

## RANCANG BANGUN SISTEM NAVIGASI *MOBILE ROBOT* BERBASIS SENSOR *ROTARY ENCODER* MENGGUNAKAN METODE ODOMETRI

Alfi Nur Albab<sup>1)</sup>, Endah Rahmawati<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Program Studi Fisika Universitas Negeri Surabaya, email: [alfialbab@mhs.unesa.ac.id](mailto:alfialbab@mhs.unesa.ac.id)

<sup>2)</sup> Dosen Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: [e.rahmawati@gmail.com](mailto:e.rahmawati@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan *prototype mobile robot* yang menerapkan sistem navigasi metode odometri dan untuk menguji kontrol PID yang diterapkan pada sistem navigasi *mobile robot* dalam mencapai posisi yang telah ditentukan. Metode odometri yang digunakan membutuhkan dua masukan yaitu dari sensor *rotary encoder* yang terpasang pada motor kanan dan motor kiri. Sensor telah dikalibrasi dan dihasilkan akurasi sensor *rotary encoder* mencapai 99,9% untuk pembacaan jarak dan 99,7% untuk pembacaan *heading*. Terdapat dua tahap pengujian robot yaitu *open loop* dan *close loop* sesuai metode *tuning* Ziegler Nichols. Keseluruhan pengujian dilakukan pada bidang datar dengan empat *heading* tujuan yaitu 30°, 45°, 60°, dan lintasan dengan dua *heading* tujuan yaitu 45° dan 90°. Pada tahap *open loop* yang mana tidak ada kontrol PID, *error* yang dicapai sistem mencapai 269,3%; 164,9%; dan 285,5% untuk *heading* 30°, 45°, 60° berturut-turut. Sedangkan ketika diberi kontrol PID, akurasi sistem mencapai 99,3%; 99,8%; dan 100% untuk *heading* 30°, 45°, 60° berturut-turut. Analisis hasil pengujian sistem navigasi *mobile robot* yang telah dibuat dilakukan dengan menganalisis respon transien sistem saat sesudah diberi kontrol PID. kontrol PI saja membuat *error* posisi akhir kecil lebih kecil daripada sebelum ditambahkan kontrol PI, namun *settling time* dan *overshoot* maksimum besar. Peningkatan nilai *Kd* membuat respon sistem lebih stabil dan *steady state error* berkurang. Peningkatan nilai konstanta integral membuat *overshoot* sistem bertambah hingga waktu akhir dan stabilitas relatif sistem berkurang sehingga tidak ditemukan keadaan *steady*.

**Kata Kunci:** Sistem navigasi, *mobile robot*, metode odometri, kontrol PID Ziegler Nichols.

### Abstract

Researcher does this research to produce a *mobile robot* prototype which applies navigation system odometry method and also aims to examine the navigation system for reaching a predetermined position. The odometry method needs two inputs, they are from rotary encoder sensor placed in left and right motor of robot. The sensors have been calibrated to get sensor's accuracy. Accuracy of sensors used reaches 99,9% for distance sensing and 99,7% for heading sensing by rotary encoder sensor. Input on the algorithm *mobile robot* in the form of X, Y. There are two examination steps, they are open loop and close loop based on Ziegler Nichols tuning method. All of examinations were done in flat surface with four goal headings, namely 30°, 45°, 60°, and paths with two goal headings, namely 45° and 90°. In the open loop stage where there is no PID control, the system error reaches 269.3%; 164.9%; and 285.5% for heading 30°, 45°, 60° respectively. Then when given PID control, the system accuracy reaches 99.3%; 99.8%; and 100% for heading 30°, 45°, 60° respectively. Researcher analyses the results of *mobile robot* navigation system examination by analyzing the transient response of the system after being given PID control. PI controls just makes final error smaller than open loop, but enlarge time and overshoot. Increasing *Kd* makes the system response being more stable and steady state error decrease. Increasing the value of the integral constant makes researcher does not find steady state system because the system overshoot increase until the last time so the relative stability of the system decreases.

**Keywords:** Navigation system, *mobile robot*, odometry method, Ziegler Nichols PID control.

### PENDAHULUAN

Meningkatnya pemanfaatan robot dalam berbagai aspek kehidupan mendorong manusia meningkatkan teknologi konstruksi maupun kendalinya. Beberapa macam konstruksi robot telah ditemukan salah satu diantaranya yaitu *mobile robot* (robot yang bergerak). *Mobile robot* banyak digunakan dalam dunia industri untuk kepentingan logistik yaitu untuk mencapai suatu posisi dengan tujuan

tertentu. Sebuah sistem utama untuk lokalisasi *mobile robot* yaitu sistem navigasi.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan sistem navigasi terbaik salah satunya yaitu penelitian Haq (2017) yang juga menjadi dasar penelitian ini dilakukan. Haq menguji sistem navigasi *mobile robot* yang telah dirancang hanya pada suatu lintasan diagonal dengan memvariasikan arah hadap (*heading*), X dan Y tujuan. Kontroler PID digunakan sebagai kompensator

koordinat yang dicapai robot dengan koordinat yang *set point*. Parameter kontroler PID ditentukan dengan metode *trial and error* dengan menghasilkan nilai error paling besar 12,82%. Untuk selanjutnya, peneliti melakukan penelitian yang sama dengan Haq, namun menggunakan metode Ziegler Nichols untuk menentukan konstanta PID dengan mempertimbangkan lebih cepatnya penentuan parameter kontroler PID sesuai dengan penelitian Akbar dkk. (2013) dan Setiyawan dkk. (2013). Lintasan uji robot dibuat tidak hanya berupa lintasan diagonal, namun juga berupa lintasan lurus dan berbelok. Variasi tersebut dimaksudkan agar tercipta sebuah prototype sistem navigasi *mobile robot* yang dapat digunakan sebagai simulasi untuk pencapaian berbagai macam posisi target mengingat adanya rintangan lokalisasi yang tidak dapat dihindari ketika *mobile robot* dikembangkan dan diberi manfaat praktis pada penelitian selanjutnya. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan *prototype* sistem navigasi *mobile robot* dengan kontrol PID berbasis sensor *rotary encoder* menggunakan metode odometri, serta untuk menguji sistem navigasi *mobile robot* dalam mencapai posisi yang telah ditentukan.

**Metode Odometri**

Metode odometri digunakan untuk menentukan posisi relatif *mobile robot* (x(t), y(t), θ(t)) terhadap posisi awal (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, θ<sub>0</sub>) dengan memanfaatkan data dari aktuator. Data yang dimaksud adalah data counter dari sensor rotary encoder tiap satuan waktu yang kemudian digunakan untuk menentukan panjang lintasan yang telah dilalui *mobile robot*. Gambar 1 menunjukkan geometri odometri *mobile robot*. Panjang busur yang berarti panjang lintasan robot sama dengan jari-jari dikalikan sudut dalam sehingga panjang lintasan robot:

$$distance = \frac{(d_{right} + d_{left})}{2} \tag{1}$$

Gambar 1. Detail Geometri Odometri (Jusuf, 2010).

*d<sub>right</sub>* adalah jarak tempuh roda kanan dan *d<sub>left</sub>* adalah jarak tempuh roda kiri. Dengan ketentuan φ sangat kecil, maka diperoleh *d<sub>right</sub>* dan *d<sub>left</sub>* yang juga merupakan panjang busur seperti pada persamaan 2 dan 3.

$$d_{right} = \varphi \times r_{right} \tag{2}$$

$$d_{left} = \varphi \times r_{left} \tag{3}$$

Jika jarak antara dua roda adalah l, maka

$$r_{left} + l = r_{right} \tag{4}$$

Dengan megurangkan pers (2) dengan pers (3) maka diperoleh

$$\varphi \times r_{right} - \varphi \times r_{left} = d_{right} - d_{left} \tag{5}$$

$$\varphi (r_{right} - r_{left}) = d_{right} - d_{left} \tag{6}$$

*d<sub>left</sub>* dan *d<sub>right</sub>* menjadi dua busur dengan sudut yang sama yaitu φ sehingga diperoleh

$$\varphi l = d_{right} - d_{left} \tag{7}$$

$$\varphi = \frac{d_{right} - d_{left}}{l} \tag{8}$$

Heading dalam satuan derajat:

$$Heading (\theta') = \theta(t) = \theta_0 + \varphi \tag{9}$$

Heading dalam satuan radian:

$$\theta(t) = (\theta_0 + \varphi) \frac{180}{\pi} \tag{10}$$

Dalam aplikasinya, *d<sub>right</sub>* dan *d<sub>left</sub>* dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$d_{right} = encoder_{right} \times c \tag{11}$$

$$d_{left} = encoder_{left} \times c \tag{12}$$

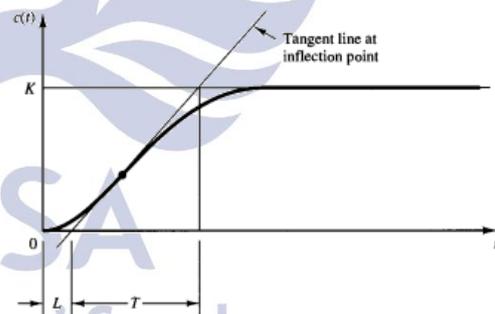
Di mana *encoder<sub>left</sub>* dan *encoder<sub>right</sub>* adalah jumlah pulsa *encoder* roda kiri dan kanan dalam waktu tertentu. *c* adalah (keliling roda) / (resolusi *encoder*). Resolusi *encoder* adalah jumlah pulsa *encoder* dalam satu putaran roda. Jika diilustrasikan pada sumbu kartesian, koordinat x dan y robot dapat diketahui :

$$x_{pos} = distance \cdot \sin \theta(t) \tag{13}$$

$$y_{pos} = distance \cdot \cos \theta(t) \tag{14}$$

**Metode Ziegler Nichols**

Terdapat dua metode kaidah tuning Ziegler-Nichols yang mana keduanya sama-sama megusahakan *overshoot* maksimum sebesar 25%. Pada penelitian yang dilakukan, peneliti menggunakan metode Ziegler Nichols pertama. Pada metode ini, nilai konstanta PID ditentukan melalui dua tahap yaitu *open loop* dan *close loop*. Pada tahap *open loop*, diperoleh nilai L dan T dari kurva respon seperti yang ditunjukkan gambar 2.



Gambar 2. Kurva Respon Berbentuk S (Ogata, 1997).

L merupakan *delay time* yang dihitung mulai 0-10% dari nilai akhir, sedangkan T merupakan *rise time* yang dihitung mulai 10-90% dari nilai akhir. kedua nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan yang diperlihatkan table 1.

Tabel 1. Aturan *tuning* Ziegler-Nichols

Tipe Kontroler	Kp	Ti	Td
PID	1,2 $\frac{T}{L}$	2L	0,5L

(Ogata, K., 1997)

Li, *et al.* (2006) menyebutkan bahwa integral gain  $K_i = K_p/T_i$  dan derivatif gain  $K_d = K_p T_d$  sehingga untuk sistem sederhana yang tidak membutuhkan fungsi laplace, persamaan PID dapat ditentukan menggunakan representasi domain waktu yaitu:

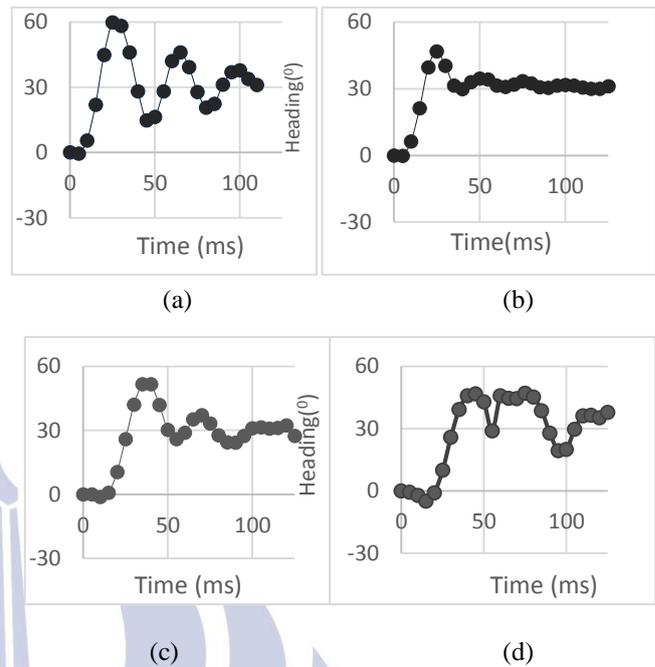
$$U(t) = K_p E_p(t) + \frac{K_p}{T_i} E_i(t) + K_p E_d(t) T_d \quad (15)$$

**METODE**

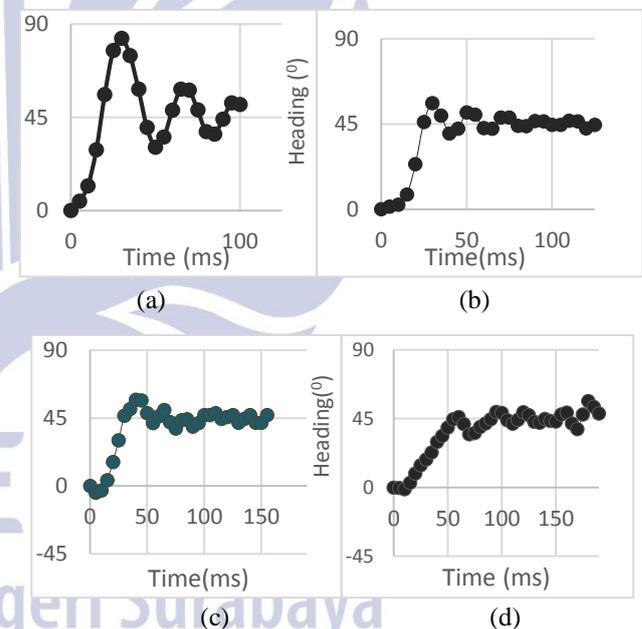
Penelitian yang dilakukan termasuk dalam jenis penelitian pengembangan yang mengadopsi metode pengembangan model pembelajaran ADDIE (*Analyse, Design, Develop, Implement, Evaluate*). Sensor rotary encoder dan sensor kompas dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk pengujian. Pengujian dilakukan pada bidang datar dengan posisi awal  $X Y \theta$  (0 cm, 0 cm, 0°) untuk mencapai posisi akhir: (141,4 cm; 141,4 cm; 45°), (100 cm; 173,2 cm; 30°), dan (173,2 cm; 50 cm; 60°). Variasi posisi akhir ini dimaksudkan agar diketahui apakah efek yang disebabkan atas penambahan kontrol PID sama pada tiap heading. Mobile robot juga diuji pada suatu lintasan dengan dua heading tujuan yaitu (141,4 cm; 141,4 cm; 45°) lalu berbelok arah hingga mencapai posisi akhir (400 cm, 141,4 cm, 90°). Pengujian pada lintasan ini dimaksudkan untuk diketahui komposisi konstanta PID yang tepat. Pengujian dilakukan berdasarkan metode Ziegler Nichols yang mana terdapat dua tahap yaitu *open loop* dan *close loop*. Perlakuan pada sistem pada tahap *close loop* didasarkan pada respon sistem pada tahap *open loop*. Pada tahap *open loop*, respon sistem cukup cepat yang berarti *rise time* kecil. Namun, *error* pada posisi akhir sangat besar. Berdasarkan Ang, K.H. (2005) menyatakan bahwa kontroler integral dapat mengurangi steady state error melalui kompensasi frekuensi rendah oleh integrator. Oleh sebab itu, manipulasi pertama yang diberlakukan kepada sistem pada tahap close loop yaitu dengan meningkatkan nilai  $K_i$ . Respon yang didapatkan yaitu osilasi sistem masih besar walaupun *error* pada posisi akhir semakin kecil. Ellis (2012) menyatakan bahwa penguat derivatif dipakai untuk stabilitas sistem. Oleh sebab itu, perlakuan kedua pada sistem yaitu dengan meningkatkan  $K_d$ . Dari kedua perlakuan tersebut, dapat diperoleh respon *time* sistem berupa *rise time*, *settling time*, dan *maximum (percent) overshoot*. Dikarenakan pengujian dilakukan dengan pengulangan, maka *error* rata-rata dari posisi akhir didapatkan melalui perhitungan *standard error*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

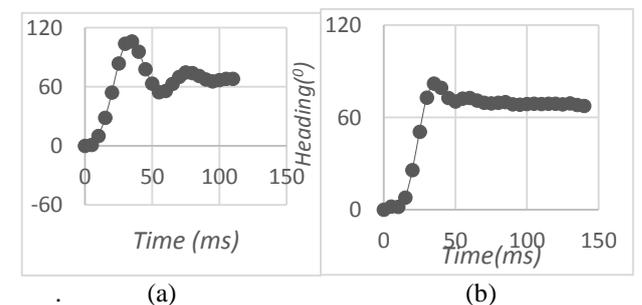
Penelitian dilakukan dengan memanipulasi tahap *close loop* diantaranya dengan peningkatan  $K_i$  dan peningkatan  $K_d$ .

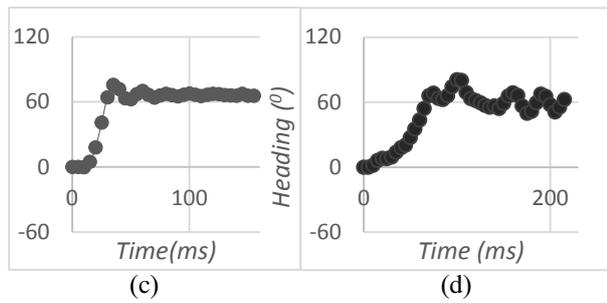


Gambar 3. Hasil Pengujian *Close Loop* pada Heading 30° dengan Konstanta  $K_p K_i K_d$ : (a) 3,66;0,122;0 (b) 3,66;0,122;2,75 (c) 2;3;4 (d) 2;4;4.

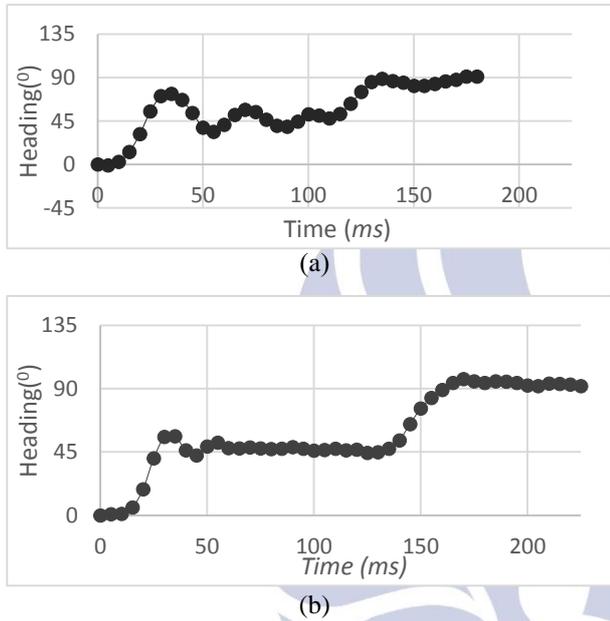


Gambar 4. Hasil Pengujian *Close Loop* pada Heading 45° dengan Konstanta  $K_p K_i K_d$ : (a) 4,473;0,1491;0 (b) 4;0;4 (c) 2,6;1;6 (d) 2,6;4;6.





Gambar 5. Hasil *Close Loop* pada Heading 60° (a) 2,135;0,053;0 (b) 2,135;0,053;2,135 (c) 3;0;3 (d) 3;2;3.



Gambar 6. Hasil Pengujian *Close Loop* pada Dua Heading Tujuan dengan (a)  $K_d = 0$  (b)  $K_d \neq 0$

Pengujian sistem navigasi mobile robot dilakukan dengan meningkatkan suatu konstanta dan membuat tetap konstanta-konstanta lainnya. Nilai *settling time* diperoleh dari waktu rata-rata yang diperlukan sistem untuk berada pada keadaan *steady* (2% atau 5% absolut dari nilai akhir). Nilai *steady state error* diperoleh dari rata-rata error sistem saat mencapai keadaan *steady*. Hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dirangkum dalam tabel 2.

Tabel 2. Rangkuman Respon Transien dari Semua Pengujian pada Tahap *Close Loop*

Respon <i>Close Loop</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Steady State Error</i>	Stabilitas Relatif
Ki bertambah	Bertambah	Bertambah	Tidak ditemukan	Menurun
Kd bertambah	Berkurang	Berkurang	Berkurang	Meningkat

Peningkatan konstanta derivatif mengakibatkan respon transien dan respon *steady state* sistem secara keseluruhan membaik. Menurut Li, Y. *et al.* (2006), Jika hanya kontroler

proporsional dan integral saja yang diberikan kepada sistem, maka terdapat peningkatan gain oleh faktor:

$$\left|1 + \frac{1}{j\omega T_i}\right| = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_i^2}} > 1, \text{ untuk semua } \omega \quad (15)$$

dan meningkatkan *phase-lag* karena:

$$\angle\left(1 + \frac{1}{j\omega T_i}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-1}{\omega T_i}\right) < 0, \text{ untuk semua } \omega \quad (16)$$

Oleh karena itu, *gain margin* (GM) dan *phase margin* (PM) berkurang sehingga menyebabkan osilasi sistem lebih besar dan stabilitas sistem kecil.

Penambahan konstanta derivatif berguna menyediakan *phase lead*, yang mana dapat mengimbangi *phase lag* yang disebabkan konstanta integral. Penambahan  $K_d$  pada konstantan proporsional mengurangi *phase lag* oleh persamaan 17.

$$\angle(1 + j\omega T_d) = \tan^{-1}\frac{\omega T_d}{1} \in [0, \pi/2] \text{ untuk semua } \omega \quad (17)$$

yang mana cenderung meningkatkan PM sehingga dapat meningkatkan stabilitas sistem.

Adanya sifat aksi prediksi yang mana kontroler derivatif sebanding dengan perubahan *error*, menyebabkan *error* sistem jauh lebih cepat berkurang (Aström and Hägglund, 2001). Kontrol derivatif merespon perubahan *error* dan mampu menghasilkan perbaikan signifikan sebelum *error* terlalu besar. Hal ini yang menyebabkan sistem dapat dengan lebih cepat mencapai atau mendekati nilai akhir sehingga *settling time* sistem berkurang.

Kontrol derivatif tidak mempengaruhi *steady state error* secara langsung (Ogata, K., 1997). Namun, penambahan konstanta ini mengizinkan penggunaan nilai gain K lebih besar yang meningkatkan akurasi *steady state*. Hal ini dapat ditunjukkan pada hasil pengujian saat sebelum ditambah kontrol derivatif ( $K_d = 0$ ), sistem relatif tidak berada dalam keadaan *steady*. Namun setelah ditambahkan  $K_d$ , sistem diketahui dapat mencapai keadaan *steady* dengan *steady state error* paling kecil yaitu sebesar 0,33% .

Peningkatan nilai konstanta integral mengakibatkan stabilitas sistem menurun. Hal ini disebabkan adanya ketidaklinearan pada sistem (Bohn and Atherton, 1995). Salah satu ketidaklinearan yang umum ditemukan yaitu saturasi dari output. Efek saturasi terlihat jelas saat sistem dalam keadaan tidak stabil atau overshoot. Efek ini dikenal dengan integrator *windup*. Efek ini yang muncul akibat perubahan setpoint yang besar. Sebagai konsekuensi, sistem lebih lama mencapai keadaan stabil setelah upset atau *settling time* sistem bertambah. Pada penelitian yang telah dilakukan, hasil pengujian pada peningkatan  $K_i$  menyebabkan sistem tidak dapat mencapai keadaan *steady* sehingga tidak pula ditemukan *steady state error*. Hasil penelitian ini berlainan dengan hasil penelitian Ang, K. H. *et al.* (2005) yang memanfaatkan integrator *anti-windup protection*. Dalam penelitiannya, disebutkan bahwa

peningkatan nilai  $K_i$  dapat mengurangi *steady state error* sistem secara signifikan.

Pada pengujian sistem navigasi pada dua *heading* yaitu  $45^\circ$  dan  $90^\circ$  menunjukkan bahwa sistem bekerja lebih baik untuk mencapai *heading*  $45^\circ$  saat kontrol derivatif ditingkatkan, namun tidak dengan *heading*  $90^\circ$ . Sistem bekerja lebih baik saat tidak ada kontrol derivatif. Hal ini disebabkan karena saat uji PID2 dengan peningkatan  $K_d$ , kontroler derivatif pada *heading*  $45^\circ$  sangat berusaha mempertahankan kestabilan sistem hingga waktu 135 ms. Sedangkan pada waktu yang bersamaan, respon sistem pada PID1 telah mencapai nilai puncak pertama. Hal ini menyebabkan nilai *rise time* dan *settling time* sistem dengan PID2 lebih besar daripada dengan PID1.

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian ini menghasilkan sebuah *mobile robot* yang menerapkan sistem navigasi menggunakan metode odometri yaitu dengan mengetahui posisi relatif *mobile robot* tiap waktu melalui *feedback* dari sensor *rotary encoder* yang terpasang pada kedua motor. *Mobile robot* juga dilengkapi dengan sensor kompas untuk mengkonfirmasi pembacaan *heading* pada posisi terakhir oleh sensor *rotary encoder*. Kedua sensor telah dikalibrasi. Sistem navigasi *mobile robot* bekerja jauh lebih baik jika mendapat kontrol PID daripada tidak untuk mencapai posisi yang telah ditentukan. Akurasi sistem saat diberi kontrol PID mencapai 99,3%; 99,8%; dan 100% pada *heading*  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  berturut-turut. Sedangkan saat tidak diberi kontrol, error sistem mencapai 269,3%; 164,9%; dan 285,5% untuk *heading*  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  berturut-turut. Komposisi konstanta PID yang berbeda membuat respon sistem yang berbeda. kontrol PI saja membuat sistem dapat mendekati nilai *set point* pada posisi terakhir, namun sistem terus berosilasi sehingga tidak ditemukan keadaan *steady*. Peningkatan nilai  $K_i$  membuat *overshoot* sistem bertambah dan stabilitas relatif sistem berkurang sehingga masih tidak ditemukan keadaan *steady*. Peningkatan nilai  $K_d$  membuat respon sistem lebih cepat menuju dan tetap pada *set point* sehingga stabilitas meningkat.

### Saran

Penempatan sensor kompas hendaknya lebih dijauhkan dari kedua motor DC dan sensor *rotary encoder*. Posisi sensor kompas harus benar-benar datar. Posisi sensor kompas yang miring memengaruhi hasil pembacaan *heading*. Untuk mengurangi osilasi dari efek peningkatan  $K_i$ , dapat dilakukan penambahan anti *windup* agar efek yang ditimbulkan oleh peningkatan konstanta integral terhadap kestabilan sistem berkurang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A. E., Djuriatno, W., dan Siwindarto, P. 2013. Implementasi Sistem Navigasi Wall Following Menggunakan Kontroler PID dengan Metode Tuning pada Robot Kontes Robot Cerdas Indonesia (KRCI) Divisi Senior Beroda. Jurnal Mahasiswa TEUB. 1(1).
- Ang, K. H., Chong, G. C. Y., and Li, Y. 2005. PID Control System Analysis, Design, and Technology. IEEE Transactions on Control Systems Technolog, 13(4), 559-576.
- Astrom, K. J. and Hagglund. 2000. The Future of PID Control. International Federation of Automatic Control Proceeding, 33(4), 19-30.
- Bohn, C. and Atherton, D. P. 1995. An analysis Package Comparing PID anti-Windup Strategies. IEEE Control System. 34-40.
- Ellis, G. 2012. Introduction to Observers in Control Systems. *Control System Design Guide*, 185-212. doi:10.1016/b978-0-12-385920-4.00010-2.
- Haq, R., Prayitno, H., Sucahyo, I., and Rahmawati, E. 2018. A Low Cost Mobile Robot Based on Proportional Integral Derivative (PID) Control System and Odometer for Education. Journal of Physics: Conference Series, 997(1), 012046.
- Li, Y., Ang, K. H., and Chong, G. C. Y. 2006. PID Control System Analysis and Design: Problems, Remedies, and Future Directions. IEEE Control System Magazine, 26(1), 32-41.
- Ogata, K. 1997. Modern Control Engineering. 3rd Edition. United State of America: Prentice-Hall, Inc, 1-1013. ISBN: 0-13-227307-1.
- Setiawan, B. I. 2013. Perancangan Robot Auto Line Follower Menerapkan Osilasi Ziegler-Nichols untuk Tuning Parameter PID pada Kontes Robot Indonesia. Jurnal Mahasiswa TEUB, 1-6.