.

Het is volgens mij mogelijk om met de huidige stand van de technologie een onbemande drone te gebruiken voor het vatten van een dief, maar de batterijduur van de drones is nog een zwakke schakel.

Tenslotte denk ik dat het vanuit juridisch oogpunt enkel mogelijk is om drones in te zetten voor bewakingsopdrachten op locaties zoals een industrieterrein, residentiële wijk of een festival. In deze gevallen is het namelijk mogelijk aanwezig of bewoners een contract tekenen met het privébewakingsbedrijf die toelaat dat een drone toezicht houdt. Want volgens de huidige Belgische wetgeving is het niet toegelaten om boven een grote groep mensen te vliegen zonder hun toestemming.

A.6 Literatuurstudie

Y. Kitamura, T. Tanaka, F. Kishino and M. Ya, "3-D Path Planning in a Dynamic Environment Using an Octree and an Artificial Potential Field," Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, vol. 2, pp. 474- 481, 1995.

B. Bibliografie

1. N. Seidle, „Battery Technologies,” SparkFun Electronics, 2016. [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/battery-technologies/lithium-polymer>
2. „Lithium polymer battery,” Wikimedia Foundation, Inc., 13 5 2017. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lithiumpolymebattery>
3. S. W. Moore en P. J. Schneider, „A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems,” SAE Technical paper 2001-01-0959, 2001 . Domin, „Security Analysis of the Drone Communication Protocol: Fuzzing the MAVLink Protocol,” 2016.
4. Alhawi, O.M., Mustafa, M.A., Cordeiro, L.C. (2019). Finding Security Vulnerabilities in Unmanned Aerial Vehicles Using Software Verification. ArXiv, abs/1906.11488
5. “MavLink Introduction.”[Online]. Available: <https://github.com/mavlink/mavlink>
6. “MavLink”, Wikipedia [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>
7. “OpenCV: Introduction.” [Online]. Available: <https://docs.opencv.org/4.1.1/d1/dfb/intro.html>
8. "Lithium-ion-polymeer-accu"[Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion-polymeer-accu>
9. "Energiedichtheid." [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Energiedichtheid>
10. "Vermogensdichtheid." [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Vermogensdichtheid>
11. "Geheugeneffect." [Online]. Available: <https://www.conrad.nl/info/inspiration/batterijen-en-opladers/het-memory-effect-bij-batterijen>
12. "Geheugeneffect" [Online]. Available: <https://www.replacedirect.be/nl/batterij-technieken/lithium-polymeer-batterijen.html>
13. "Aeroscope DJI": [Online]. Available: <https://www.dji.com/be/aeroscope>