

## BAB II

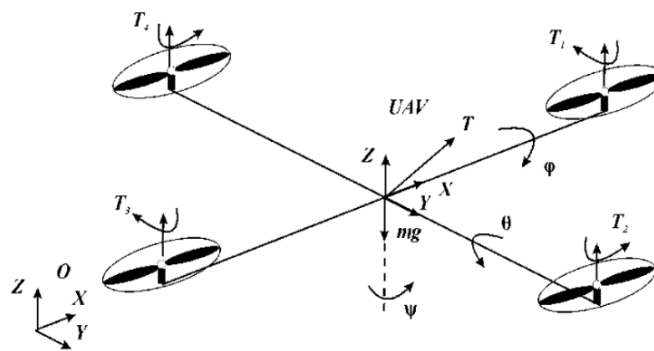
### TEORI

Teori yang akan digunakan pada penelitian adalah persamaan dinamika *drone* yang merepresentasikan model sistem *drone*, persamaan fungsi transfer *first order plus time delay* (FOPTD) sebagai pendekatan model sistem *drone*, komunikasi yang digunakan pada *drone*, pengontrol PD pada *drone*, pendeteksian marka fidusial persegi (MFP) untuk penentuan posisi *drone*, dan algoritma pemisahan untuk menghindari tabrakan.

#### 2.1 Model Sistem Drone

##### 2.1.1 Persamaan Dinamika Drone

*Drone* merupakan kendaraan terbang nirawak yang dikembangkan dari konsep robot terbang. *Drone* memiliki empat motor dengan dua pasang motor yang bergerak berlawanan arah. Selain itu, *drone* dapat dikontrol secara manual dengan pengontrol jarak jauh menggunakan kontrol otomatis [8]. Dinamika *drone* dapat digambarkan pada koordinat tetap yang terhubung dengan bumi (kerangka O) dan koordinat bergerak yang bertepatan dengan pusat gravitasi *drone* (kerangka UAV). Pada Gambar 2.1, variabel  $\phi, \theta, \psi$  merupakan sudut guling, angguk, dan belok yang digambarkan pada koordinat bumi (kerangka O) [9].



**Gambar 2.1** Skema gaya yang ada pada *drone* dalam kerangka sistem *drone* [9].

Persamaan dinamika dari *drone* dalam ruang 3D dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} mI & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega \times mV \\ \Omega \times j\Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ \tau \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dengan  $V = (V_x, V_y, V_z)^T = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$  merupakan vektor linier,  $\Omega = (\Omega_\phi, \Omega_\theta, \Omega_\psi)^T = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$  merupakan kecepatan sudut,  $m$  merupakan massa *drone*,  $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  merupakan matriks inersia objek yang dikontrol,  $I$  merupakan matriks identitas,  $F$  merupakan gaya resultan,  $\tau$  merupakan momen resultan yang bekerja pada pusat massa *drone*. Dengan mengabaikan gaya eksternal, gaya yang dihasilkan untuk menentukan pergerakan *drone* di bidang vertikal dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F^T = [0 \quad 0 \quad u] \quad (2.2)$$

Dalam sistem koordinat Euler, orientasi *drone* relatif terhadap sistem koordinat inersial XYZ sehingga dapat direpresentasikan oleh matriks rotasi  $R$ .

$$F_V = R(\psi, \theta, \phi)F \quad (2.3)$$

Dengan matriks rotasi  $R$  dituliskan seperti berikut.

$$R(\psi, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\theta \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\theta \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Pada matriks di atas,  $C_\alpha = \cos \alpha$  dan  $S_\alpha = \sin \alpha$ . Apabila Persamaan (2.3) – (2.4) dilakukan kombinasi, maka akan didapatkan hasil persamaan berikut.

$$m\ddot{x} = u_1(C_\psi S_\theta S_\phi + S_\psi C_\theta) \quad (2.5)$$

$$m\ddot{y} = u_2(S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\theta) \quad (2.6)$$

$$m\ddot{z} = u_3(C_\theta C_\phi) - mg \quad (2.7)$$

$u_1, u_2, u_3, u_4$  merupakan gaya mekanik yang memberikan gerakan rotasi pada *drone* yang direpresentasikan sebagai berikut.

$$u_1 = k_1 \Omega_1^2 + k_2 \Omega_2^2 + k_3 \Omega_3^2 + k_4 \Omega_4^2 \quad (2.8)$$

$$u_2 = k_1 \Omega_1^2 + k_2 \Omega_2^2 - k_3 \Omega_3^2 - k_4 \Omega_4^2 \quad (2.9)$$

$$u_3 = k_4 \Omega_4^2 - k_2 \Omega_2^2 \quad (2.10)$$

$$u_4 = k_1 \Omega_1^2 - k_3 \Omega_3^2 \quad (2.11)$$

$k_i$  pada Persamaan (2.8) – (2.11) merupakan faktor yang menghubungkan momen dengan kecepatan sudut  $\omega_i$  dari motor ke- $i$ . Kemudian, misalkan  $J_1, J_2, J_3$  adalah momen inersia dari *drone* di sumbu X, Y, dan Z yang melewati pusat massa,  $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$  merupakan kecepatan sudut yang berkaitan dengan sumbu X, Y, dan Z, serta gaya eksternal dari *drone* dapat diabaikan, maka persamaan diferensial kecepatan sudut dapat direpresentasikan dalam bentuk berikut.

$$J_1 \ddot{\phi}(t) = (J_2 - J_3) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) \quad (2.12)$$

$$J_2 \ddot{\theta}(t) = (J_3 - J_1) \dot{\psi}(t) \dot{\phi}(t) \quad (2.13)$$

$$J_3 \ddot{\psi}(t) = (J_1 - J_2) \dot{\phi}(t) \dot{\theta}(t) \quad (2.14)$$

Persamaan (2.12) – (2.14) di atas merupakan persamaan dinamika Euler. Ketika aksi dari motor  $M_1 - M_4$  dipertimbangkan, maka Persamaan (2.12) – (2.14) dapat direpresentasikan sebagai berikut.

$$J_1 \ddot{\phi}(t) = (J_2 - J_3) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) - J_r \dot{\theta}(t) \Omega + d\bar{u}_3(t) \quad (2.15)$$

$$J_2 \ddot{\theta}(t) = (J_3 - J_1) \dot{\psi}(t) \dot{\phi}(t) - J_r \dot{\psi}(t) \Omega + d\bar{u}_4(t) \quad (2.16)$$

$$J_3 \ddot{\psi}(t) = (J_1 - J_2) \dot{\phi}(t) \dot{\theta}(t) + \bar{u}_2(t) \quad (2.17)$$

Pada persamaan di atas,  $d$  merupakan jarak antara pusat massa *drone* dan motor  $\mathfrak{S}_i$ , sedangkan  $J_r$  merupakan inersia motor. Momen  $J_1$  dan  $J_2$  pada ketinggian tetap di sumbu Z dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$J_1 = J_2 = J \quad (2.18)$$

Dengan demikian, dinamika rotasi dari *drone* dari Persamaan (2.15) – (2.17) dapat direpresentasikan sebagai berikut.

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{1}{J}[(J - J_3)\dot{\theta}(t)\dot{\psi}(t) - J_r\dot{\theta}(t)\Omega + d\bar{u}_3(t)] \quad (2.19)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{J}[(J - J_1)\dot{\psi}(t)\dot{\phi}(t) - J_r\dot{\psi}(t)\Omega + d\bar{u}_4(t)] \quad (2.20)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{1}{J}[\bar{u}_2(t)] \quad (2.21)$$

Persamaan (2.14) – (2.17) dan Persamaan (2.19) – (2.21) merupakan persamaan orde tinggi yang menghubungkan input  $u_1, u_2, u_3, u_4$  ke sudut guling, angguk, belok dan akhirnya ke XYZ.

### 2.1.2 Persamaan Dinamika *Drone* Menggunakan FOPTD

Karena inersia *drone* relatif besar, maka respons dinamika kecepatan terhadap input tegangan aktuator *drone* cenderung tidak beresilasi, sehingga menyerupai profil *first order plus time delay* (FOPTD). FOPTD merupakan model pendekatan yang terdiri dari komponen dasar orde pertama dan waktu tunda [10 – 11]. Dalam domain waktu, pendekatan FOPTD dapat dirumuskan secara umum sebagai berikut.

$$\frac{1}{\tau} \frac{d}{dt} y(t) + y(t) = Ku(t - t_d) \quad (2.25)$$

Dengan demikian, persamaan dinamika dari *drone* dapat dinyatakan sebagai berikut dalam domain waktu menggunakan FOPTD.

$$\tau \left( \frac{d}{dt} v_x(t) \right) + v_x(t) = Ku(t - t_d) \quad (2.26)$$

$$\tau \left( \frac{d}{dt} v_y(t) \right) + v_y(t) = Ku(t - t_d) \quad (2.27)$$

K merupakan penguatan,  $\tau$  merupakan konstanta waktu, dan  $t_d$  merupakan waktu tunda. Kemudian, Persamaan (2.26) – (2.27) ditransformasi ke dalam domain laplace dan direpresentasikan sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_d s} \quad (2.28)$$

Persamaan (2.28) tersebut menghubungkan respons sistem dalam bentuk fungsi transfer. Untuk keperluan perancangan kontrol, Persamaan (2.28) perlu diubah dengan menggunakan pendekatan Padé orde pertama, sehingga fungsi FOPTD

Persamaan (2.28) dapat disimulasikan pada sistem. Berikut merupakan penurunan fungsi FOPTD dengan menggunakan pendekatan Padé.

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1 - \frac{T_d}{2}s}{1 + \frac{T_d}{2}s} \quad (2.29)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (2.29) ke dalam Persamaan (2.28), bentuk fungsi FOPTD dapat diubah menjadi Persamaan (2.30) dalam bentuk pendekatan Padé, seperti berikut.

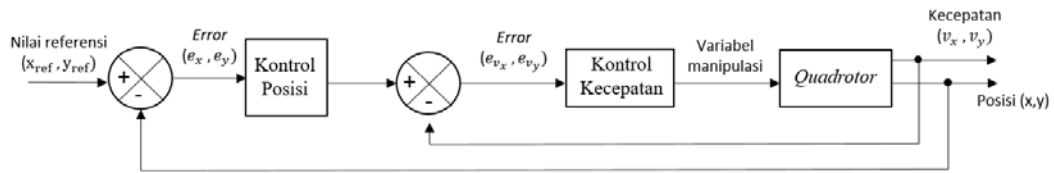
$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \times \frac{1 - \frac{T_d}{2}s}{1 + \frac{T_d}{2}s} \quad (2.30)$$

## 2.2 Pengontrol PD

Pengontrol PID merupakan jenis pengontrol klasik yang digunakan dalam sistem kontrol otomatis untuk mengatur suatu sistem. Salah satu jenis pengontrol klasik tersebut adalah pengontrol PD [11 – 13]. Pengontrol proporsional derivatif (PD) merupakan pengontrol yang terdiri dari dua parameter, yaitu penguatan proporsional  $K_p$  dan waktu derivatif  $T_d$ . Pengontrol derivatif digunakan untuk mempercepat respons awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Dengan demikian, pengontrol derivatif digunakan dengan pengontrol lainnya. Pengontrol PD dapat dituliskan pada persamaan (2.31).

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.31)$$

Gambar 2.2 merupakan diagram blok pengontrol PD yang akan digunakan pada sistem *drone*. Parameter pengontrol PD dirancang dengan menggunakan metode *root locus*. Selain itu, pengontrol PD dipilih untuk menghilangkan *undershoot* yang dihasilkan dari Persamaan (2.31). Gambar 2.2 menunjukkan bahwa *drone* telah memiliki komponen integral, sehingga hasil dari pengontrol PD akan terintegralkan dan menjadi *set poin* untuk mengatur kecepatan *drone*.



**Gambar 2.2.** Diagram blok pengontrol PD pada *drone*.

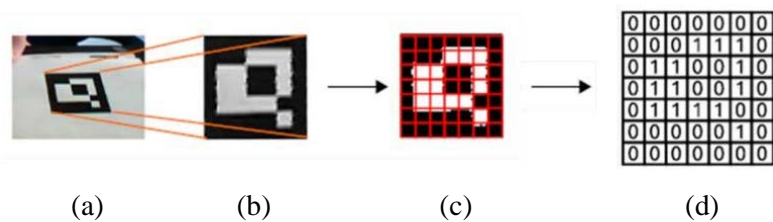
### 2.3 Marka Fidusial Persegi

Marka fidusial persegi (MFP) merupakan marka berbentuk persegi yang memiliki pola tertentu di setiap markanya dan mengandung kode unik tertentu, seperti pada Gambar 2.3. Dengan demikian, marka ini digunakan untuk mengidentifikasi dan memposisikan objek secara akurat [7]. Selain itu, MFP memiliki empat titik korespondensi yang dapat berfungsi sebagai estimasi pose kamera. Pada penelitian ini, pustaka pendeteksi yang digunakan adalah pustaka ArUco[14].



**Gambar 2.3.** Ilustrasi marka ArUco [15].

Deteksi marka MFP dilakukan dengan dua proses, yaitu deteksi marka dan identifikasi informasi marka. Proses deteksi marka MPF dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4.** Proses pengolahan citra marka (a) penangkapan marka, (c) Pengambilan citra, (c) pembagian sel citra, dan (d) informasi bit hitam putih [6].

Pada proses Gambar 2.4 (a) – (b), citra yang ditangkap oleh kamera akan dianalisis untuk menemukan bentuk-bentuk persegi yang menjadi kandidat marka [14 – 15]. Hal pertama yang dilakukan adalah proses ambang pada citra masukan menggunakan metode ambang lokal untuk memperhitungkan variabel iluminasi. Kemudian, kontur diekstraksi dari hasil citra sebelumnya dan dilakukan penyaringan. Citra yang dihasilkan dari proses penyaringan tersebut akan dilakukan pendekatan poligon untuk mendapatkan bentuk persegi, sehingga citra selain

bentuk segi empat poligon akan dibuang. Selain itu, penyaringan ekstra juga diterapkan untuk menghapus kontur yang terlalu kecil atau terlalu besar dan menghapus kontur yang terlalu dekat satu sama lain.

Setelah proses deteksi marka, proses identifikasi informasi marka akan dilakukan dengan menganalisis kode internal pada setiap marka [14 – 15]. Proses identifikasi diawali dengan mengekstraksi bit-bit yang ada pada setiap marka. Untuk mendapatkan tanda dalam bentuk kanonik, transformasi perspektif diterapkan terlebih dahulu pada proses tersebut. Citra kanonik yang dihasilkan akan dilakukan pengembangan menggunakan metode Otsu untuk memisahkan bit putih dan hitam, seperti Gambar 2.4 (b). Selanjutnya, citra tersebut akan dibagi menjadi sel-sel berbeda sesuai dengan ukuran tanda dan ukuran tepi, seperti Gambar 2.24 (c). Kemudian, jumlah piksel hitam atau putih di setiap sel dihitung untuk menentukan bit putih atau hitam. Pada tahap terakhir, Gambar 2.4 (d), bit-bit tersebut dianalisis sesuai dengan kamus yang tersedia pada marka ArUco.

## 2.4 *Moving Average*

*Moving average* merupakan salah satu konsep untuk melakukan analisis data dengan cara merata-ratakan serangkaian data yang terus berubah seiring waktu. Salah satu jenis *moving average* sederhana adalah *Simple Moving Average* (SMA) [16]. Persamaan untuk menghitung SMA dapat dituliskan seperti Persamaan (2.33).

$$SMA = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.33)$$

dengan  $x_1, x_2, \dots, x_n$  merupakan nilai data setiap periode dan  $n$  adalah jumlah periode waktu yang digunakan untuk menghitung SMA. Pada penelitian ini, SMA digunakan untuk mengolah marka MFP menjadi titik koordinat *drone*. Pada penelitian ini, nilai  $n$  yang digunakan adalah empat.

## 2.5 Jaringan Nirkabel

Jaringan nirkabel didefinisikan sebagai jaringan transmisi yang tidak menggunakan kabel sebagai media dalam menghubungkan sumber data dan penerima data [17]. Jaringan nirkabel memungkinkan banyak pengguna terhubung secara bersamaan ke dalam jaringan. Jaringan nirkabel memiliki *Access Point* yang bekerja dengan

menggunakan *transceiver radio* untuk menciptakan koneksi [18]. Sinyal radio yang ditransmisikan akan diidentifikasi oleh perangkat klien. Setelah saluran komunikasi dikonfirmasi, akses ke jaringan menjadi tersedia. *Access Point* nirkabel mengikuti standar protokol IEEE 802.11, umumnya standar ini diterapkan dalam WiFi atau *Wireless Fidelity*.

### 2.5.1 TCP/IP

TCP/IP merupakan singkatan dari *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* [19]. TCP/IP adalah kumpulan protokol komunikasi yang dapat digunakan untuk menghubungkan perangkat-perangkat dalam jaringan komputer. Dengan demikian, satu komputer dengan TCP/IP dapat berkomunikasi dengan komputer lain pada satu lingkup jaringan nirkabel. TCP/IP digunakan untuk mengirimkan data berupa angka. TCP/IP terdiri dari dua protokol utama, yaitu TCP dan IP.

Protokol TCP (*Transmission Control Protocol*) bertanggung jawab untuk memastikan pengiriman data yang andal antar perangkat dalam jaringan [20]. TCP akan membagi data menjadi paket-paket kecil, memastikan setiap paket yang datang dengan benar, dan menyusun kembali paket-paket tersebut. Selain itu, TCP berfungsi untuk memastikan bahwa data yang dikirim menjadi paket-paket kecil tersebut tidak hilang, rusak, atau urutan paket tertukar.

Protokol IP (*Internet Protocol*) merupakan protokol yang berfungsi untuk menangani pengiriman paket data antar perangkat dalam jaringan [20]. IP akan mengatur alamat unik (*IP address*) dari setiap perangkat yang terhubung ke jaringan dan memastikan bahwa paket data dikirimkan ke tujuan yang tepat berdasarkan alamat unit tersebut.

### 2.5.2 UDP

UDP atau *User Datagram Protocol* adalah protokol transmisi data dalam jaringan yang berbeda dengan TCP/IP [21]. UDP bersifat sederhana karena data yang dikirim berupa datagram dan tidak memiliki informasi verifikasi, sehingga memiliki kemungkinan data akan rusak saat pengiriman. Akan tetapi, pengiriman data yang dilakukan pada protokol UDP lebih cepat dibandingkan protokol TCP/IP.

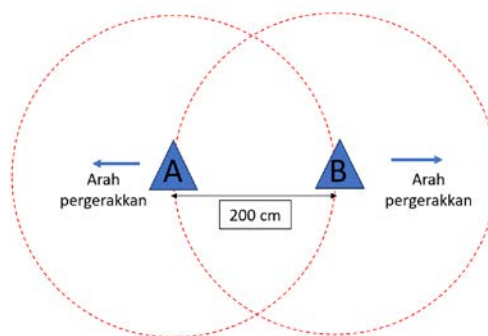


Data yang dikirimkan menggunakan protokol UDP kepada komputer dapat berupa citra.

## 2.6 Algoritma Pemisahan

Algoritma pemisahan merupakan salah satu aturan dasar yang digunakan dalam simulasi perilaku kelompok hewan, seperti kawanan burung yang disebut “*boids*” [22]. Algoritma pemisahan digunakan untuk menghindari tabrakan antar individu dalam satu kelompok. Dengan demikian, algoritma pemisahan dapat memastikan bahwa setiap individu menjaga jarak aman dengan individu lain saat menjalankan tugas dalam satu kelompok. Hal tersebut yang memungkinkan algoritma pemisahan dapat menghindari kepadatan yang berlebih dan tabrakan yang tidak diinginkan.

Perancangan algoritma pemisahan dilakukan dengan beberapa langkah, langkah pertama adalah melakukan identifikasi tetangga terdekat [23]. Pada langkah tersebut, individu akan mencari individu lain yang berada dalam radius. Langkah kedua yang dilakukan adalah menghitung target posisi baru dan arah pergerakan. Pada langkah ini, individu akan menghitung posisi target baru untuk menghindari individu lain. Apabila pada posisi target baru tidak ada individu lain, maka individu akan bergerak ke arah tersebut. Dengan demikian, setiap individu akan memeriksa individu lain dalam radius tertentu yang disebut sebagai zona pemisahan. Gambar 2.5 merupakan ilustrasi terkait algoritma pemisahan



**Gambar 2.5.** Ilustrasi algoritma pemisahan dua individu.

## 2.7 Jenis-Jenis Jalur Pemetaan pada *Drone*

Dalam menjalankan tugas pemetaan, *drone* jamak dapat bergerak dengan mengikuti beberapa jalur pemetaan [3]. Berikut ini merupakan beberapa jenis jalur pemetaan yang dapat diterapkan pada *drone* jamak.

a. Jalur Berliku-liku

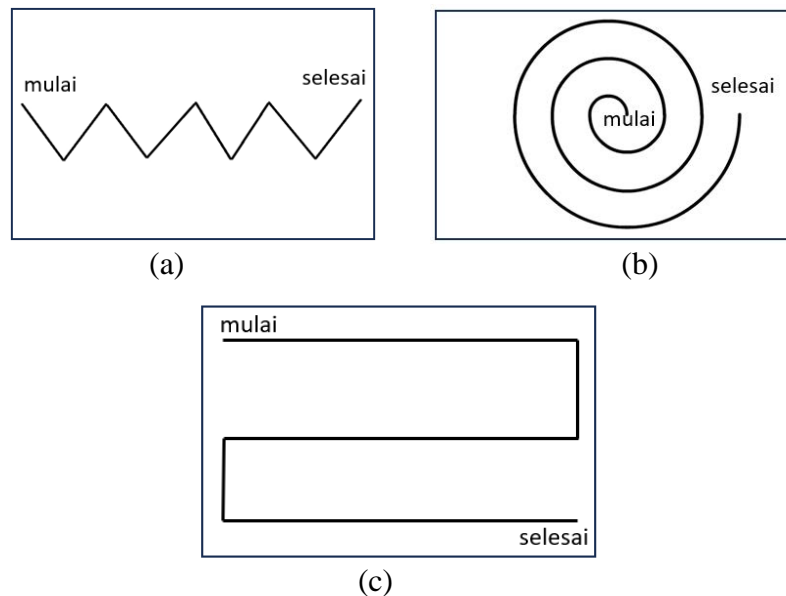
Jalur Berliku-liku merupakan jalur yang berbentuk pola berliku-liku dan merupakan salah satu pola yang efektif untuk tugas-tugas sederhana yang membutuhkan penutupan area secara menyeluruh. Akan tetapi, jalur tersebut tidak cocok untuk area yang kompleks. Gambar 2.4 (a) merupakan ilustrasi dari jalur berliku-liku pada tugas pemetaan.

b. Jalur Pilin

Jalur pilin merupakan jalur pemetaan yang menyebabkan *drone* terbang dengan pola pilin dari pusat menuju keluar area atau sebaliknya. Gambar 2.4 (b) merupakan ilustrasi dari jalur pilin pada tugas pemetaan.

c. Jalur Pola S

Jalur pola S merupakan jalur pemetaan yang menyerupai huruf “S”, sehingga *drone* bergerak secara bergantian dari satu sisi ke sisi lainnya. Jalur pola S digunakan untuk pemetaan hutan atau survei agrikultur. Selain itu, jalur pola S dapat memberikan hasil pemetaan yang efisien tanpa memerlukan banyak data. Gambar 2.4 (c) merupakan ilustrasi dari jalur spiral pada tugas pemetaan.



**Gambar 2.6.** Ilustrasi jalur pada tugas pemetaan dengan pola (a) berliku-liku, (b) pilin, dan (c) S.

Pada penelitian ini, jenis jalur yang akan digunakan sebagai penelusuran rute untuk *drone* jamak adalah jalur pola S. Jalur tersebut dipilih karena keterbatasan area tugas pemetaan serta untuk melihat kinerja pergerakan *drone* yang telah diidentifikasi, yaitu pergerakan searah sumbu x dan sumbu y.