

**PENERAPAN KONTROL PROPORSIONAL DERIVATIF DAN TARGET TRACKING PADA KESTABILAN  
DRONE TIPE 2.0**

**Faiz Ainur Razi**

Jurusan Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail : [faizrazi@mhs.unesa.ac.id](mailto:faizrazi@mhs.unesa.ac.id)

**Yusuf Fuad**

Jurusan Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail : [yusuffuad@unesa.ac.id](mailto:yusuffuad@unesa.ac.id)

**Abstrak**

*Drone* merupakan pesawat tanpa awak yang saat ini sedang berkembang secara pesat. *Drone* memiliki peran penting bagi kemajuan teknologi, seperti untuk kebutuhan militer, keperluan intelijen hingga sebagai alat pengintai dalam perang. Salah satu *drone* yang memiliki teknologi canggih adalah *Drone* Tipe 2.0 berbasis *target tracking*. *Drone* Tipe 2.0 adalah salah satu *drone* bertipe *cross* (x) dengan konfigurasi dua *rotor* depan dan dua *rotor* belakang. Ada empat gerak pada *Drone* Tipe 2.0, yaitu vertikal (naik-turun), longitudinal (depan-belakang), *lateral* (kanan-kiri) dan *yawing* (rotasi kanan-kiri). Penelitian ini dilakukan untuk rekonstruksi model dan model linier ditentukan pada posisi *hover*. Analisis kestabilan model ditentukan dengan kriteria Routh Hurwitz. Kontrol proporsional derivatif digunakan untuk mengontrol setiap gerak *Drone* Tipe 2.0. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, penerapan  $K_P$  dan  $K_D$  pada gerak vertikal diperoleh  $K_P = 60000$  dan  $K_D = 4000$ . Pada gerak longitudinal stabil saat  $K_P = 13000$  dan  $K_D = 3000$ . Sedangkan gerak *lateral* dan *yawing* berdasarkan eksperimen berturut-turut sebagai berikut  $K_P = 11000$   $K_D = 1100$  dan  $K_P = 80000$   $K_D = 7000$ . Algoritma *Tangent Bug* digunakan untuk menerapkan *target tracking* dalam melewati beberapa *obstacles* dan cocok digunakan karena *Drone* Tipe 2.0 dilengkapi dua kamera dan sensor untuk mendeteksi lokasi *obstacles* dan target.

**Kata kunci:** *Drone* Tipe 2.0, kriteria Routh Hurwitz, kontrol proporsional derivatif, *tangent bug*, *target tracking*

**Abstract**

*Drone* is an unmanned aircraft that is currently growing rapidly. It has an important role for technological advancement, such as for military needs, intelligence needs to as a surveillance tool in the war. One of the existing drones that has an advanced technology is *Drone* Type 2.0 based of *target tracking*. *Drone* Type 2.0 is one of the drones of *cross* (x) type with the configuration of two front rotors and two rear rotors. There are four motions in *Drone* Type 2.0, vertical, longitudinal, lateral and yawing. This research is done for model reconstruction and linear model is determined when hover position. The stability analysis of the model is determined by the Routh-Hurwitz criterion. Proportional derivative controls are used to control any *Drone* Type 2.0 motion. Based on experiment is done, implementation of  $K_P$  and  $K_D$  for vertical motion is stable when  $K_P = 60000$  and  $K_D = 4000$ . For longitudinal motion when  $K_P = 13000$  and  $K_D = 3000$ . Then lateral and yawing motion based on experiment continually are  $K_P = 11000$   $K_D = 1100$  and  $K_P = 80000$   $K_D = 7000$ . *Tangent bug* algorithm is used to apply *target tracking* in passing some obstacles and suitable to be used because *Drone* Type 2.0 is completed by two cameras and sensors to detect locations of obstacles and target.

**Keywords:** *Drone* Type 2.0, Routh Hurwitz criterion, proportional derivative controller, *tangent bug*, *target tracking*

**PENDAHULUAN**

*Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau pesawat tidak berawak adalah salah satu bentuk karya dari perkembangan ilmu pengetahuan saat ini. UAV memiliki peran yang sangat besar bagi kemajuan teknologi, seperti untuk kebutuhan militer, keperluan intelijen hingga sebagai alat pengintai dalam perang. Keuntungan dari menggunakan pesawat tanpa awak ini adalah mengurangi resiko korban yang diturunkan di medan tujuan. UAV

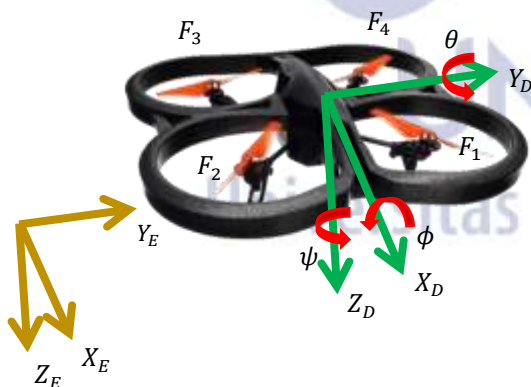
dapat dikontrol dari jarak jauh dengan memanfaatkan GPS (*Global Positioning System*). Selain itu, UAV tidak terlalu memerlukan biaya besar. Hal ini disebabkan bodi pesawat yang digunakan tidak terlalu besar atau sesuai ukuran yang diinginkan. Ada berbagai macam jenis UAV, salah satunya adalah *quadrotor* atau lebih populer dengan sebutan *drone*. *Drone* merupakan pesawat tanpa awak yang dilengkapi empat *rotor* dengan arah gerak *rotor* saling berlawanan.

Dalam perkembangan ilmu pengetahuan, *drone* dengan empat *rotor* paling banyak digunakan, karena bentuknya tidak terlalu besar dan dapat *take off* dan *landing* pada medan yang tidak terlalu luas. Maka dari itu, fungsi *drone* pada saat ini banyak digunakan sebagai pesawat pengintai. Salah satu jenis *drone* yang memiliki kualitas unggul dalam *target tracking* adalah *Parrot AR. Drone 2.0* yang selanjutnya akan disebut sebagai *Drone Tipe 2.0*. Tipe *quadrotor* jenis ini dapat bekerja melacak target dengan tanpa campur tangan manusia dan juga tanpa bantuan sebuah GPS. Dalam melacak target, *Drone Tipe 2.0* menggunakan sensor kamera yang memiliki fitur sensor warna RGB (*Red, Green, Blue*) dan *infrared*, sehingga dapat dihasilkan *selection tracking*. Pemilihan algoritma *Tangent Bug* sangat diperlukan karena *drone* yang digunakan telah terdapat sensor guna mendeteksi *obstacles* (rintangan) saat melakukan *tracking*. *Drone Tipe 2.0* termasuk jenis *quadrotor* dengan tipe *x* (*cross*) karena memiliki konfigurasi dua baling-baling depan dan dua baling-baling belakang.

Kestabilan gerak *Drone Tipe 2.0* pada penelitian ini akan digunakan kontrol proporsional derivatif (PD). Kontrol PD digunakan terutama pada sudut belok dari *drone*. Kontrol proporsional berfungsi untuk mempercepat kestabilan, namun pada kontrol ini masih terlalu besar *overshoot* dan terlalu banyak osilasinya. Kemudian akan ditambahkan kontrol derivatif yang berfungsi untuk meredam dari lonjakan kontrol proporsional. Sehingga kontrol PD akan lebih cepat mencapai kestabilan dan memperkecil *overshoot* yang terjadi.

**SISTEM KOORDINAT DRONE TIPE 2.0**

Gerak *Drone Tipe 2.0* berorientasi pada sumbu koordinat *X, Y* dan *Z* dengan gerakan dasar aerodinamiknya adalah *roll* ( $\phi$ ), *pitch* ( $\theta$ ) dan *yaw* ( $\psi$ ). Berikut adalah skematik dari *Drone Tipe 2.0*:



Gambar 1. Skematik Drone Tipe 2.0 (Kodam, 2013)

*Drone Tipe 2.0* memiliki empat buah rotor dengan arah putar rotor yang saling berlawanan, yaitu  $F_1 = F_3$  dan  $F_2 = F_4$ . Ada dua sistem koordinat yang digunakan dalam menyelesaikan model, yaitu *E-Frame* dan *D-Frame*. *E-Frame* merupakan sistem koordinat yang mengacu pada *earth* (bumi). Pada koordinat ini ada dua letak posisi yang penting, yaitu vektor posisi linier  $\Gamma_E =$

$[x \ y \ z]^T$  dan vektor posisi angular  $\Theta_E = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ . Sedangkan *D-Frame* adalah sistem koordinat yang mengacu pada sistem koordinat *Drone Tipe 2.0*. Dalam bagian ini kecepatan yang diperlukan adalah vektor kecepatan linier  $V_D = [u \ v \ w]^T$  dan vektor kecepatan sudut  $\tau_D = [p \ q \ r]^T$ .

**MATRIKS ROTASI**

Orientasi *drone* dideskripsikan menggunakan sudut Euler *yaw*  $R(\psi, Z)$ , *pitch*  $R(\theta, Y)$  dan *roll*  $R(\phi, X)$  sebagai berikut (Popova, 2015):

$$R(\psi, Z) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(\theta, Y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R(\phi, X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

Didapat matriks rotasi:

$$D = (R(\psi, Z).R(\theta, Y).R(\phi, X))^T$$

**SISTEM TRANSFORMASI PADA DRONE TIPE 2.0**

Transformasi koordinat *E-Frame* ke *D-Frame*. Dengan waktu *t*, transformasi linier dideskripsikan:

$$\frac{d\Gamma_E(t)}{dt} = D^{-1}V_D(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

Selanjutnya dicari matriks transformasi kecepatan sudut dari *D-Frame* terhadap *E-Frame* adalah (Popova, 2015):

$$\dot{\Theta}_E = W^{-1}\tau_B$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) \sec(\theta) & \cos(\phi) \sec(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Untuk mendapatkan percepatan linier dapat dicari melalui:

$$F_{new} = m \frac{d}{dt} [v_D] + \omega_D \times m [v_D]$$

dan diperoleh

$$\dot{u} = g \sin(\theta) - qw + rv$$

$$\dot{v} = -g \cos(\theta) \sin(\phi) - ru + pw$$

$$\dot{w} = \frac{1}{m} T_{tot} - g \cos(\theta) \cos(\phi) - pv + uq$$

Dengan  $T_{tot} = \Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2$

Momen eksternal  $M$  didefinisikan sama dengan perubahan waktu terhadap momentum sudut  $H$  dari *Drone Tipe 2.0*:

$$M = I\dot{\tau}_D + \tau_D \times I\tau_D$$

didapat

$$\dot{p} = \frac{lb}{I_{xx}} (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) - qr \frac{I_{zz} - I_{yy}}{I_{xx}}$$

$$\dot{q} = \frac{lb}{I_{yy}} (-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) - pr \frac{I_{xx} - I_{zz}}{I_{yy}}$$

$$\dot{r} = \frac{\mu}{I_{zz}} (\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2)$$

**KONTROL PROPORSIONAL DERIVATIF**

Output suatu sistem kontrol memiliki pengaruh terhadap aksi pengendalian yang dilakukan. Error yang dihasilkan dari proses variabel diumpankan pada komponen pengendalian (kontrol) untuk memperkecil kesalahan sehingga nilai output sistem mendekati nilai yang diinginkan (Ogata, 2010).

Sistem dengan kontrol proporsional memiliki output  $y(t)$  yang sebanding (proporsional) dengan besarnya error  $e(t)$ . Bentuk umum dari kontrol proporsional adalah sebagai berikut (Olsder and Van Der Woude, 1994).

$$y(t) = K_p e(t)$$

dimana  $K_p$  adalah gain proporsional.

Kontrol derivatif dipakai untuk mempercepat respon awal dari sistem. Secara umum bentuk dari kontrol derivatif adalah sebagai berikut

$$y(t) = K_D s \frac{de(t)}{dt}$$

dimana  $K_D$  adalah gain derivatif dan  $\frac{de(t)}{dt}$  adalah derivatif error.

Berdasarkan bentuk umum dari kontrol proporsional dan kontrol derivatif, diperoleh bentuk umum dari kontrol proporsional derivatif sebagai berikut

$$y(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Dalam transformasi Laplace dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = K_p + K_D s$$

**LINIERISASI**

Linierisasi berfungsi untuk mengaproksimasi sistem non linier menjadi linier. Karena *Drone* Tipe 2.0 dalam posisi *hover* maka kecepatan *rotor* berkecepatan sama besar dan konstan, yaitu  $\tilde{\Omega}_1 = \tilde{\Omega}_2 = \tilde{\Omega}_3 = \tilde{\Omega}_4 = \tilde{\Omega}_0$ . Hal ini menyebabkan  $\phi = 0, \theta = 0, \psi = 0$  dan percepatan *rotor* adalah nol dengan titik kesetimbangan  $\tilde{\phi} = 0, \tilde{\theta} = 0, \tilde{\psi} = 0, \tilde{u} = 0, \tilde{v} = 0, \tilde{w} = 0, \tilde{p} = 0, \tilde{q} = 0, \tilde{r} = 0$ .

Diperoleh model linier gerak *Drone* Tipe 2.0 sebagai berikut:

$$\Delta \dot{x} = \Delta u; \quad \Delta \dot{y} = \Delta v; \quad \Delta \dot{z} = \Delta w;$$

$$\Delta \dot{\phi} = \Delta p; \quad \Delta \dot{\theta} = \Delta q; \quad \Delta \dot{\psi} = \Delta r;$$

$$\Delta \dot{u} = g \Delta \theta;$$

$$\Delta \dot{v} = -g \Delta \phi;$$

$$\Delta \dot{w} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 b}{m} (\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \Delta \Omega_4);$$

$$\Delta \dot{p} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 l b}{I_{xx}} (-\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 - \Delta \Omega_4);$$

$$\Delta \dot{q} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 l b}{I_{yy}} (-\Delta \Omega_1 - \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \Delta \Omega_4);$$

$$\Delta \dot{r} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 \mu}{I_{zz}} (\Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_4 - \Delta \Omega_1 - \Delta \Omega_3)$$

dengan sistem kontrol percepatan *rotor* (Jiřinec, 2011)

$$\dot{\Omega}_n = \gamma \Omega_n + \delta \Lambda$$

Dimana  $\gamma$  dan  $\delta$  berupa parameter pengontrol kestabilan setiap *rotor*.

**MODEL DINAMIK GERAK DRONE TIPE 2.0**

a. Gerak Vertikal

Model gerak vertikal *Drone* Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{z} = \Delta w;$$

$$\Delta \dot{w} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 b}{m} (\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \Delta \Omega_4);$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -13\Omega_n + 5\Lambda, \quad n = 1,2,3,4.$$

dengan output  $y = \Delta w$ .

b. Gerak Longitudinal

Model gerak longitudinal *Drone* Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{x} = \Delta u; \quad \Delta \dot{\theta} = \Delta q; \quad \Delta \dot{u} = g \Delta \theta;$$

$$\Delta \dot{q} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 l b}{I_{yy}} (-\Delta \Omega_1 - \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \Delta \Omega_4);$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -10\Omega_n + 35,267\Lambda, \quad n = 1,2,3,4$$

dengan output  $y = \Delta q$ .

c. Gerak Lateral

Model gerak *lateral Drone* Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{y} = \Delta v; \quad \Delta \dot{\phi} = \Delta p; \quad \Delta \dot{v} = -g \Delta \phi;$$

$$\Delta \dot{p} = 2\tilde{\Omega}_0 \frac{l b}{I_{xx}} (-\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 - \Delta \Omega_4);$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -10\Omega_n + 35,267\Lambda, \quad n = 1,2,3,4.$$

dengan output  $y = \Delta p$ .

d. Gerak Yawing

Model gerak *yawing Drone* Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{\psi} = \Delta r;$$

$$\Delta \dot{r} = 2\tilde{\Omega}_0 \frac{\mu}{I_{zz}} (\Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_4 - \Delta \Omega_1 - \Delta \Omega_3);$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -13\Omega_n + 2,486\Lambda, \quad n = 1,2,3,4.$$

dengan output  $y = \Delta r$ .

**ANALISIS KESTABILAN**

Dengan cara mensubstitusikan parameter pada tabel 1, dapat ditentukan kestabilan dari medel setiap gerak dengan melihat letak *poles* pada grafik *root locus*.

Tabel 1. Parameter *Drone* Tipe 2.0

Simbol	Keterangan	Nilai
$m$	Massa dari <i>drone</i>	0,38 kg
$l$	Jarak antara <i>rotor</i> dan pusat bodi	0,17 m
$\tilde{\Omega}_0$	Kecepatan sudut maksimal pada <i>rotor</i>	28.500 rpm
$g$	Percepatan gravitasi	$9,81 \text{ m s}^{-2}$
$b$	Koefisien gaya angkat	$3,13 \times 10^{-5} \text{ kg m}$
$I_{xx}$	Momen inersia sumbu X	$0,0086 \text{ kg m}^2$
$I_{yy}$	Momen inersia sumbu Y	$0,0086 \text{ kg m}^2$
$I_{zz}$	Momen inersia sumbu Z	$0,0172 \text{ kg m}^2$
$\mu$	Koefisien gaya hambat	$7,5 \times 10^{-7} \text{ kg m}$

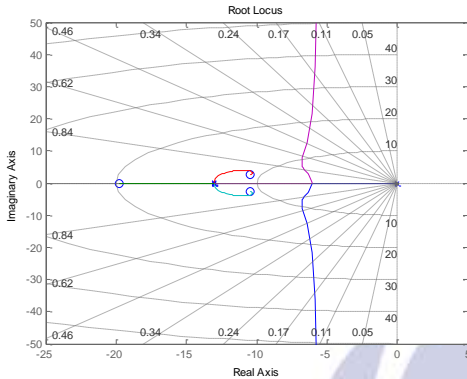
(Sumber: Koszewnik, 2014)



**Gerak Vertikal**

Dengan mensubstitusikan parameter pada tabel 1 ke model gerak vertikal, didapat fungsi transfer dan grafik *root locus* sebagai berikut:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-5s^4 + 90s^4 + 3660s^3 + 47610s^2 + 206300s}{s^6 + 52s^5 + 1014s^4 + 8788s^3 + 28561s^2}$$

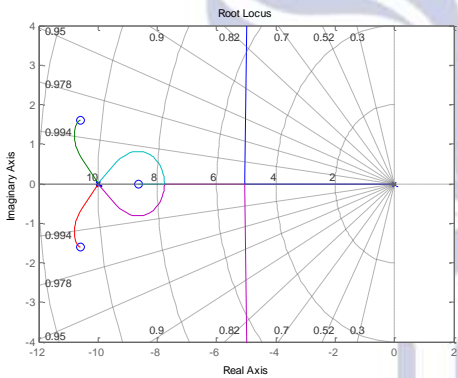


Gambar 2 Grafik *root locus* gerak vertikal

**Gerak Longitudinal**

Didapat fungsi transfer dan *root locus* gerak longitudinal sebagai berikut:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{5000s^6 + 149300s^5 + 1492500s^4 + 4975100s^3}{s^8 + 40s^7 + 600s^6 + 4000s^5 + 10000s^4}$$

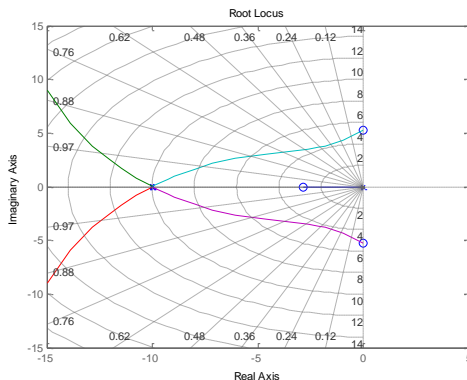


Gambar 3. Grafik *root locus* gerak longitudinal

**Gerak Lateral**

Didapat fungsi transfer dan *root locus* gerak lateral sebagai berikut:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{48795s^6 + 138425s^5 + 1352411s^4 + 3827152s^3}{s^8 + 40s^7 + 600s^6 + 4000s^5 + 10000s^4}$$

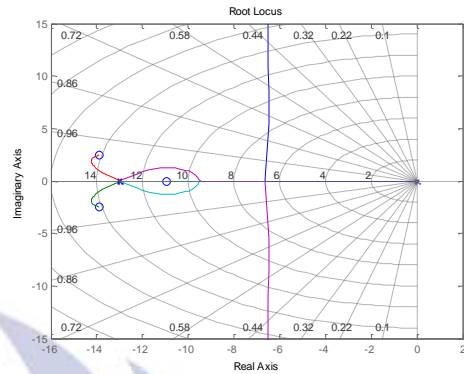


Gambar 4. Grafik *root locus* gerak lateral

**Gerak Yawing**

Didapat fungsi transfer dan *root locus* gerak yawing sebagai berikut:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{30s^4 + 1163s^3 + 15122s^2 + 65528s}{s^6 + 52s^5 + 1014s^4 + 8788s^3 + 28561s^2}$$



Gambar 5. Grafik *root locus* gerak yawing

Dari gambar 2 - 5 pada grafik *root locus* diketahui bahwa ada nilai *poles* bernilai 0. Sehingga keempat gerak *Drone* Tipe 2.0 tersebut tidak stabil.

**PENERAPAN KONTROL PROPORSIONAL DERIVATIF**

**Gerak vertikal dan gerak yawing**

Dengan menggunakan kriteria Routh-Hurwitz, didapat nilai dari  $K_P$  dan  $K_D$ . Agar sistem stabil, nilai *poles* pada sistem harus memenuhi persamaan karakteristik berikut:

$$s^6 + 52s^5 + 1014s^4 + 8788s^3 + (28561 + K_D)s^2 + K_Ps = 0$$

Didapat,

$s^6$	1	1014	$28561 + K_D$	0
$s^5$	52	8788	$K_P$	0
$s^4$	845	$a$	0	
$s^3$	$b$	$K_P$		
$s^2$	$c$	0		
$s^1$	$K_P$			
$s^0$	$K_D$			

dengan

$$a = 28561 + K_D - 0,019K_P$$

$$b = 10545,6 + 0,062K_D - 0,0012K_P$$

$$c = 28561 + K_D - 0,019K_P - \frac{845K_P}{c_1}$$

$$c_1 = 28561 + K_D - 0,019K_P$$

Agar stabil, sistem yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut

$$10545,6 + 0,062K_D - 0,0012K_P > 0$$

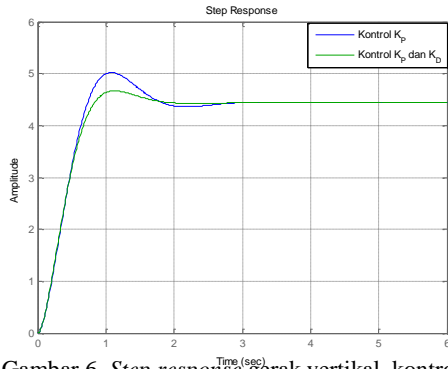
dan

$$28561 + K_D - 0,019K_P - \frac{845K_P}{c_1} > 0$$

serta

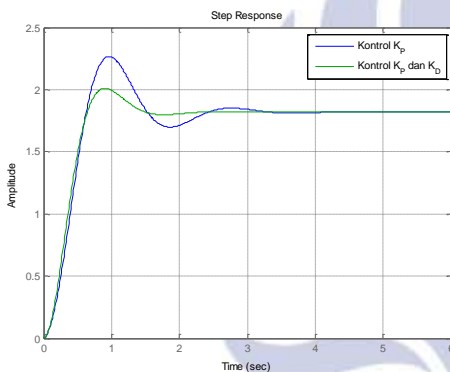
$$K_P > 0 \text{ dan } K_D > 0$$

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, penerapan  $K_P$  dan  $K_D$  pada gerak vertikal dan yawing berturut-turut sebagai berikut  $K_P = 60000$   $K_D = 4000$  dan  $K_P = 80000$   $K_D = 7000$ . Berikut *step response* gerak vertikal dan yawing dengan menggunakan Matlab R2009b:



Gambar 6. Step response gerak vertikal kontrol  $K_P$  dan  $K_D$

Pada gambar 6, sistem dengan nilai  $K_P$  60000 memiliki overshoot yang cukup tinggi dan sistem stabil setelah waktu 4 detik. Kemudian ditambah  $K_D$  4000, overshoot semakin berkurang dan waktu untuk sistem stabil sekitar 3 detik.



Gambar 7. Step response gerak yawing kontrol  $K_P$  dan  $K_D$

Pada gambar 7, sistem dengan nilai  $K_P$  80000 memiliki overshoot yang cukup tinggi dan sistem stabil setelah waktu 5 detik. Kemudian ditambah  $K_D$  7000, overshoot semakin berkurang dan waktu untuk sistem stabil sekitar 3,2 detik.

**Gerak longitudinal dan gerak lateral**

Dengan menggunakan kriteria Routh-Hurwitz, didapat nilai dari  $K_P$  dan  $K_D$ . Agar sistem stabil, nilai poles pada sistem harus memenuhi persamaan karakteristik berikut:

$$s^8 + 40s^7 + 600s^6 + 4000s^5 + (10000 + K_D)s^4 + K_Ps^3 = 0$$

Didapat

$s^6$	1	600	$10000 + K_D$	0
$s^5$	40	4000	$K_P$	
$s^4$	500	$a$	0	
$s^3$	$b$	$K_P$		
$s^2$	$c$			
$s^1$	$K_P$			
$s^0$	$K_D$			

dengan

$$a = 1000 + K_D - \frac{K_P}{40}$$

$$b = 3200 - \frac{4K_D}{5} + \frac{K_P}{500}$$

$$c = \frac{c_1}{b}$$

$$c_1 = -\frac{1}{20000}K_P^2 - \frac{4K_D^2}{50} + \frac{K_PK_D}{250} - 60K_P + 2400K_D + 32000000$$

Agar sistem stabil, kriteria yang memenuhi adalah sebagai berikut

$$3200 - \frac{4K_D}{5} + \frac{K_P}{500} > 0$$

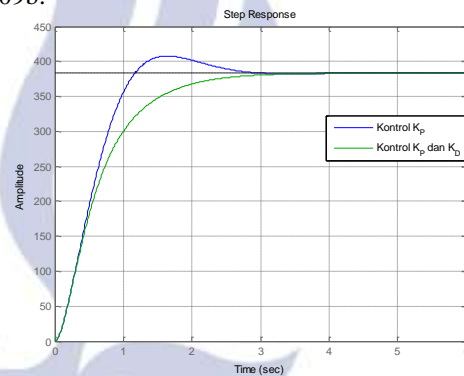
dan

$$-\frac{1}{20000}K_P^2 - \frac{4K_D^2}{50} + \frac{K_PK_D}{250} - 60K_P + 2400K_D + 32000000 > 0$$

serta

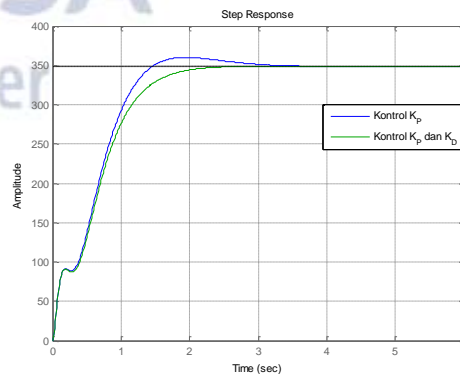
$$K_P > 0 \text{ dan } K_D > 0$$

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, penerapan  $K_P$  dan  $K_D$  pada gerak longitudinal dan lateral berturut-turut sebagai berikut  $K_P = 13000$   $K_D = 3000$  dan  $K_P = 11000$   $K_D = 1100$ . Berikut step response gerak longitudinal dan lateral dengan menggunakan Matlab R2009b:



Gambar 8. Step response gerak longitudinal kontrol  $K_P$  dan  $K_D$

Pada gambar 8, sistem dengan nilai  $K_P$  13000 memiliki overshoot yang cukup tinggi dan sistem stabil setelah waktu 5 detik. Kemudian ditambah  $K_D$  3000, overshoot semakin berkurang dan waktu untuk sistem stabil sekitar 4,8 detik.



Gambar 9. Step response gerak lateral kontrol  $K_P$  dan  $K_D$

Pada gambar 9, dengan mengambil nilai  $K_P$  11000 memiliki overshoot yang cukup tinggi dan sistem stabil setelah waktu 4,3 detik. Kemudian ditambah  $K_D$  1100,

overshoot semakin berkurang dan waktu untuk sistem stabil sekitar 3,5 detik.

**PENERAPAN TARGET TRACKING GERAK DRONE TIPE 2.0**

Pelacakan target pada Drone Tipe 2.0 akan digunakan algoritma *Tangent Bug*. Algoritma ini pada dasarnya menggunakan algoritma *shortest path* untuk mencari lintasan terpendek. Namun yang membedakan antara keduanya adalah algoritma *Tangent Bug* dilengkapi dengan sensor jarak. Pengaturan jarak sensor dapat direpresentasikan dalam fungsi berikut:

$$\rho_R(k, \varphi) = \begin{cases} \beta & , \rho_R(k, \varphi) < R \\ \infty & , \rho_R(k, \varphi) \text{ lainnya} \end{cases}$$

dengan  $\beta = \lambda \in [0, \infty) \min d(k, k + \lambda[\cos\varphi, \sin\varphi]^T)$ ,  $R$  adalah sensor radius,  $\lambda$  berupa parameter untuk mengatur panjang radius,  $\varphi$  berupa bagian terluar sensor dan  $k$  merupakan titik pusat dari sensor.

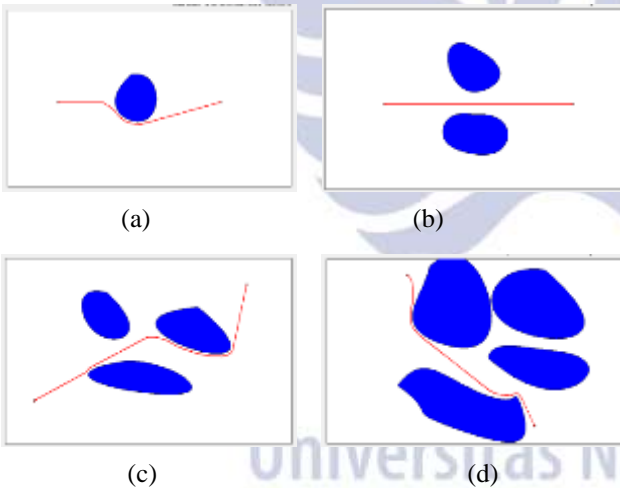
Jika arah antara Drone Tipe 2.0 dan target masih jauh maka Drone Tipe 2.0 akan menuju titik akhir  $H_i$  dari interval yang ditunjukkan dalam fungsi berikut:

$$d(k, H_i) + d(H_i, P_{target})$$

Gerak Drone Tipe 2.0 akan berhenti ketika memenuhi syarat:

$$d_{capai} < d_{ikut}$$

Berikut adalah simulasi *track* untuk mencapai target:



Gambar 10. Simulasi *tracking* saat drone melewati *obstacles*

Pada gambar 10 adalah jalur *track* dengan berbagai macam letak dan banyak *obstacles* (rintangan) yang berbeda-beda. Gambar 10 (d) *track* dengan empat *obstacles* dan titik start dan target diletakkan secara bebas. Sehingga jalur yang terbentuk akan mencari jalur terpendek untuk menuju target. Karena Drone Tipe 2.0 dilengkapi dengan sensor maka algoritma ini bisa diterapkan untuk jenis Drone Tipe 2.0.

**SIMPULAN**

a. Gerak Vertikal

Model gerak vertikal Drone Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta z = \Delta w$$

$$\Delta \dot{w} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 b}{m} (\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \Delta \Omega_4)$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -13\Omega_n + 5\Lambda, \quad n = 1,2,3,4.$$

dengan output  $y = \Delta w$ .

Agar stabil, sistem yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut

$$10545,6 + 0,062K_D - 0,0012K_P > 0$$

dan

$$28561 + K_D - 0,019K_P - \frac{845K_P}{c_1} > 0$$

serta

$$K_P > 0 \text{ dan } K_D > 0$$

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, penerapan  $K_P$  dan  $K_D$  pada gerak vertikal sebagai berikut  $K_P = 60000$  dan  $K_D = 4000$ .

b. Gerak Longitudinal

Model gerak longitudinal Drone Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{x} = \Delta u$$

$$\Delta \dot{\theta} = \Delta q$$

$$\Delta \dot{u} = g\Delta\theta$$

$$\Delta \dot{q} = \frac{2\tilde{\Omega}_0 lb}{I_{yy}} (-\Delta \Omega_1 - \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \Delta \Omega_4)$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -10\Omega_n + 35,267\Lambda, \quad n = 1,2,3,4$$

dengan output  $y = \Delta q$ .

Agar sistem stabil, kriteria yang memenuhi adalah sebagai berikut

$$3200 - \frac{4K_D}{5} + \frac{K_P}{500} > 0$$

dan

$$-\frac{1}{20000}K_P^2 - \frac{4K_D^2}{50} + \frac{K_P K_D}{250} - 60K_P + 2400K_D + 32000000 > 0$$

serta

$$K_P > 0 \text{ dan } K_D > 0$$

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, penerapan  $K_P$  dan  $K_D$  pada gerak longitudinal sebagai berikut  $K_P = 13000$  dan  $K_D = 3000$ .

c. Gerak Lateral

Model gerak lateral Drone Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{y} = \Delta v$$

$$\Delta \dot{\phi} = \Delta p$$

$$\Delta \dot{v} = -g\Delta\phi$$

$$\Delta \dot{p} = 2\tilde{\Omega}_0 \frac{lb}{I_{xx}} (-\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 - \Delta \Omega_4)$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -10\Omega_n + 35,267\Lambda, \quad n = 1,2,3,4.$$

dengan output  $y = \Delta p$ .

Agar sistem stabil, kriteria yang memenuhi adalah sebagai berikut

$$3200 - \frac{4K_D}{5} + \frac{K_P}{500} > 0$$

dan

$$-\frac{1}{20000}K_p^2 - \frac{4K_D^2}{50} + \frac{K_p K_D}{250} - 60K_p + 2400K_D + 32000000 > 0$$

serta

$$K_p > 0 \text{ dan } K_D > 0$$

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, penerapan  $K_p$  dan  $K_D$  pada gerak lateral sebagai berikut  $K_p = 11000$  dan  $K_D = 1100$ .

d. Gerak *Yawing*

Model gerak *yawing Drone* Tipe 2.0 berbasis *target tracking* adalah sebagai berikut:

$$\Delta \dot{\psi} = \Delta r$$

$$\Delta \dot{r} = 2\tilde{\Omega}_0 \frac{\mu}{I_{zz}} (\Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_4 - \Delta \Omega_1 - \Delta \Omega_3)$$

$$\Delta \dot{\Omega}_n = -13\Omega_n + 2,486\Lambda, \quad n = 1,2,3,4.$$

dengan output  $\mathbf{y} = \Delta r$ .

Agar stabil, sistem yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut

$$10545,6 + 0,062K_D - 0,0012K_p > 0$$

dan

$$28561 + K_D - 0,019K_p - \frac{845K_p}{c_1} > 0$$

serta

$$K_p > 0 \text{ dan } K_D > 0$$

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, penerapan  $K_p$  dan  $K_D$  pada gerak *yawing* sebagai berikut  $K_p = 80000$  dan  $K_D = 7000$ .

## SARAN

*Drone* merupakan salah satu pesawat tanpa awak yang saat ini berkembang sangat pesat, termasuk dalam lingkup akademik. Untuk mengembangkan penelitian kedepannya, penulis memberikan saran untuk menerapkan kontrol seperti PID, LQR ataupun *pole placement*. Adapun untuk mengakuratkan dalam *target tracking*, bisa juga diterapkan untuk pengembangan algoritma lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Jiřinec, T. (2011). *Stabilization and Control of Unmanned Quadcopter*. Thesis. Czech Technical University.
- Kodam, H. (2013). *Quad Rotor Based Surveying and Tracking Tool to Be Applied in the Agricultural Industry*. The University Of Sheffield.
- Koszewnik, A. (2014). The Parrot UAV Controlled by PID Controllers. *Acta Mechanica et Automatica*, 8(2), 5. <https://doi.org/10.2478/ama-2014-0011>
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (Fifth Edit). PHI LEARNING PVY. LTD-NEW DELHI.
- Olsder, G. J., & VanDerWoude, J. W. (1994). *Mathematical Systems Theory* (First Edit). Delf: Delft University Press.
- Popova, M. G. (2015). *Visual Servoing for a Quadrotor UAV in Target Tracking Applications*. Thesis. University of Toronto.