Perancangan Sistem Gerak Kamera Laba-laba dengan Metode Kinematika Balik

Muhammad Aziz Muslim[1], Frido Wahyu Alifantio[2]

***Abstract*—Spider camera (spidercam) is a camera equipped with a movement system that resembles the movement of a spider. The camera can move in a three-dimensional field by pulling and stretching the rope or cables arranged in a certain configuration. This study proposed the use of an inverse kinematic to control the movement of the camera. This method is seeking the relationship between the desired coordinates with the angle that must be moved from each motor that composes it. To move the motor, an analytically tuned PID controller is employed. Experimental results show that using the proposed system, the camera is successfully placed in accordance with the desired position with 100% accuracy. From motor response side, however, the system's performance still needs to be improved so that a smoother movement can be obtained.**

***Intisari*—Kamera laba-laba (*spidercam*) adalah kamera yang dilengkapi dengan sistem pergerakan yang menyerupai pergerakan seekor laba-laba. Kamera tersebut dapat bergerak dalam bidang tiga dimensi dengan cara mengatur tarikan dan uluran tali atau kabel yang diatur dalam konfigurasi tertentu. Untuk mengatur pergerakan kamera tersebut, pada makalah ini diusulkan penggunaan metode kinematika balik untuk menemukan hubungan antara koordinat yang diinginkan dengan sudut yang harus digerakkan dari tiap-tiap motor yang menyusunnya. Untuk menggerakkan motor, digunakan pengendali PID yang ditala secara analitis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menggunakan sistem yang diusulkan, kamera berhasil ditempatkan sesuai dengan posisi yang diinginkan dengan akurasi 100%. Namun, bila dilihat dari respons motor, kinerja sistem masih perlu ditingkatkan lagi sehingga diperoleh pergerakan yang lebih mulus.**

***Kata Kunci*—Kamera laba-laba, pergerakan tiga dimensi, kinematika balik, pengendali PID.**

I. PENDAHULUAN

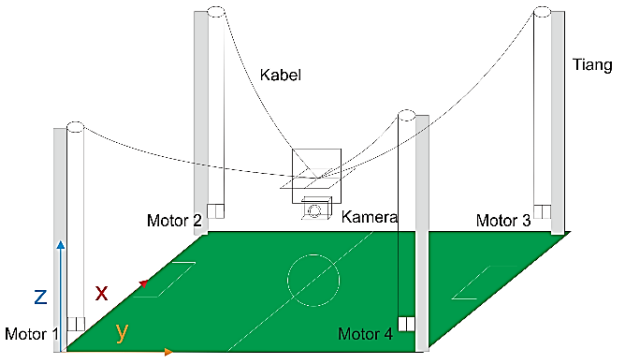
Kamera laba-laba (*spidercam*) adalah kamera yang dilengkapi dengan sistem pergerakan yang menyerupai pergerakan seekor laba-laba. Kamera tersebut dapat bergerak dalam bidang tiga dimensi dengan cara mengatur tarikan dan uluran tali atau kabel yang diatur dalam konfigurasi tertentu. Karena kelebihan tersebut, kamera laba-laba sering digunakan untuk mengabadikan sebuah pertandingan sepakbola.

Kamera laba-laba termasuk salah satu jenis robot paralel berbasis kabel. Robot paralel berbasis kabel didefinisikan sebagai robot yang menggunakan kabel untuk mengoperasikan efektor akhir (*end-effector*). Robot paralel berbasis kabel terdiri atas derek (tersusun dari motor, *encoder*, dan gulungan), kabel, katrol, perangkat penahan kabel, pengendali, dan penggeraknya [1]. Penggunaan analisis *kinetostatic* untuk menggerakkan kamera diusulkan dalam [2]. Sementara, telah disoroti juga masalah inersia dalam kamera laba-laba dengan kabel yang panjang dan kamera yang berat [3].

Pergerakan kamera adalah resultan dari pergerakan tarik dan ulur kabel. Pergerakan tarik dan ulur kabel diatur dengan menggerakkan motor yang akan menggulung atau mengulur kawat. Pergerakan motor-motor ini harus diatur melalui sebuah pengendali sentral pergerakan motor. Pada makalah ini diusulkan suatu sistem kendali penggerak kamera laba-laba yang didasarkan pada metode kinematika balik dari sistem koordinat kamera. Metode ini dipilih mengingat kamera yang digunakan adalah kamera yang sangat ringan dan kabel yang digunakan memiliki berat yang sangat ringan, sehingga pengaruh kinematika lebih dominan dibanding dinamika dari sistem. Pengujian secara eksperimental pada miniatur sistem kamera laba-laba dilakukan untuk menguji akurasi dari metode yang diusulkan.

II. METODOLOGI

Sistem pergerakan kamera laba-laba pada makalah ini dikembangkan dengan menggunakan suatu miniatur sistem pergerakan kamera yang ditunjukkan pada Gbr. 1. Miniatur tersebut memiliki dimensi 80 cm x 50 cm x 50 cm. Untuk menggerakkan kamera, digunakan empat buah motor DC yang identik. Motor tersebut dihubungkan dengan roda yang memiliki keliling 14 cm, sehingga dalam sekali putaran, kabel akan tergulung atau terulur sepanjang 14 cm. Untuk mendeteksi putaran motor, digunakan sensor *rotary encoder*. Sebagai pemroses utama digunakan pengendali mikro STM32F4 yang akan memberikan sinyal *Pulse Wave Modulation* (PWM) ke *driver* L298N *H-Bridge*. *Driver* ini mampu menggerakkan dua motor sekaligus.



Gbr. 1 Gambar skematik miniatur sistem penggerak kamera laba-laba.

[1]*Dosen, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Jl. MT Haryono 167 Malang 65145 INDONESIA (tlp: 0341-554166; fax: 0341-554166; e-mail: muh_aziz@ub.ac.id)*

[2]*Mahasiswa, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Jl. MT Haryono 167 Malang 65145 INDONESIA (tlp: 0341-554166; fax: 0341-554166; e-mail: wahyu.frido@gmail.com)*

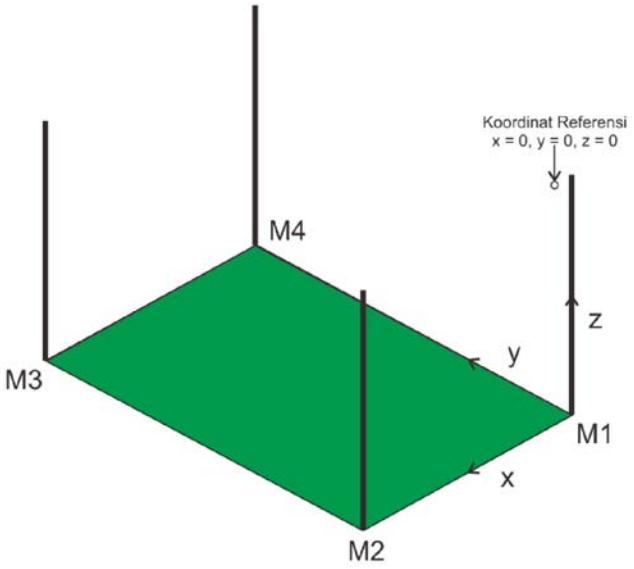
Untuk menggerakkan kamera, digunakan metode kinematika balik yang akan menerjemahkan posisi kamera yang diinginkan ke dalam sudut pergerakan yang diperlukan oleh masing-masing motor untuk mencapai posisi tersebut. Untuk menggerakkan motor sesuai dengan sudut yang diberikan oleh kinematika balik, digunakan metode kendali PID [4], [5] yang sudah dikenal memiliki kinerja yang baik. Penentuan parameter pengendali PID dilakukan secara analitik dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB, sehingga diperlukan langkah pemodelan motor DC terlebih dahulu melalui metode identifikasi model [6]. Selanjutnya dilakukan serangkaian eksperimen untuk menguji hasil rancangan sistem penggerak kamera laba-laba.

III. RANCANGAN SISTEM PENGGERAK KAMERA LABA-LABA

Pada bagian III ini, rancangan metode penelitian yang secara ringkas sudah dituliskan pada bagian II diuraikan dengan lebih detail, dimulai dari penurunan kinematika balik bagi sistem, penentuan parameter pengendali PID, dan desain perangkat keras bagi sistem penggerak kamera.

A. Kinematika Balik Sudut Motor

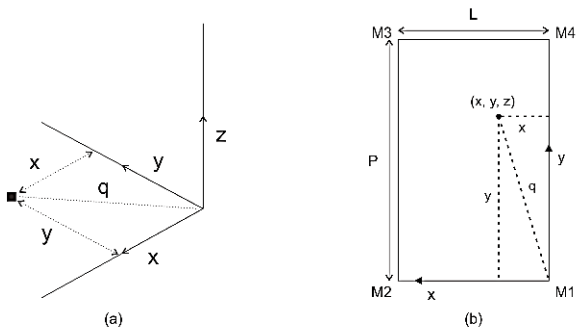
Perumusan kinematika balik diawali dengan menentukan koordinat referensi dari ruang kerja yang digunakan, yaitu saat x = 0, y = 0, dan z = 0, sehingga nilai (0,0,0) diberi simbol (x_r,y_r,z_r). Pemilihan koordinat referensi diperlihatkan pada Gbr. 2.



Gbr. 2 Koordinat referensi pada ruang kerja pergerakan kamera.

Skema bidang X-Y-Z pada Gbr. 3 digunakan untuk menentukan nilai panjang kabel dari titik koordinat (x,,) yang telah diketahui. Mula-mula dilakukan proyeksi bidang tiga dimensi terhadap bidang X-Y dan dengan menggunakan rumus Pythagoras, berdasarkan nilai x dan y didapatkan nilai q sebagai garis bantu penentuan nilai berikutnya, sehingga didapatkan (1).

$$q = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{1}$$



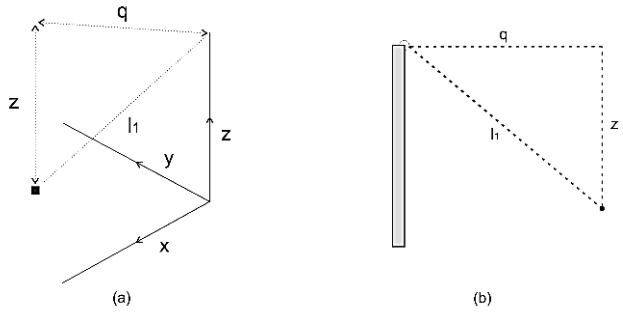
Gbr. 3 Sistem referensi koordinat, (a) Bidang X-Y-Z, (b) Hasil proyeksi terhadap bidang X-Y.

dengan q merupakan panjang sisi miring seperti ditunjukkan pada Gbr. 3(b). Selanjutnya, panjang kabel diukur terhadap motor 1 (l_1) dapat dihitung dengan menggunakan (2) dan (3). Posisi l_1 pada sistem koordinat diperlihatkan pada Gbr. 4.

$$l_1 = \sqrt{q^2 + z^2} \tag{2}$$

dengan $q^2 = x^2 + y^2$, maka persamaan nilai panjang kabel terhadap motor 1 dapat disederhanakan menjadi

$$l_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \tag{3}$$



Gbr. 4 Analisis posisi l_1, (a) Bidang tiga dimensi X-Y-Z, (b) Proyeksi terhadap bidang dua dimensi.

Selanjutnya, panjang kabel relatif terhadap motor 2 (l_2), motor 3 (l_3) dan motor 4 (l_4) berturut-turut dinyatakan dalam (4)-(6) sebagai berikut.

$$l_2 = \sqrt{(L - x)^2 + y^2 + z^2} \tag{4}$$

$$l_3 = \sqrt{(L - x)^2 + (P - y)^2 + z^2} \tag{5}$$

$$l_4 = \sqrt{x^2 + (P - y)^2 + z^2} \tag{6}$$

dengan L dan P berturut-turut adalah panjang dan lebar ruang kerja pergerakan kamera.

Keempat persamaan (l_1,l_2,l_3,l_4) digunakan untuk mencari nilai panjang kabel terhadap masing-masing motor berdasarkan posisi awal (x_a,y_a,z_a) dan posisi akhir (x_b,y_b,z_b) dari kamera laba-laba.

Kedua perhitungan tersebut digunakan dalam mencari sudut putaran masing-masing motor. Nilai satuan panjang dikonversi menjadi nilai satuan derajat dan kemudian nilai tersebut menjadi nilai masukan posisi dari masing-masing motor.

Dengan memasukkan nilai keliling roda adalah 14 cm, maka sudut putaran (dalam derajat) masing-masing motor dapat dihitung dengan menggunakan (7).

$$\theta_1 = \frac{\Delta l_1}{14x360}$$
$$\theta_2 = \frac{\Delta l_2}{14x360}$$
$$\theta_3 = \frac{\Delta l_3}{14x360} \quad (7)$$
$$\theta_4 = \frac{\Delta l_4}{14x360}.$$

Hasil sudut putaran dapat berupa nilai positif atau negatif sehingga nilai tersebut yang menentukan arah putaran motor. Nilai positif artinya arah putaran motor mengulur atau membuat tali lebih panjang, sedangkan nilai negatif artinya arah putaran motor menggulung atau membuat tali lebih pendek.

Kecepatan motor memiliki nilai masing-masing pada setiap motornya agar arah gerak kamera sesuai pada lintasannya. Hal yang perlu dilakukan selanjutnya adalah menentukan pemberian nilai *duty cycle* sinyal PWM berdasarkan fungsi kendali PID terhadap setiap motor. Penentuan nilai *duty cycle* sebagai *setpoint* untuk masing-masing motor. Maka, *duty cycle* untuk setiap motor dapat dijabarkan menjadi

$$D_1 = \theta_1/t$$
$$D_2 = \theta_2/t$$
$$D_3 = \theta_3/t \quad (8)$$
$$D_4 = \theta_4/t$$

dengan $t = \theta_{max}/25$.

Penentuan *setpoint* membuat koordinasi antar motor menjadi lebih baik, sehingga arah gerak kamera sesuai pada lintasannya yaitu bergerak lurus dari posisi awal ke posisi akhir dengan porsi sudut putaran setiap motor yang telah ditentukan dengan metode sebelumnya. Berdasarkan kedua metode tersebut, didapatkan kecepatan arah gerak kamera berdasarkan kecepatan motor yaitu sebesar 5,83 cm/s.

B. Penentuan Parameter PID

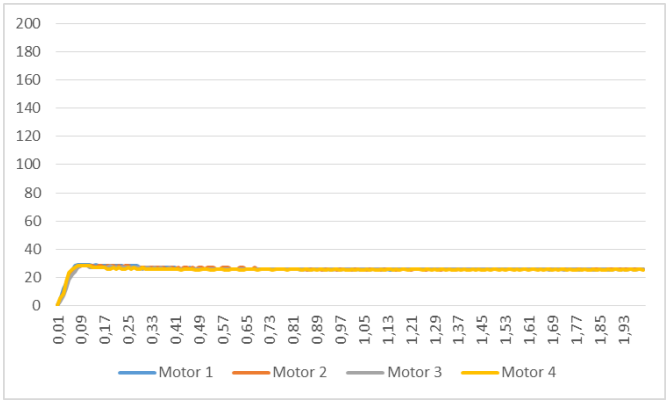
Penentuan parameter pengendali PID dilakukan secara analitis, sehingga diperlukan model dari *plant* untuk menentukan parameter pengendali. Untuk itu, langkah pertama adalah melakukan identifikasi sistem untuk menemukan fungsi alih dari motor DC. Pada motor diberikan masukan berupa sinyal *Pseudo Random Binary Sequence* (PRBS) sehingga diperoleh tanggapan dari motor dalam bentuk data kecepatan motor [6]–[9]. Proses identifikasi dilakukan dengan menggunakan MATLAB terhadap data sinyal PRBS dan data kecepatan motor DC yang didapatkan. Dengan *System Identification Toolbox* dilakukan beberapa kali estimasi model sehingga didapatkan fungsi alih terbaik dari model dengan *pole* = 2 dan *zero* = 0 dengan nilai *bestfit* sebesar 92,61%.

Metode identifikasi yang dipilih pada MATLAB untuk menentukan fungsi alih motor DC adalah metode *Instrument Variable Approach* (IV). Diperoleh hasil identifikasi berupa fungsi alih motor DC sebagai berikut.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{24080}{s^2+5057s+22570}. \quad (9)$$

Hal yang selanjutnya dapat dilakukan adalah penentuan parameter pengendali PID dengan menggunakan *PID Tuner* yang telah tersedia pada MATLAB.

Hasil yang ditunjukkan dari penentuan parameter pengendali PID adalah nilai *Kp* = 5,2693, *Ki* = 128,1539, dan *Kd* = 0, sehingga parameter pengendali PID tersebut dapat digunakan untuk kendali kecepatan motor DC pada masing-masing motor DC. Tanggapan masukan tangga diberikan pada Gbr. 5.

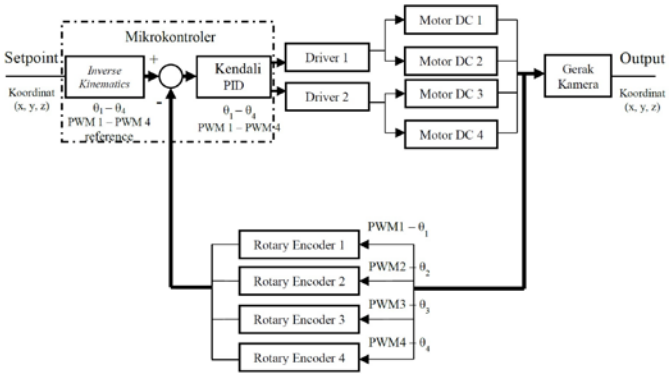


Gbr. 5 Tanggapan masukan tangga untuk masing-masing motor.

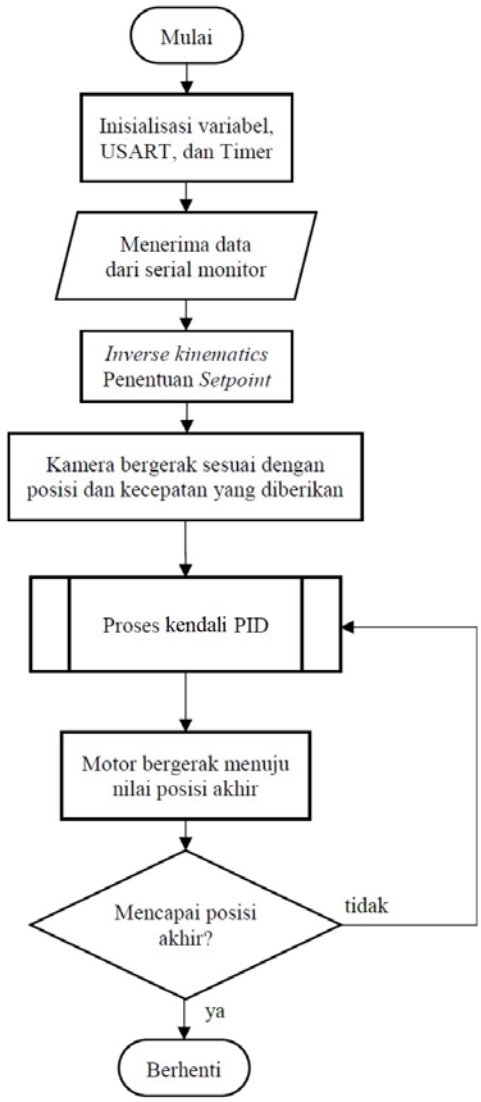
Pengujian akhir dari kecepatan motor tersebut menunjukkan bahwa respons kecepatan untuk setiap motor cukup baik karena kecepatan motor memiliki respons yang cepat dan berosilasi dekat dengan garis *setpoint* yaitu dengan *time settling* (*Ts*) = 0,4s, *error steady-state* (*ess*) = 4%, dan *maximum overshoot* (*Mp*) = 16%.

C. Desain Sistem

Diagram blok sistem penggerak kamera laba-laba ditunjukkan pada Gbr. 6. Pada gambar tersebut, pengendali mikro yang digunakan adalah STM32F4 yang memiliki kecepatan yang mumpuni untuk keperluan komputasi yang cukup berat. Pada pengendali mikro ditanamkan algoritme sebagaimana ditunjukkan oleh diagram alir pada Gbr. 7.



Gbr. 6 Diagram blok sistem penggerak kamera laba-laba.



Gbr. 7 Diagram alir algoritme sistem penggerak kamera laba-laba.

TABEL I
PENGUJIAN ARAH GERAKAN KAMERA LABA-LABA

Respons Motor				Arah Gerak Kamera Laba-laba
Motor 1	**Motor 2**	**Motor 3**	**Motor 4**	
Menggulung	Menggulung	Menggulung	Menggulung	Naik
Mengulur	Mengulur	Mengulur	Mengulur	Turun
Mengulur	Menggulung	Menggulung	Mengulur	Maju
Menggulung	Mengulur	Mengulur	Menggulung	Mundur
Mengulur	Mengulur	Menggulung	Menggulung	Kanan
Menggulung	Menggulung	Mengulur	Mengulur	Kiri

IV. EKSPERIMEN DAN PEMBAHASAN HASIL EKSPERIMEN

Pada tahap awal eksperimen, dilakukan beberapa pengujian untuk melihat resultan arah gerak dari kamera dengan berbagai kombinasi putaran motor 1, motor 2, motor 3, dan motor 4. Hasil pengujian disarikan pada Tabel I.

TABEL II
KINERJA PERGERAKAN KAMERA DARI TITIK AWAL KE TITIK AKHIR

Skema	Koordinat Awal ($x_a;y_a;z_a$)	Koordinat Akhir Diinginkan ($x_d;y_d;z_d$)	Koordinat Akhir Realisasi ($x_r;y_r;z_r$)	*Error* Posisi (%)
Naik	(12;34;40)	(12;34;15)	(12;34;15)	0
	(23,5;14;40)	(23,5;14;15)	(23,5;14;15)	0
	(23,5;34;40)	(23,5;34;15)	(23,5;34;15)	0
	(23,5;54;40)	(23,5;54;15)	(23,5;54;15)	0
	(35;34;40)	(35;34;15)	(35;34;15)	0
Turun	(12;34;15)	(12;34;40)	(12;34;40)	0
	(23,5;14;15)	(23,5;14;40)	(23,5;14;40)	0
	(23,5;34;15)	(23,5;34;40)	(23,5;34;40)	0
	(23,5;54;15)	(23,5;54;40)	(23,5;54;40)	0
	(35;34;15)	(35;34;40)	(35;34;40)	0
Maju	(12;14;22)	(35;14;22)	(35;14;22)	0
	(12;34;22)	(35;34;22)	(35;34;22)	0
	(12;54;22)	(35;54;22)	(35;54;22)	0
	(12;14;36)	(35;14;36)	(35;14;36)	0
	(12;34;36)	(35;34;36)	(35;34;36)	0
	(12;54;36)	(35;54;36)	(35;54;36)	0
Mundur	(35;14;22)	(12;14;22)	(12;14;22)	0
	(35;34;22)	(12;34;22)	(12;14;22)	0
	(35;54;22)	(12;54;22)	(12;14;22)	0
	(35;14;36)	(12;14;36)	(12;14;36)	0
	(35;34;36)	(12;34;36)	(12;34;36)	0
	(35;54;36)	(12;54;36)	(12;54;36)	0

Besaran persentase *error* posisi pada Tabel II dihitung dengan menggunakan (10).

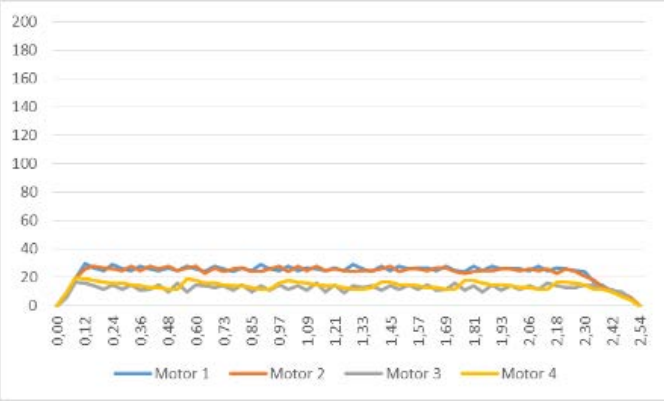
$$Error \text{ Posisi}(\%) = \frac{Jarak\ Posisi\ Akhir\ Realisasi\ ke\ Posisi\ Awal}{Jarak\ Posisi\ Akhir\ Diinginkan\ ke\ Posisi\ Awal} x100\%. \quad (10)$$

Sedangkan perhitungan jarak dihitung dengan menggunakan jarak Euclidean, sehingga rumusan perhitungan *error* posisi menjadi

$$Error \text{ Posisi } (\%) = \frac{\sqrt{(x_r-x_a)^2+(y_r-y_a)^2+(z_r-z_a)^2}}{\sqrt{(x_d-x_a)^2+(y_d-y_a)^2+(z_d-z_a)^2}} x100\%. \quad (11)$$

Selanjutnya dilakukan pengujian pergerakan kamera dari sebuah titik koordinat awal ke titik koordinat akhir. Untuk penentuan koordinat ini, dilakukan pengukuran manual dengan menggunakan mistar. Rangkuman dari kinerja hasil pergerakan disajikan pada Tabel II. Dari tabel dapat dilihat bahwa sistem pergerakan kamera berhasil mencapai titik yang diinginkan dengan tingkat keberhasilan 100%.

Pengujian selanjutnya adalah terkait dengan profil kecepatan sudut dari pergerakan. Sebuah sistem kendali yang baik akan mengontrol pergerakan motor sangat cepat di awal hingga mencapai kecepatan maksimumnya, tetapi akan turun kecepatannya dalam waktu yang singkat ketika motor pada posisi sudah mendekati nilai yang dituju. Gbr. 8 memperihatkan profil dari kecepatan motor. Terlihat bahwa profil kecepatan menunjukkan kecepatan yang relatif tinggi pada awal motor berputar, kemudian menetap pada nilai kecepatan tertentu untuk selanjutnya saat sistem sudah mendekati *setpoint*, keluaran sistem turun menuju ke nilai 0.



Gbr. 8 Profil kecepatan motor.

Grafik respons kecepatan motor pada Gbr. 8 menunjukkan munculnya osilasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa fungsi kendali PID bekerja saat dipengaruhi oleh mekanik alat, ketegangan kabel, dan bobot kamera serta penyesuaian saat motor mengulur atau menggulung. Respons kecepatan motor memiliki *maximum overshoot* dan *error steady-state* yang cukup besar, yaitu *maximum overshoot* (*Mp*) sekitar 16% sampai 20%, dan *error steady state* (e_{ss}) sekitar 12% sampai 16%. Namun, hal tersebut tidak memengaruhi ketepatan posisi akhir kamera laba-laba yang telah cukup baik. Dalam sistem pengendalian, nilai *maximum overshoot* hingga 50% masih diperbolehkan. Namun, untuk penerapan pada kamera laba-laba, diharapkan besaran *maximum overshoot* adalah sekecil mungkin untuk menghindari rekaman gambar atau video yang bergoyang. Oleh karena itu, dari hasil eksperimen didapatkan bahwa respons motor masih memiliki *maximum overshoot* dan *error steady-state* yang cukup besar.

V. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah berhasil dirancang suatu sistem pengaturan pergerakan kamera laba-laba. Pergerakan dirancang dengan menggunakan metode kinematika balik serta dengan pengendali PID sebagai pengendali pergerakan tiap motor. Dari hasil pengujian diperoleh data bahwa pergerakan kamera telah berhasil memenuhi posisi akhir yang dinginkan dengan akurasi sebesr 100%. Profil kecepatan motor juga memperlihatkan pola kecepatan sesuai dengan yang diharapkan. Namun, bila diamati dari respons kecepatan tiap motor, didapatkan bahwa respons motor masih memiliki *maximum overshoot* dan *error steady-state* yang cukup besar.

REFERENSI

[1] M. Filipović, "The Importance of Modelling an Aerial Robotic Camera," *Sci. Tech. Rev.*, Vol. 62, No. 1, hal. 28–37, 2012.

[2] E. Ottaviano, "Analysis and Design of a Four-Cable-Driven Parallel Manipulator for Planar and Spatial Tasks," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 222, No. 8, hal. 1583–1592, Agt. 2008.

[3] H. Wei, Y. Qiu, dan Y. Su, "Motion Control Strategy and Stability Analysis for High-Speed Cable-Driven Camera Robots with Cable Inertia Effects," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, Vol. 13, No. 5, hal. 1–14, 2016.

[4] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Boston, USA: Prentice-Hall, 2010.

[5] R. Vilanova dan A. Visioli, *PID Control In The Third Millennium*, New York, USA: Springer, 2012.

[6] K. J. Keesman, *System Identification*, London, UK: Springer, 2011.

[7] V.Bobál, J. Böhm, J. Fessl, dan J. Machácek, *Digital Self-tuning Controllers*, London, UK: Springer, 2005.

[8] A. Alexandrov dan M. Palenov, "Self-tuning PID-I Controller with a New Algorithm of Tuning of Test Signal," *IFAC Proceeding Volumes*, Vol. 46, No. 9, hal. 1798-1803, 2013.

[9] M. A. Muslim dan G. D. Nusantoro, "System Identification of a Vacuum Distiller Using ANFIS with an ARMAX Structure," *Proceeding - 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, (ISITIA)*, 2016, hal. 661-664.