

Kendali Formasi Multi-UAV menggunakan *Line of Sight (LOS) Guidance Law*

Dyah Anggun Sartika¹, Denny Hardiyanto²

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta.

Informasi Artikel

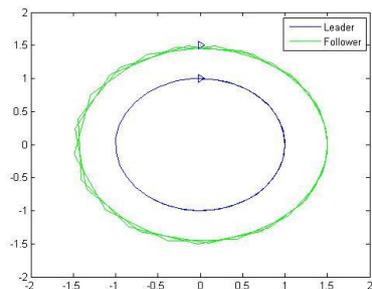
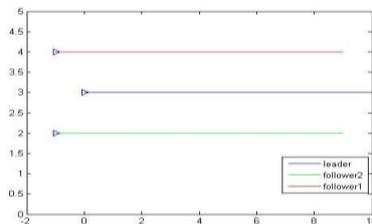
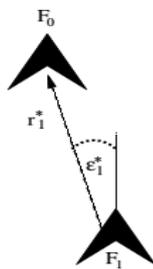
Naskah Diterima : 16 Maret 2017

Direvisi : 14 April 2017

Disetujui : 15 Juni 2017

*Korespondensi Penulis :
dyah_anggun@akprind.ac.id

Graphical abstract



Abstract

While one of UAV (unmanned aerial vehicle) has reached its capability limit, multi-UAVs are required for assigned tasks to the UAV. So far, multi-UAVs are preferred in performing large tasks resulting in higher levels of effectiveness with better survival capability than single UAVs. The most important is how UAVs can coordinate and communicate with each other so UAV can fly with formation and stay on trajectory. To overcome the problem, this is require a method of formation control. In this research proposed Line of Sight (LOS) Guidance Law for the Multiple Unmanned Aerial Vehicle (UAV). This method is applied to a UAV that is considered to be a leader and another UAV is considered a follower. An algorithm is installed to UAV followers so UAV is able to find leader's trajectory and follow it. The results obtained UAV follower can follow UAV leader with a certain distance and specific position of the UAV leader. The information needed is visual information which is the coordinates of the leader and his velocity. Control with the Line of Sight method can be applied to any path both simple like a straight line and random path with many angles. Of course with different difficulty levels

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Line of Sight, LOS

Abstrak

Ketika suatu UAV (pesawat tanpa awak) sudah mencapai batas kemampuannya, maka diperlukan multi-UAV untuk menggantikan tugas yang dibebankan kepada UAV. Selama ini multi-UAV lebih dipilih dalam menjalankan tugas yang besar sehingga didapatkan tingkat efektivitas yang lebih tinggi disertai kemampuan bertahannya yang lebih bagus dibandingkan milik UAV tunggal. Namun yang perlu diperhatikan yaitu bagaimana antar UAV dapat saling berkoordinasi dan berkomunikasi sehingga setiap UAV mampu terbang mengikuti formasi dan tetap pada lintasannya. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan suatu metode kendali formasi. Pada penelitian ini metode yang ditawarkan adalah menggunakan *Line of Sight (LOS) Guidance Law*. Metode ini diterapkan pada satu UAV yang dianggap sebagai kepala (*leader*) dan UAV lain yang dianggap sebagai pengikut (*follower*). Suatu algoritme dimasukkan ke dalam UAV *follower* sehingga UAV tersebut mampu mencari jalur milik UAV *leader* dan mengikutinya. Untuk lintasan diprogramkan pada UAV *leader*. Hasil yang didapat bahwa UAV *follower* dapat bergerak mengikuti UAV *leader* dengan jarak tertentu. Serta posisi tertentu dari UAV *leader*-nya. Informasi yang dibutuhkan untuk melakukan pengejaran adalah informasi visual, yang berupa koordinat dari *leader* serta kecepatannya. Kendali dengan metode *Line of Sight* ini dapat diterapkan untuk lintasan apapun, baik yang bersifat sederhana seperti garis lurus maupun lintasan dengan banyak sudut seperti lintasan acak, tentu saja dengan tingkat kesulitan yang berbeda.

Kata kunci: UAV, Pesawat Tanpa Awak, *Line of Sight*, LOS

© 2017 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Semakin majunya suatu peradaban, maka permasalahan yang timbul di masyarakat pun semakin berkembang, baik dalam sisi sosial, hukum, ekonomi dan pembangunan bahkan berkaitan dengan alam. Segala upaya sudah diusahakan untuk mendapatkan solusi-solusi atas permasalahan tersebut. Solusi yang sedang dilakukan ini melibatkan berbagai bidang kehidupan, salah satunya dari bidang pengetahuan. Para intelektual dan ilmuwan berlomba-lomba untuk memecahkan permasalahan tersebut, sesuai dengan bidang pengetahuan yang dikuasainya. Salah satu bidang yang banyak berperan adalah bidang teknologi elektronika dan informatika, khususnya pemanfaatan robotika untuk mempermudah berbagai kegiatan dalam masyarakat. Bidang robotika meliputi berbagai hal, baik mesin otomatis, robot-robot pekerja, teknologi kendali serta salah satu bidang robotika yang banyak dioptimalkan penggunaannya yaitu pesawat tanpa awak (UAV).

Pesawat tanpa awak memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan wahana berawak lain ataupun satelit. Penggunaan UAV juga meliputi berbagai bidang baik dibidang perindustrian, pemasyarakatan, kelautan, bahkan untuk tujuan militer dan sipil [1]. Banyaknya penggunaan UAV dikarenakan keunggulan yang dimiliki baik dari sisi fungsi, operasional serta tingkat risikonya dibandingkan dengan keadaan manual. Bahkan pengembangan kinerja UAV telah sampai pada pengoperasian dalam bentuk formasi atau multi agen yang terdiri dari sejumlah UAV [2].

Pengaplikasian formasi UAV banyak dilakukan seperti untuk pengintaian, penjagaan, pembelajaran atmosfer, penyampaian pesan, pencarian dan penyelamatan yang dalam tindakannya cukup berbahaya dan tidak disarankan menggunakan pilot serta menjangkau area yang luas. Akan lebih bermanfaat apabila beberapa UAV digerakkan menjadi satu kesatuan dan terbang dalam formasi atau Multi-agen yang diinginkan untuk mempersingkat waktu dan efisiensi [3]. Namun yang menjadi permasalahan adalah bagaimana cara mengendalikan formasi terbang UAV dengan menggunakan satu pesawat saja sebagai acuannya.

Penelitian tentang UAV menjadi *trending topic* akhir-akhir ini [4]. Mulai dari sistem kendali terbang, pencarian jalur, penghindaran halangan serta pemanfaatan fitur-fitur pesawat sebagai pendeteksi. Penggunaannya juga sangat beragam mulai dari kepentingan keamanan atau militer (seperti penjagaan, pengintaian, patroli), kepentingan sosial sampai kepada kepentingan hiburan atau pribadi. Penggunaan multi-UAV dapat menjadi pilihan tepat apabila menginginkan kinerja UAV dengan waktu yang lebih dan lebih efisien. Beberapa UAV akan dikumpulkan dan ditugaskan dalam suatu formasi yang terstruktur. Masing-masing agen (anggota susunan) akan berkoordinasi dengan agen yang lain dalam menjalankan fungsinya. Koordinasi antar UAV ini dapat dilakukan dengan mengaplikasikan suatu sistem kendali. Pemilihan algoritme yang tepat merupakan hal yang sangat penting untuk mendapatkan koordinasi dan komunikasi antar agen. Bahkan dalam beberapa penelitian menggunakan metode atau algoritme yang berlainan seperti *Artificial Physics* [5] [6], *Model Predictive Control* (MPC) [7], *Pursuit Guidance Law* (punyaku 2nya) dan *Line of Sight* (LOS) [8].

Di antara algoritma yang ada, LOS sejauh ini adalah yang paling populer. Karakteristik dan sifat kestabilannya telah dipelajari Secara luas dalam beberapa literatur [9]. Namun, LOS, secara sederhananya, dirancang untuk menghasilkan titik lintasan referensi dengan kondisi tidak ada gangguan eksternal yang terjadi pada UAV. Dalam penggunaannya untuk kendali *Motion* di mana hal ini tidak terjadi, UAV akan gagal untuk menemukan jalur yang diinginkan, karena adanya kesalahan pada eror *cross-track* yang nilainya tidak mendekati nol. Nilainya akan tergantung pada faktor-faktor seperti ukuran gangguan, geometri jalur yang diinginkan dan dinamika UAV. Untuk mengatasi hal tersebut LOS telah melalui banyak modifikasi pada penelitian sebelumnya agar mendapat hasil yang diinginkan. Namun pada penelitian ini LOS fokus digunakan hanya untuk mencari jalur untuk diikuti (*path following*) dari UAV *follower* atau UAV pengikut ke UAV *leader* ke UAV pemimpin.

2. STUDI PUSTAKA

A. Penelitian *Formasi UAV (Pesawat Tanpa Awak)*

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, UAV akan lebih bermanfaat apabila dioperasikan dalam bentuk formasi atau Multi agen dibandingkan dengan UAV yang bekerja secara sendiri-sendiri,

terutama apabila UAV bertujuan untuk melakukan kinerja pada area yang luas. Selain karena manfaatnya, penelitian tentang kendali untuk formasi atau Multi agen pun telah banyak dilakukan selama beberapa tahun terakhir, menggunakan bermacam-macam metode. Hal yang dikendalikan adalah bagaimana agar *leader* mampu menuntun *follower* agar sampai ke titik tujuan serta bagaimana *follower* tetap berada dalam formasi atau mengikuti lintasan *leader*.

Pengendalian untuk formasi terbang beberapa pesawat atau UAV telah menjadi topik khusus yang sangat populer dan banyak dilakukan penelitian berkaitan dengannya selama beberapa tahun terakhir. Secara dasar, terdapat tiga pendekatan pada kendali formasi untuk beberapa pesawat, yaitu *leader-following*, pembelajaran tingkah laku, dan struktur virtual. Pada struktur virtual, sebuah kesatuan formasi dianggap sebagai entitas tunggal, yang digunakan sebagai *rigid body* untuk mengarahkan pada orientasi yang dituju. Sedangkan *leader-following* adalah pendekatan di mana satu agen/pesawat dianggap sebagai *leader* sedangkan lainnya adalah *follower*. Untuk pembelajaran tingkah laku, seperti dialami pada penghindaran halangan. Hasil resultannya diatur oleh masing-masing bobot yang dihasilkan setiap objek.

Pengendalian untuk formasi atau Multi-agen bisa dilakukan dengan berbagai metode. Bahkan untuk melakukan penjejakan terhadap target (dalam penelitian ini diasumsikan sebagai *leader*) dapat pula meniru perilaku makhluk lain. Meskipun tidak secara sempurna dipahami, perilaku berkelompok burung, perilaku pembelajaran pada ikan bahkan tentang serangga telah memberikan inspirasi bagi konsep terkoordinasi pada operasi *multi-vehicle* [10]. Gerakan kelompok yang terkoordinasi termasuk pada pendekatan untuk sintesis gerakan berkelompok *boids* (burung dan hewan mirip ikan). Seperti pada penelitian tentang koordinasi gerak multi robot yang bias dibangun dari dasar suatu set perilaku sederhana. Aturan yang digunakan memungkinkan setiap *follower* diinformasikan untuk mengatur jangkauan dan orientasi relatif terhadap *leadernya*. [11] Masalah lain pada formasi adalah jarak antar dua UAV yang perlu diperhitungkan, atau jarak ke *leader* selama tetap memperhitungkan adanya halangan. Perubahan UAV *leader* kadang menjadi masalah tersendiri mengingat bentuk formasi akan berubah pula. Pekerjaan yang perlu dilakukan pada pengendali formasi termasuk di dalamnya tentang formasi UAV yang memungkinkan dan pergerakan dalam formasi itu sendiri.

Algoritme A* merupakan salah satu algoritme yang digunakan beberapa penelitian [12][13][14] untuk melakukan penjejakan (*Tracking*). Algoritme ini termasuk pada metode *sampling* (pencuplikan) yang membagi *workspace* menjadi sel-sel yang lebih kecil. Selain algoritme A*, terdapat algoritme Djikstra yang bertugas untuk mencari jalur terpendek dari titik awal sampai titik akhir. Parulekar [15], menggunakan algoritme Djikstra untuk navigasi kendaraan secara otomatis. Hasil pencarian jalur terpendek ini disimpan dalam bentuk matriks dan kemudian dikirimkan kepada kendaraan lain.

Metode lain adalah menggunakan kendali *sliding mode*, Suatu kendali nonlinier untuk memaksa sistem meluncur ke sepanjang sistem tujuan. Kendali ini diaplikasikan untuk penjejakan lintasan, masalah pada formasi terbang baik dalam penerbangan secara horizontal untuk pesawat tanpa awat yang berjumlah banyak sejenis quadrotor [16]. Sebuah kendali *sliding mode* digunakan *follower* untuk tetap menjaga formasinya mengikuti *leader*. Bahkan terdapat percobaan lain dengan *sliding mode* yang diterapkan dengan algoritme pursuit untuk sistem pemburu dan penangkapan target [17].

Selain untuk formasi dan multi agen pesawat UAV saja, Kendali formasi dilakukan pula untuk kombinasi antara UAV dengan *Unmanned Ground Vehicle* (UGV) [18][19]. Serta penelitian lain, yang memanfaatkan perbedaan pesawat menjadi sebuah tim untuk mengarahkan pada lingkungan yang sudah dikenal, ataupun memanfaatkan umpan balik linear sehingga setiap agen dinamis kembali menjadi integrator tunggal [10]. Ada juga pemanfaatan untuk menjejak sebuah kumpulan *centroid* [20][21]. Bahkan, meskipun tidak secara sempurna dipahami, perilaku berkelompok burung, perilaku pembelajaran pada ikan bahkan tentang serangga telah memberikan inspirasi bagi konsep koordinasi pada operasi *multi-vehicle* [22]. Aturan yang digunakan memungkinkan setiap *follower* diinformasikan untuk mengatur jangkauan dan orientasi relatif terhadap *leadernya*.

Penelitian lain menggunakan sistem pengawasan otonom untuk memberikan informasi video melalui *Ultra Wide Angle* (UWA) menggunakan platform multi-UAV. Awalnya UAV berada pada formasi yang sesuai (seperti segitiga, berlian, atau garis) dengan kamera yang mengarah ke luar untuk menutupi daerah yang diincar *region of interest* (ROI). Untuk teknik pengolahan gambar, formasi

UAV akan dioptimalkan menggunakan temporal dan sebagai informasi spasial untuk mencapai overlap yang layak antara dua sumber video yang berdekatan. Setelah itu, video yang ditangkap secara terpisah akan digabung bersama membentuk video UWA dengan mengekstrak dan mencocokkan fitur poin di *base station*. Hasil akhirnya, sebuah percobaan diilustrasikan dengan video UWA yang dihasilkan oleh sistem yang diusulkan. [23]

Hal menarik lainnya pada formasi adalah penentuan apakah ada komunikasi antar UAV atau tidak. Untuk formasi UAV dengan komunikasi, yang perlu dibahas adalah bagaimana agar perbedaan waktu (*time delay*) antara waktu pengiriman informasi dari *leader* dengan waktu diterimanya informasi oleh *follower* tidak menimbulkan masalah yang mempengaruhi formasi UAV. Terdapat beberapa penelitian untuk formasi dengan adanya komunikasi. Salah satunya menggunakan grafik asiklik langsung (*directed acyclic graph*) [24]. Pada grafik ini dideskripsikan untuk multi-agent dengan inisial bahwa agen tanpa tetangga (agen lain di dekatnya) disebut *leader* sedangkan lainnya adalah *follower*. *Leader* bergerak dalam suatu formasi dengan kecepatan yang bergantung pada waktu (*time varying velocity*) dan *follower* dapat mengakses posisi relatif dari tetangganya serta kecepatan *leader*.

Untuk formasi UAV tanpa adanya komunikasi, masalah terletak dari bagaimana cara menghitung estimasi jarak serta sudut yang hendak dituju UAV itu sendiri. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah pendekatan menggunakan Kalman Filter. Informasi yang diperoleh untuk perhitungan pada kalman filter biasanya berasal dari algoritma vision. Banyak penelitian yang telah dilakukan, seperti pada penelitian untuk pengendalian terbang beberapa UAV yang juga menghindari halangan. Penelitian ini hanya menggunakan informasi visual yang disediakan dalam formasi. Metode pengendalian formasi ini antara menggunakan kalman filter untuk mengestimasi jarak dari informasi visual atau secara langsung meregulasi ukuran citra pesawat *leader* pada citra pesawat. Ketika citra ini tidak dapat diukur maka dipastikan jaraknya sangat lebar sehingga hanya dapat menggunakan informasi dari *bearing* saja. Jarak yang relatif antar UAV pada formasi diatur melalui formasi geometri yang bergantung pada waktu (*time-dependent formation geometry*).

B. *Line of Sight (LOS) Guidance Law*

Algoritme LOS telah digunakan pada penelitian sebelumnya. Diantaranya adalah LOS. LOS telah dimodifikasi, digabungkan dengan metode lain seperti MCHSI (*Monotone Cubic Hermite Spline Interpolation*) sebagai perencanaan jalur (*path planning*) dan LOS sebagai pengikut jalur (*path following*) yang diterapkan untuk mencari model prediksi posisi dari sebuah kapal, dengan dibantu *controller* LQI. [25]

Selain untuk UAV, *LOS Guidance* dikembangkan untuk aplikasi pelacakan 2-D *straight path* dari kapal laut yang tidak aktif dan terhalang arus laut yang tak diketahui [26]. Bahkan LOS digunakan dengan dua umpan balik pengendali linierisasi untuk mencapai jalur pengikut (*path following*) masing-masing kapal laut. Kondisi integral ditambahkan ke *LOS Guidance* untuk mengimbangi efek akibat arus laut pada setiap kapal [27][28]. Hal serupa juga dilakukan oleh Caharija (2016) yang menggunakan integral LOS dengan tiga umpan balik teradaptasi untuk menetralkan arus laut vertikal [29].

3. METODE PENELITIAN

A. *Model UAV*

Diasumsikan N quadrotor dengan karakteristik gerak yang sama. Sistem multi-UAV terdiri dari N quadrotor dan satu *leader* (pemimpin). Setiap quadrotor memiliki empat rotor dan pengontrol. Pengontrol tersebut memberikan perintah kontrol pada masing-masing rotor secara terpisah. Untuk sekadar memodelkan quadrotor, kita asumsikan berikut. Pertama, quadrotor terbang cukup lambat untuk mengabaikan gaya aerodinamika dari luar seperti drag aerodinamis dan *Interface vortex* yang bekerja pada quadrotor. Kedua, rotor menanggapi perintah cukup cepat untuk mengabaikan waktu delay dari saat pengontrol memberi rotor perintah sampai rotor benar-benar menghasilkan kekuatan. Akhirnya, saat menguap tidak pernah diproduksi.

Dengan kondisi yang melayang di ketinggian konstan adalah titik equilibrium dari sistem quadrotor nonlinear, sebuah model quadrotor kolektif linear dari longitudinal dan model lateral dapat dinyatakan sebagai berikut [30] Persamaan (1):

$$\dot{r}(t) = A_c r(t) + B_c M(t) \dots\dots\dots(1)$$

Dimana $r \in R^{n_A}$ dan $M \in R^{n_U}$ adalah kombinasi keadaan (*state*) dan control masukan pada pesawat horizontal. Matrik $A_c \in R^{n_A \times n_A}$ dan $B_c \in R^{n_A \times n_U}$ didefinisikan pada Persamaan (2):

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2 \text{ dan } B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes I_2 \dots\dots\dots(2)$$

Dengan \otimes adalah produk Kronecker dan $I_n \in R^{n \times n}$ adalah matrik n-dimensi. Model waktu diskrit dapat didefinisikan Persamaan (3):

$$r(k + 1) = Ar(k) + BM(k) \dots\dots\dots(3)$$

Dengan k adalah bilangan integer *nonnegative* yang menunjukkan step waktu, dan terhubung ke waktu $t=k\Delta T$ dengan ΔT adalah waktu sampel. Selain itu $A = e^{A_c \Delta T} \in R^{n_A \times n_A}$ dan $B = \int_0^{\Delta T} e^{A_c \Delta T} d_T B_c \in R^{n_A \times n_u}$

B. Model Multi-UAV

Klasifikasi Untuk model sistem multi-UAV merupakan sekumpulan sistem dinamis dari beberapa UAV dan sebuah *leader* yang saling bertukar informasi satu sama lain. Hubungan pertukaran ini dapat dideskripsikan dengan teori graph.

Didefinisikan suatu graph $G=(V,A)$ untuk memodelkan hubungan informasi antara N-jumlah UAV dimana $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_N\}$ adalah node nya dan $A \in V \times V$ adalah tepinya. Tepi (v_i, v_j) pada graph menunjukkan jalur dari UAV i ke UAV j. dengan kata lain UAV j dapat membawa informasi dari UAV i.

Dimisalkan $A \in R^{N \times N}$, $D \in R^{N \times N}$ dan $L \in R^{N \times N}$ menjadi matrik adj, matrik sudut dan matrik graph Laplacian yang berhubungan dengan graph G. komponen adj matrik $A=[a_{ij}]$ pada Persamaan (4)

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{untuk } (v_j, v_i) \in A \\ 0, & \text{untuk selainya} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

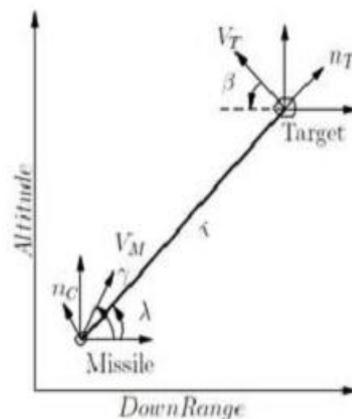
A_{ij} diset 1 jika UAV I membawa informasi dari UAV j melewati jaringan, selainya a_{ij} diset 0. Untuk matrik sudut D didefinisikan pada Persamaan (5):

$$D = \text{diag}(\text{deg}(v_1), \text{deg}(v_2), \dots, \text{deg}(v_N)) \dots\dots\dots(5)$$

Dengan $\text{deg}(v_i)$ adalah jumlah hubungan komunikasi yang masuk ke v_i . Matrik graph Laplacian L didefinisikan Persamaan (6):

$$L = D - A \dots\dots\dots(6)$$

C. LOS Guidance



Gambar 1 Skema LOS [31]



Dengan sudut seperti pada Gambar 1 dan menggunakan koordinat polar, dapat disimpulkan bahwa:

- a. R_t dan r_m adalah range target dan misil dan r adalah range relative antara target dan misil tersebut
 - b. Λ adalah sudut rotasi LOS dari nilai inisial
 - c. B dan Y adalah sudut terbang target dan misil
 - d. V_t dan V_m adalah kecepatan linier target dan misil
 - e. N_T dan n_m adalah akselerasi target dan misil
- dari beberapa dinamika tersebut dapat disimpulkan:

$$\dot{r} = v_x \dots\dots\dots(7)$$

$$\dot{v}_x = r\lambda^2 + \sin(\gamma - \lambda) \dot{u} - n_T \sin(\beta - \lambda) \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{V_T \sin(\beta - \lambda) - V_M \sin(\gamma - \beta)}{r} \dots\dots\dots(9)$$

$$\ddot{\lambda} = -2 \frac{\dot{\lambda} v_x}{r} - \frac{\cos(\gamma - \lambda)}{r} \dot{u} + \frac{n_T \cos(\beta - \lambda)}{r} \dots\dots\dots(10)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{V_M} \dot{u} \dots\dots\dots(11)$$

$$\dot{\beta} = \frac{n_T}{V_T} \dots\dots\dots(12)$$

Dengan u adalah input skalar. Sistem state $x = A \in \mathbb{R}^{N \times N}$.

Keadaan sistem diketahui sebagai $x = [x_1, x_2, \dots, x_6]^T \in \mathbb{R}^6$ dengan $x_1=r, x_2=v_x, x_3=\lambda, x_4=\dot{\lambda}, x_5=Y, x_6=\beta$
Maka sistem dapat dituliskan sebagai :

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u + g_2(x)d_1 \dots\dots\dots(13)$$

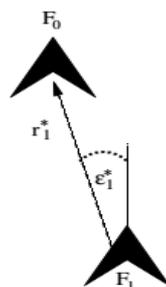
Dengan nilai $f(x), g_1(x)$ dan $g_2(x)$ adalah

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 x_4^2 \\ x_4 \\ -2 \frac{x_2 x_4}{x_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, g_1(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(x_5 - x_3) \\ -\frac{\cos(x_5 - x_3)}{x_1} \\ \frac{1}{V_M} \\ 0 \end{bmatrix}, g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(x_6 - x_3) \\ 0 \\ \frac{\cos(x_6 - x_3)}{x_1} \\ 0 \\ \frac{1}{V_T} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(14)$$

D. Sistem Kendali Multi-UAV

Sistem pengejaran yang dibuat, diklasifikasikan sesuai lintasan yang dilalui *leader*. Terdapat dua lintasan, yaitu lintasan sederhana serta lintasan acak yang dapat berubah-ubah dan tanpa aturan khusus. Sedangkan untuk masing-masing lintasan diklasifikasikan lagi menjadi lintasan tanpa halangan maupun lintasan dengan halangan. Untuk *follower*-nya terdiri dari beberapa UAV.

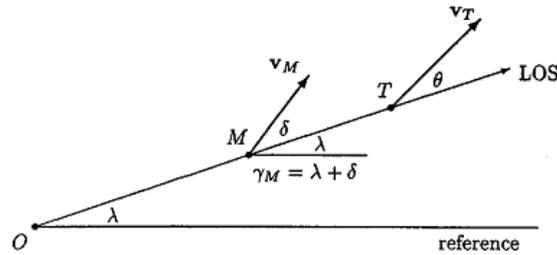
Pada lintasan sederhana dibuat sebuah lintasan yang berbentuk garis lurus serta kurva. Untuk lintasan ini dicobakan algoritme untuk sebuah *leader - follower*. *Follower* diharapkan dapat mengikuti bentuk lintasan *leader* dan mencapai tujuan akhir yang sama (sesuai). Algoritme yang digunakan merupakan *LOS Guidance Law* yang juga berperan sebagai umpan balik ke sistem agar memperoleh koordinat posisi sesuai *leadernya*.



Gambar 2. Formasi dua buah UAV dan nilai yang diinginkan



Secara sederhana posisi *leader* dan *follower* dapat dilihat pada Gambar 2 [32]. Diasumsikan terlebih dahulu terdapat dua buah UAV dimana F_0 adalah *leader* dan F_1 adalah *follower*-nya. Jarak yang diinginkan serta sudutnya antara *leader* dan *follower* disimbolkan dengan rI^* dan ϵI^* . Nilai estimasi *Line of Sight (LOS) rate* dan sudutnya diperlukan untuk menghasilkan nilai yang diinginkan tersebut.



Gambar 3. Geometri LOS Guidance [32]

Sedangkan dari Gambar 3 merupakan aturan LOS yang digunakan untuk *LOS Guidance* geometri planar. Pada titik planar O (titik referensi), T (target) dan M (misil) terdapat vector kecepatan vT dan vM . Ox merupakan garis referensi dengan sudut LOS λ yang terukur. Dari referensi yang sama jalur T dengan sudut γT dan jalur M dengan sudut γM juga terukur. Sedangkan vT dan vM adalah sudut θ dan δ dengan LOS. Panjang rT dan rM adalah jarak OT dan OM. M dan T terletak pada jalur yang sama maka persamaannya menjadi [33]:

$$\lambda' = \frac{vT \sin \theta}{\gamma T} = \frac{vM \sin \delta}{\gamma M} \tag{15}$$

Dari persamaan (15) tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai LOS rate dengan memposisikan UAV *leader* pada titik M dan *followernya* sebagai T. Besarnya nilai LOS akan digunakan untuk mendapatkan besaran percepatan. Percepatan ini diperoleh berdasarkan *proportional navigation* dari LOS seperti pada Persamaan (16) berikut ini [33]:

$$a_c^N = NV_i (K_N \hat{\lambda} + (1 - K_N) e_{\epsilon i}) \tag{16}$$

Dengan a_c^N adalah percepatan normal, N adalah konstanta *proportional navigation*, V_i adalah kecepatan *forward follower*, K_N adalah parameter range [0,1], $\hat{\lambda}$ adalah LOS rate dan ϵ adalah *lead angle*. Hasil persamaan tersebut digunakan pada model UAV untuk penelitian ini, dengan persamaan 17, 18, 19 dan Persamaan 20.

$$x_i = V_i \cos \psi_i \tag{17}$$

$$\dot{x}_i = V_i \sin \psi_i \tag{18}$$

$$= a_i^N / V_i \tag{19}$$

$$\dot{\gamma} \tag{20}$$

Untuk mengatasi kesalahan pada multi-UAV yang, setiap UAV perlu dibekali dengan kemampuan membuat keputusan sendiri namun tetap bersesuaian dengan UAV lainnya. Misalkan setiap UAV bisa membuat keputusan yang kooperatif berikut:

$$Y = F(x) \tag{21}$$

dengan X adalah *input* keputusan, F adalah metode keputusan, Y adalah *output* keputusan. Untuk semua UAV keputusan diberlakukan, hanya jika kedua metode keputusan F dan masukan keputusan X sama, maka hasilnya keputusan Y keluaran tiap UAV sama.



Untuk semua UAV, agar menjaga F dan X sama, tiga kondisi berikut harus terpenuhi:

- 1) Setiap UAV harus terus bersama dengan UAV lainnya, yang memastikan setiap UAV untuk mendapatkan keputusan yang sama pada saat bersamaan
- 2) Untuk semua UAV dan keputusan yang sama, metode keputusan juga sama;
- 3) Untuk semua UAV dan keputusan yang sama, masukan keputusan juga sama.

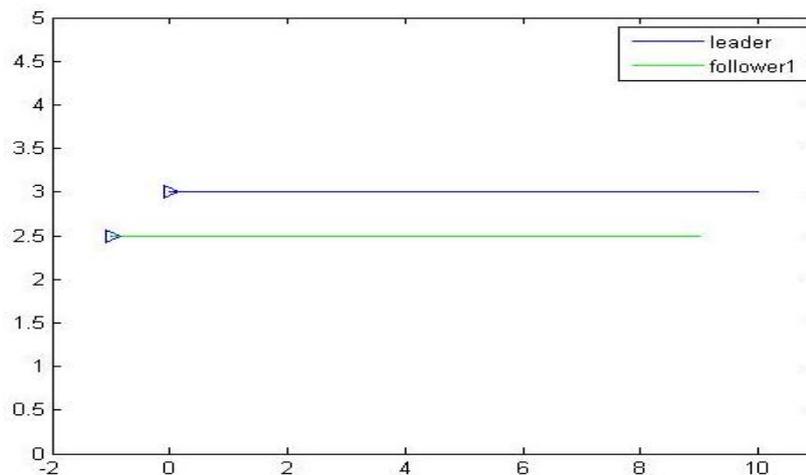
Untuk memenuhi ketiga kondisi di atas, alur kerja diperlukan pada multi-UAV. Alur kerja merupakan urutan kegiatan yang terdiri dari deskripsi aktivitas, kondisi awal dan penghentian kerja. Fungsinya adalah menerjemahkan tugas ke dalam urutan kegiatan, dan untuk mengendalikan kegiatan berikutnya. Berikut adalah beberapa kondisi yang harus dipenuhi pada alur kerja [34]:

- 1) Untuk terus bersama dengan UAV lainnya, semua UAV harus mengatur alur kerja yang sama sebelum memulai tugasnya
- 2) Menjaga metode pengambilan keputusan F yang diberikan untuk semua UAV, keputusan yang sama pada Metode F dari suatu kegiatan pengambilan keputusan sudah ditentukan sebelumnya
- 3) Menjaga masukan keputusan koperasi yang diberikan untuk semua UAV, masukannya harus disinkronisasi sebelum membuat keputusan.

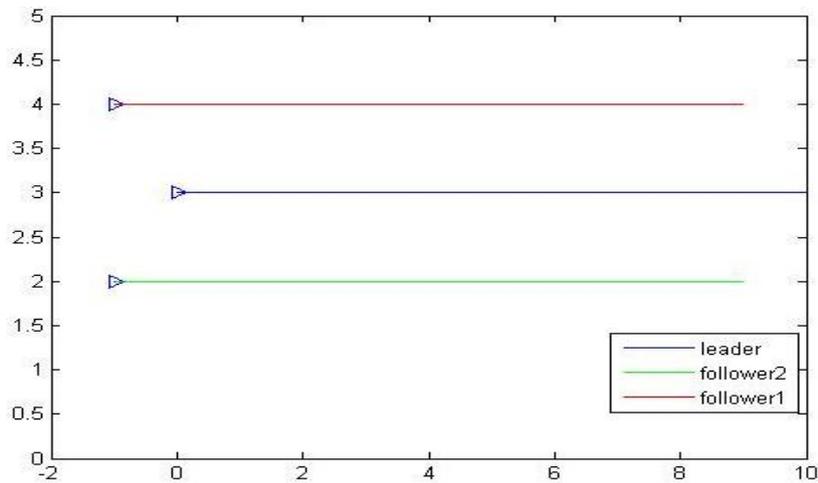
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan lintasan lurus, lintasan berbelok dan lintasan melingkar. Pada lintasan sederhana dibuat sebuah lintasan yang berbentuk garis lurus serta kurva dengan sebuah *leader* – *follower*. *Follower* diharapkan dapat mengikuti bentuk lintasan *leader* dan mencapai tujuan akhir yang sama (sesuai). Metode yang digunakan merupakan metode *Line of Sight Guidance Law* yang juga berperan sebagai umpan balik ke sistem agar memperoleh koordinat posisi sesuai leadernya.

Pada lintasan garis lurus digunakan sebuah lintasan berupa garis horizontal yang mengikuti sumbu x. Jumlah *follower* yang mengikuti lintasan adalah satu *follower* (tunggal) serta lebih dari satu (jamak). Hasil keduanya sama, yaitu *follower* dapat bergerak mengikuti *leader* tepat di belakangnya. Pada Gambar 4 (b) menunjukkan formasi yang dibentuk oleh tiga pesawat (satu *leader* dan dua *follower*). Terlihat bahwa masing-masing *follower* bergerak mengikuti dan mempunyai lintasan yang sama dengan *leadernya*. Letak *follower* tersebut berada di atas dan di bawah letak lintasan *leader* mengapit dan tepat di belakangnya dengan selisih waktu satu detik. Koordinat awal *leader* adalah (0;3) dengan titik akhir pada koordinat (10;3). Untuk *follower1* ada pada koordinat (-1; 2) dan titik akhir koordinat (9;2), sedangkan *follower2* pada titik koordinat awal (-1;4) dan berakhir pada koordinat (9;4). Garis biru menunjukkan lintasan milik *leader*, garis merah untuk lintasan *follower1* sedangkan garis hijau untuk lintasan *follower2*.



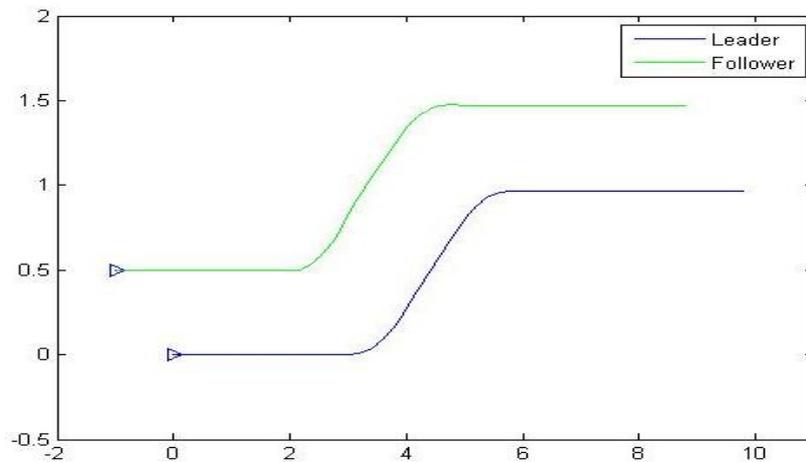
(a)



(b)

Gambar 4 Lintasan Garis Lurus (a) Tunggal (b) 2 Follower

Pada lintasan lain berbentuk kurva seperti terlihat pada Gambar 5 dapat terlihat bahwa posisi awal berada pada titik koordinat (0;0). Untuk proses pengejarannya, *follower* diletakkan tepat di belakang *leader* dengan selisih waktu satu detik yaitu pada koordinat (-1;0,5). Kemudian setelah disimulasi, hasilnya menunjukkan bahwa lintasan yang dilalui *follower* berbentuk menyerupai dan mengikuti lintasan milik *leader*. Lintasan berwarna garis hijau merupakan lintasan milik *follower* sedangkan lintasan berwarna biru merupakan lintasan milik *leader* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil simulasi

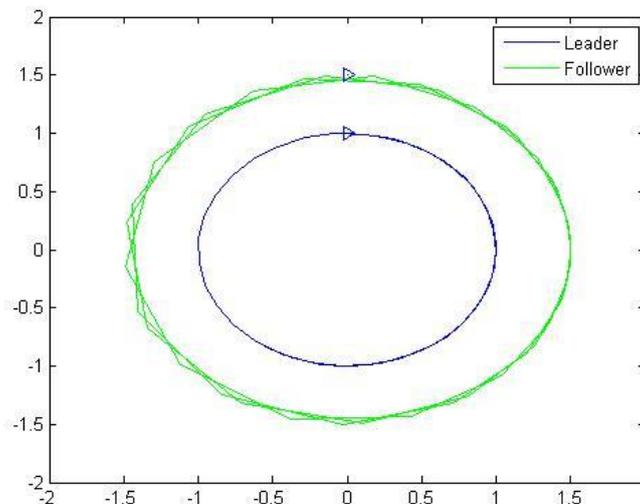
Perlu diketahui, bahwa bentuk lintasan *follower* memiliki sedikit lonjakan dibandingkan dengan lintasan *leadernya*. Namun pada akhirnya *follower* mampu kembali mengikuti bentuk lintasan *leader*. Pengejaran yang optimal akan menghasilkan koordinat *follower* dengan berjarak 1 koordinat sumbu x ke kiri dan 0,5 koordinat sumbu y dari koordinat milik *leader*. Sedangkan apabila dilihat dari Tabel 1 hasilnya menunjukkan bahwa antara koordinat *follower* tidak selalu memiliki selisih 1 koordinat kurangnya pada sumbu x (karena ke kiri maka dikurang 1) dan 0,5 koordinat lebihnya dari sumbu y (karena ke atas sehingga ditambah 0,5) dibandingkan dengan koordinat milik *leader*. Hal ini terjadi terutama pada saat melewati 3 detik di mana *leader* mulai membentuk kurva. Karena perbedaan inilah dapat dicari nilai persentase kesalahannya yang dilihat dari acuan posisi *leader* yang terukur. Dengan selisih -1 dari sumbu x dan 0,5 dari sumbu y didapat posisi *follower* yang seharusnya.

Tabel 1 Lintasan kurva

Detik Ke-	Posisi <i>Leader</i>		Posisi <i>Follower</i>	
	X	Y	X	Y
0	0	0	-1,0	0,5
3	3	0	1,9915	0,5
5	4,8364	0,7243	3,8159	1,2608
8	7,7953	0,9691	6,7848	1,4719
10	9,7953	0,9691	8,7848	1,4719

Perbedaan dari hasil perhitungan posisi *follower* dengan hasil pengukuran inilah yang dapat digunakan untuk mencari kesalahan relatifnya. Dari hasil perhitungan, rata-rata perbedaan (selisih) nilai perhitungan dengan hasil simulasi untuk sumbu X sebesar 0,012 dan sumbu Y sebesar 0,095 serta persentase kesalahan rata-ratanya 1,15% untuk sumbu X dan 0,91% untuk sumbu Y. Hasil tersebut merupakan hasil yang paling optimal dengan konstanta pursuit N bernilai 4,5.

Pada lintasan kontinu ini digunakan sebuah lintasan berupa lingkaran dengan titik akhir lintasan berada pada titik awalnya yaitu pada koordinat (0;1). Titik tengah lintasan berada pada koordinat (0;0). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Lintasan lingkaran

Dari Gambar 6 diatas terlihat bahwa *leader* dan *follower* memiliki bentuk lintasan yang sama dengan garis biru adalah lintasan milik *leader* dan garis hijau adalah lintasan milik *follower*. *Leader* diatur pada koordinat awal (0;1) dan berakhir pada titik yang sama. Sedangkan *follower* tepat berada dibelakang *leader* dengan jarak sebesar 0.5 dari lintasan *leader*. Karena hal itulah *follower* berada pada titik awal koordinat (0;1.5) dan mencapai koordinat akhir yang sama. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Lintasan lingkaran

Detik Ke-	Posisi Leader		Posisi Follower	
	X	Y	X	Y
0	0	1	0	1.5
3	0.141	-0.990	-0.022	1.500
5	-0.959	0.284	1.161	-0.950
8	0.989	-0.146	-0.675	-1.340
10	-0.544	-0.839	-0.706	1.323

5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

- Metode *Line of Sight Guidance Law* dapat diterapkan sebagai kendali pada pengejaran objek formasi UAV. dalam hal ini dilakukan oleh pesawat yang bertindak sebagai *follower* terhadap pesawat lain di depannya yang dianggap sebagai *leader*.
- Informasi yang dibutuhkan untuk melakukan pengejaran adalah informasi visual. yang berupa koordinat dari *leader* serta kecepatannya.
- Kendali dengan metode *Line of Sight* ini dapat diterapkan untuk lintasan apapun. baik yang bersifat sederhana seperti garis lurus maupun lintasan dengan banyak sudut seperti lintasan acak. tentu saja dengan tingkat kesulitan yang berbeda
- Untuk lintasan lurus. pengejaran optimal terjadi saat konstanta *proportional navigation* (N) bernilai 3 dengan hasil lintasan *follower* yang sama dengan lintasan *leadernya*
- Untuk lintasan kurva. pengejaran optimal terjadi saat konstanta *proportional navigation* (N) bernilai 4.5 dengan hasil lintasan *follower* memiliki perbedaan sebesar 0.01 dari koordinat x dan 0.05 dari koordinat y dibandingkan dengan lintasan *leadernya*

5.2 Saran

Dalam penelitian ini masih banyak sekali kekurangan dan ketidaksempurnaan. Untuk itu, perlu dilakukan pengembangan agar ke depannya menjadi sempurna ataupun lebih baik lagi sehingga memiliki beberapa saran, diantaranya:

- Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai teknik atau metode kendali UAV yang lebih fleksibel dan mampu mengikuti leader dengan tepat dan akurat.
- Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai teknik-teknik pengendalian sistem multi-UAV

REFERENSI

- [1] H. Lee, S. Uav, and K. Aerospace, "IMPLEMENTATION OF COLLISION AVOIDANCE SYSTEM USING TCAS II TO UAVS Necessity of Collision Avoidance System On-Board Requirements Types of Collision Avoidance Sensors," pp. 1–9, 2005.
- [2] N. H. M. Li and H. H. T. Liu, "Formation UAV Flight Control using Virtual Structure and Motion Synchronization," pp. 1782–1787, 2008.
- [3] D. Luo, T. Zhou, and S. Wu, "Obstacle avoidance and formation regrouping strategy and control for UAV formation flight," *2013 10th IEEE Int. Conf. Control Autom.*, pp. 1921–1926, Jun. 2013.
- [4] E. D. Arisandi and P. Lapan, "Kemudahan Pemrograman Mikrokontroler Arduino Pada Aplikasi Wahana Terbang," vol. 3, no. 2, pp. 3–6, 2014.
- [5] Y. Fu, X. Wang, L. Huan, and H. Zhu, "Multi-UAV Formation Control Method Based on Modified Artificial Physics," pp. 2523–2529, 2016.
- [6] F. U. Yu, W. Xiangke, Z. H. U. Huayong, and Y. U. Yangguang, "Parameters Optimization of Multi-UAV Formation Control Method based on Artificial Physics," pp. 2614–2619, 2016.
- [7] Y. Kuriki and T. Namerikawa, "Formation Control with Collision Avoidance for a Multi-UAV System using Decentralized MPC and Consensus-based Control," pp. 3079–3084, 2015.

- [8] D. Anggun Sartika, "PERANCANGAN KENDALI PURSUIT UNTUK PESAWAT TANPA AWAK (UAVS) BERBASIS LINE OF SIGHT (LOS) DAN REPULSIVE POTENTIAL FIELD," *Univ. Gadjah Mada*, 2015.
- [9] B. F. Giulietti and M. Innocenti, "By Fabrizio Giulietti, Lorenzo Pollini, and Mario Innocenti," no. December, pp. 34–44, 2000.
- [10] Y. Gu, B. Seanor, G. Campa, M. R. Napolitano, and L. Rowe, "Design and Flight Testing Evaluation of Formation Control Laws," vol. 14, no. 6, pp. 1105–1112, 2006.
- [11] W. Ren and R. W. Beard, "Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures."
- [12] X. Liu, "A Comparative Study of A-star Algorithms for Search and rescue in Perfect Maze," 2011.
- [13] H. Wang, J. Zhou, G. Zheng, and Y. Liang, "HAS: Hierarchical A-Star Algorithm for Big Map Navigation in Special Areas," *2014 5th Int. Conf. Digit. Home*, pp. 222–225, Nov. 2014.
- [14] S. M. Lavalle, "Simplicial Dijkstra and A * Algorithms : From Graphs to Continuous Spaces," pp. 1–19.
- [15] M. Parulekar, V. Padte, T. Shah, K. Shroff, and R. Shetty, "Automatic Vehicle Navigation using Dijkstra ' s Algorithm," 2013.
- [16] D. A. Mercado, R. Castro, and R. Lozano, "Quadrotors Flight Formation Control Using a Leader-Follower Approach *," no. 5, pp. 3858–3863, 2013.
- [17] T. Yamasaki and S. N. Balakrishnan, "Sliding mode based pure pursuit guidance for UAV rendezvous and chase with a cooperative aircraft," *Proc. 2010 Am. Control Conf.*, pp. 5544–5549, Jun. 2010.
- [18] A. Aghaeeyan and H. A. Talebi, "UAV Guidance For Tracking Control Of Mobile Robots In Presence Of Obstacles 2," pp. 135–140, 2013.
- [19] B. Y. B. E. N. Grocholsky, J. Keller, V. Kumar, and G. Pappas, "A Scalable Approach to the Detection and Localization," no. September, pp. 16–26, 2006.
- [20] H. G. Tanner and D. K. Christodoulakis, "Decentralized Cooperative Control of Heterogeneous Vehicle Groups," no. March 2007, pp. 1–31.
- [21] N. Michael, J. Fink, and V. Kumar, "Controlling a Team of Ground Robots via an Aerial Robot," pp. 965–970, 2007.
- [22] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz, "Swarm Intelligence: From natural to Artificial Systems," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 4, no. 2, pp. 192–193, 2000.
- [23] C. Yu, J. Wang, and J. Shan, "Multi-UAV UWA Video Surveillance System," vol. 2016, no. November, pp. 13–15, 2016.
- [24] W. Ding, G. Yan, Z. Lin, and Y. Lan, "Leader-following formation control based on pursuit strategies," *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 4825–4830, Oct. 2009.
- [25] T. Nagai, "Applying Position Prediction Model for Path Following of Ship on Curved Path," pp. 3675–3678, 2016.
- [26] A. M. Lekkas and T. I. Fossen, "Trajectory Tracking and Ocean Current Estimation for Marine Underactuated Vehicles," 2014.
- [27] D. J. W. Belleter and K. Y. Pettersen, "Path Following for Formations of Underactuated Marine Vessels under Influence of Constant Ocean Currents," 2014.
- [28] C. Chen, J. Kouh, and J. Tsai, "Modeling and Simulation of an AUV Simulator With Guidance System," vol. 38, no. 2, pp. 211–225, 2013.
- [29] W. Caharija, "Integral Line-of-Sight Guidance and Control of Underactuated Marine Vehicles."
- [30] "Line-of-Sight Guidance for Path Following of Marine Vehicles Line-of-Sight Guidance for Path Following of Marine Vehicles," no. June 2013, 2015.
- [31] N. F. Palumbo, R. A. Blauwkamp, and J. M. Lloyd, "Basic Principles of Homing Guidance," pp. 25–41.
- [32] a. Betser, P. a. Vela, G. Pryor, and a. Tannenbaum, "Flying in formation using a pursuit guidance algorithm," *Proc. 2005, Am. Control Conf. 2005.*, pp. 5085–5090, 2005.
- [33] N. . Shneydor, *Missile Guidance And Pursuit*. .
- [34] C. Wenjing, "A New Multi-UAV Cooperation Method," 2016.