

Sistem Kendali Arah pada Robot Berstruktur Origami dengan Variasi Gangguan Roda Berbasis *Gyrorate* Sensor

Rakhmad Gusta Putra
Teknik Komputer Kontrol
Politeknik Negeri Madiun, PNM
Madiun, Indonesia
gusta@pnm.ac.id

Budi Artono
Teknik Komputer Kontrol
Politeknik Negeri Madiun, PNM
Madiun, Indonesia
budiartono@pnm.ac.id

Abstrak— Robotika terkenal dengan harga mahal dan rumit dalam pembuatannya. Hal ini terjadi karena perangkat yang digunakan sangat kompleks dan perlu tenaga ahli. Untuk mengatasi hal tersebut, para peneliti mengembangkan struktur robot dengan prinsip origami dengan bahan sederhana dan dapat ditiru orang awam. Struktur origami memiliki kelemahan dari sifat lentur dari lipatan dan bahan sehingga mengakibatkan ketidak presisian. Berdasarkan hal tersebut dimungkinkan robot akan berjalan tidak sesuai dengan *trajectory* yang direncanakan. Oleh karena itu diperlukan sistem pengendali arah secara *close loop* agar robot beralan sesuai dengan harapan. Dalam penelitian ini digunakan robot beroda dengan struktur origami sebagai obyek penelitian. Target gerakan adalah gerakan lurus. Sistem yang diusulkan adalah pengendalian arah robot berbasis *gyrorate* dengan kontroler PID. Pada percobaan dilakukan dengan memberikan variasi kondisi roda untuk menguji konsistensi sistem. Berdasarkan pengujian, sistem yang diusulkan secara signifikan mendekati dari *trajectory* yang direncanakan dibandingkan dengan sistem *open loop*.

Kata kunci— *Kendali Arah; PID; Gyrorate; Origami* .

I. PENDAHULUAN

Penggunaan teknologi robotika kian meluas setiap harinya, dari industri manufaktur hingga rumah tangga. Sampai saat ini robot masih terkenal dengan harga mahal dan kompleks. Hal ini terkait dengan kerumitan teknologi yang digunakan. Struktur robot yang memerlukan banyak sekali bagian-bagian dengan tingkat presisi yang baik, perangkat elektronik yang mumpuni dan perangkat lunak yang handal. Untuk mendesain satu jenis robot biasanya dibutuhkan desain oleh seorang pakar dengan perangkat yang kompleks dan memerlukan pengembangan terus-menerus. Hal ini juga membuat teknologi robot hanya dikuasai oleh ahli saja.

Salah satu metode membangun struktur robot yang mudah dan murah adalah dengan menggunakan prinsip kirigami atau origami. Kirigami adalah cabang dari origami yang dalam prosesnya melibatkan proses pemotongan [1]. Seperti yang kita ketahui, origami adalah seni melipat kertas yang populer di Jepang. Origami memungkinkan membangun obyek 3D dari lembaran kertas 2D. Hal inilah yang menjadi poin penting prinsip ini. Jika origami hanya mengandalkan melipat saja, dengan kirigami kita dapat memodifikasi dengan menambahkan proses memotong, mengelem, melapisi dll. Proses ini lebih mirip membuat kartu pop-up tapi dengan tetap

mempertahankan prinsip origami. Dengan menggunakan prinsip ini maka proses produksi akan lebih mudah dan murah. Dengan mengembangkan database bentuk-bentuk struktur robot yang ada maka pembuatan akan dapat dilakukan oleh siapa saja.

Pembuatan robot dengan prinsip origami telah banyak dikembangkan oleh para peneliti. Mulai dikembangkan roda robot dengan prinsip origami yang dapat berubah bentuk [2],[3]. Pembuatan robot berkaki dengan prinsip SCM untuk membuat robot berkaki juga dikembangkan [4],[5]. Termasuk didalamnya adalah DASH dan octoROACH. Para peneliti juga mengembangkan *open source software* untuk mengembangkan hardware dengan model origami [6],[7].

Dengan menggunakan prinsip origami maka kepresisian akan menurun dikarenakan sifat kelenturan bahan [8]. Dengan mengorbankan kepresisian struktur maka sistem harus ditunjang dari sisi lain yaitu perangkat elektronik dan perangkat lunak. Perangkat elektronik kian hari kian berkembang dengan dimensi yang semakin kecil. Performa yang baik juga memungkinkan untuk diselipkan sistem perangkat lunak yang lebih kompleks dengan harga yang relatif terjangkau.

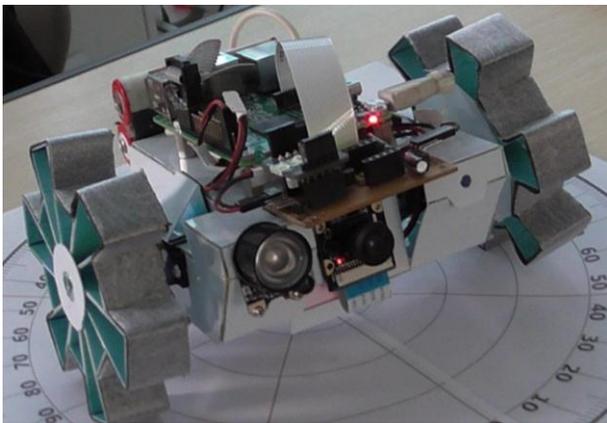
Dalam penelitian ini diambil contoh robot inspeksi dengan struktur origami sebagai obyek. Robot didesain berupa robot beroda dengan sistem pergerakan roda diferensial. Di lapangan dimungkinkan robot akan mengalami deformasi bentuk badan maupun roda akibat tekanan atau benturan. Hal tersebut akan membuat robot sulit untuk dikendalikan dari jarak jauh. Untuk membuat robot tetap mudah dikendalikan maka dikembangkan sistem kendali arah berbasis *gyrorate* sensor. Sistem kemudi akan dibantu untuk menjaga robot berada pada jalur yang sesuai. Sistem didasarkan pada orientasi gerak robot yang dibaca oleh sensor *gyrorate*. Kecepatan motor kanan dan kiri akan dikendalikan dengan kontroler PID agar arah gerakannya sesuai.

Untuk mengetahui kinerja dari sistem kemudi semi otomatis ini dilakukan pengujian dengan variasi gangguan pada roda, sehingga robot akan memiliki kecenderungan untuk berjalan tidak lurus. Variasi dilakukan pada roda kanan dan kiri secara bergantian, serta penggunaan beberapa halangan untuk membuat roda robot selip.

II. METODOLOGI

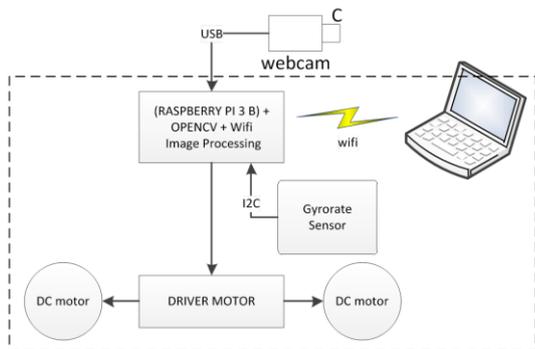
A. Perancangan Sistem

Robot yang digunakan sebagai obyek penelitian adalah robot dengan struktur origami. Robot menggunakan sistem pergerakan diferensial dengan dua roda penggerak. Robot yang digunakan ditampilkan dalam Gambar 1. Badan dan Roda robot keseluruhannya menggunakan struktur origami yang terbuat dari pelat PVC 0.5 mm. Penggerak menggunakan dua mini motor DC dengan spesifikasi yang sama.



Gambar 1. Prototipe robot dengan struktur origami yang digunakan

Sistem keseluruhan terdiri dari beberapa bagian seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Pembahasan difokuskan pada blok diagram sistem yang berada dalam garis putus-putus. Robot menggunakan kontroler utama Raspberry Pi 3 yang dilengkapi dengan library openCV untuk pengolahan citra. Driver motor sebagai pengendali motor, dua motor DC sebagai penggerak. Gyrorate sensor sebagai sensor orientasi robot yang pembacaannya menggunakan komunikasi I2C. Komputer digunakan sebagai display dan bagian pengendali manual. Komunikasi antara komputer dan kontroler robot menggunakan jaringan wifi. Komputer juga digunakan untuk memonitor dan mencatat pergerakan dari robot.



Gambar 2. Blok diagram sistem

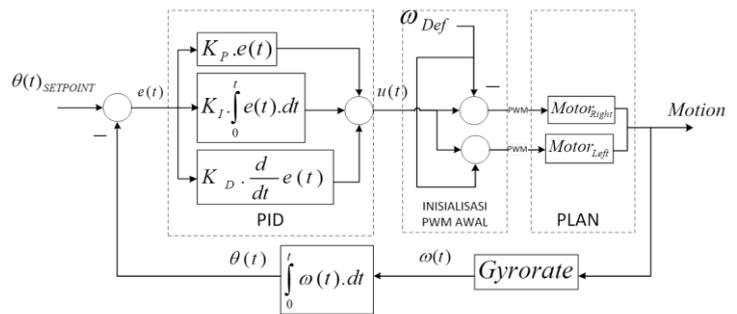
B. Pengaturan Robot secara Open Loop

Pengaturan robot secara *open loop* menggunakan metode *differential steering*. Artinya untuk membuat robot berjalan lurus maka kecepatan motor kanan dan kiri harus sama. Begitu pula untuk kasus belok kanan, belok kiri, mundur, dan sebagainya. Kecepatan motor diasumsikan berbanding lurus dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) yang diberikan oleh *driver* motor. Frekuensi PWM di tentukan 100 Hz dengan lebar pulsa dari 0-100 % dengan resolusi 1%.

Pengaturan robot secara *open loop* dilakukan dengan memberikan nilai PWM yang sudah ditentukan secara pasti. Untuk gerakan maju maka motor kanan maupun motor kiri diberikan perintah maju dengan nilai PWM yang sama yaitu 70%. Untuk mundur, motor kanan dan kiri diberikan perintah mundur dengan PWM konstan 60%. Untuk belok kanan maka motor kanan diberikan perintah mundur dan motor kiri diberikan perintah maju dengan PWM konstan 40%. Untuk belok kiri maka motor kanan diberikan perintah maju dan motor kiri diberikan perintah mundur dengan PWM konstan 40%.

C. Pengaturan Arah Robot secara Close Loop dengan Gyrorate Sensor

Pengaturan robot semi otomatis dilakukan khususnya untuk gerak maju. Sistem gerak diferensial memiliki kelemahan dimana kedua motor harus identik agar gerakannya sesuai. Struktur dan roda robot yang terbuat dari PVC juga menambahkan ketidak presisian gerak. Sifat roda yang lentur dapat meredam benturan berupa impuls akan tetapi mudah terjadi deformasi bentuk. Oleh karena itu data *gyrorate* digunakan untuk mengkompensasi ketidak tepatan gerak.



Gambar 3. Diagram sistem kendali arah gerak dengan umpan balik gyrorate

Untuk melakukan gerak maju lurus maka sudut orientasi dari robot harus selalu nol. Untuk mendapatkan data orientasi robot digunakan sensor *gyrorate*. Gyro memberikan data berupa kecepatan sudut, sehingga untuk mendapatkan nilai sudut perlu dilakukan proses integral satu kali. Persamaan untuk mengkonversi nilai kecepatan sudut (ω) ke sudut (θ) ditampilkan dalam persamaan 1.

$$\theta(t) = \int \omega(t).dt \tag{1}$$

Diagram blok sistem kendali arah gerak robot dengan umpan balik sensor *gyrorate* ditunjukkan dalam Gambar 3. Secara garis bersal terdapat tiga bagian utama yaitu kontroler PID, inialisasi PWM awal (ω_{Def}) dan plan berupa dua motor DC. *Gyrorate* mendeteksi kecepatan sudut dalam tiga axis, X,Y dan Z. Pada sistem ini hanya digunakan satu axis saja yaitu Z. Set point ($\theta(t)_{Set\ Point}$) diberikan nilai nol, kemudian dicari error ($e(t)$) berdasarkan nilai sudut pembacaan dan set point. Setelah diketahui errornya selanjutnya menuju ke kontroler dan menghasilkan sinyal kontrol ($u(t)$). Sinyal kontrol dikombinasikan dengan inialisasi PWM awal (ω_{Def}) untuk diteruskan ke motor kanan dan kiri. Dari motor akhirnya menghasilkan gerakan dari robot.

Kontroller yang digunakan adalah kontroler PID. Dengan persamaan PID yang digunakan seperti dalam Persamaan 2. Dimana $u(t)$ adalah sinyal kontrol yang nilainya merepresentasikan persentase PWM. Secara praktis perhitungan nilai PWM yang diberikan kepada motor kanan dan kiri untuk sistem yang dibangun ditunjukkan dalam Persamaan 3.

$$e(t) = setpoint - \theta(t)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\omega_R = \omega_{Def} - u(t)$$

$$\omega_L = \omega_{Def} + u(t) \quad (3)$$

D. Metode Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan prototipe robot beroda dengan struktur origami. Pengujian sistem dan prototipe dilakukan dengan eksperimen membandingkan sistem gerak *open loop* dengan sistem kendali arah secara *close loop* dengan *gyrorate*.



Gambar 4. Setup roda normal (kiri) dan roda rusak (kanan)

Pengujian dilakukan dengan target adalah berjalan maju lurus. Variasi eksperimen adalah dengan mengubah – ubah roda yang digunakan. Variabel yang diamati adalah penyimpangan sudut dari *set point* dan penyimpangan lintasan. Hasil dari metode *open loop* dengan PWM konstan dibandingkan dengan metode *close loop* dengan pengaturan PWM motor kanan dan kiri otomatis. *Setup* roda ditunjukkan

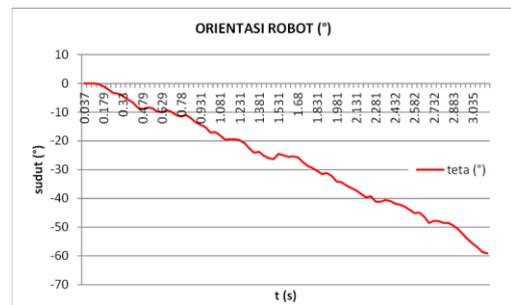
dalam Gambar 4. Roda yang digunakan adalah roda dalam keadaan normal dan roda dalam keadaan mengalami perubahan bentuk atau rusak.

III. HASIL DAN ANALISA

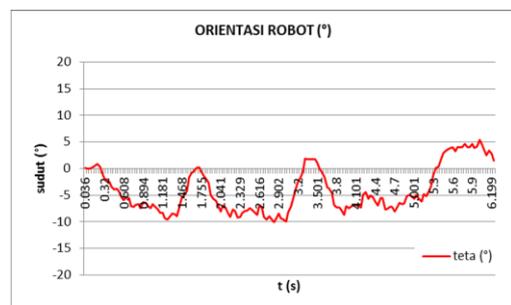
Pengujian dilakukan dengan melakukan perbandingan metode *open loop* dan *close loop* untuk berbagai variasi kondisi roda. Parameter yang diamati adalah orientasi robot, PWM motor dan jalur gerak robot. Untuk setiap pengujian *open loop*, nilai PWM yang diberikan selalu sama yaitu 70% seperti terlihat dalam Gambar 7. Hal ini dilakukan untuk semua variasi kondisi roda yang digunakan.

A. Hasil Pengujian untuk Kedua Kondisi Roda Normal

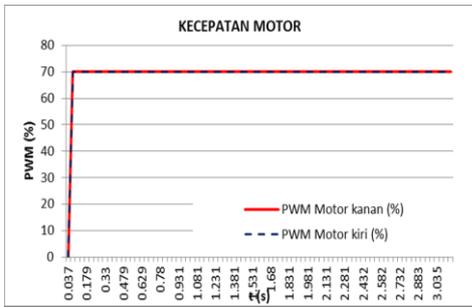
Hasil pengujian sistem dengan kedua kondisi roda normal dengan metode *open loop* dengan memberikan nilai PWM konstan membuat robot cenderung berbelok arah sudut negatif seperti terlihat dalam Gambar 5. Dalam waktu ± 3 detik orientasi sudah berubah menjadi -60° . Arah sudut negatif membuat robot cenderung bergerak ke kiri seperti ditunjukkan dalam Gambar 9. Gambar 10 (a) menunjukkan urutan gerakan robot dengan sistem *open loop*. Penyimpangan jalur yang terjadi dalam waktu tersebut sekitar 60 cm ke kanan. Untuk kedua roda normal idealnya gerakan akan tetap lurus. Hal ini dimungkinkan karena ketidak identikan motor yang digunakan atau roda yang tidak presisi.



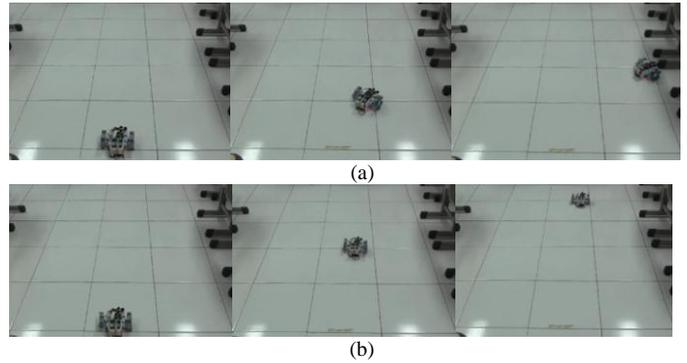
Gambar 5. Grafik Orientasi Robot Saat kondisi Maju dengan Sistem *Open Loop* untuk kedua kondisi roda normal



Gambar 6. Grafik Orientasi Robot Saat kondisi Maju dengan Sistem *Close Loop* untuk kedua kondisi roda normal

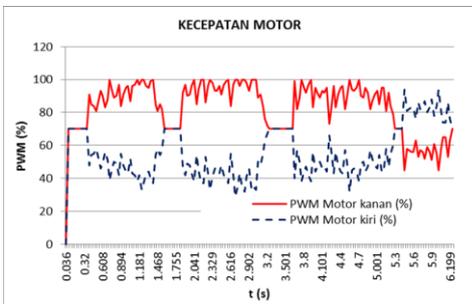


Gambar 7. Grafik PWM Motor Kanan dan Kiri dengan Sistem *Open Loop*

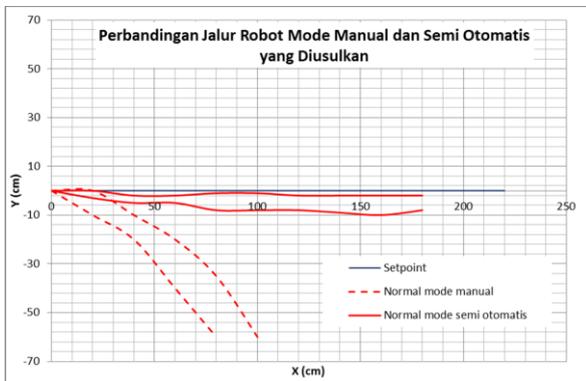


Gambar 10. Urutan Gerak Robot dengan Sistem *Open Loop* (a) dan *Close Loop* (b) untu kedua kondisi roda normal

Pengujian dengan metode yang diusulkan secara *close loop* berbasis *gyrorate* didapatkan hasil yang yang lebih baik. Sistem mengubah nilai dari PWM sesuai dengan orientasi sudut yang dibaca oleh sensor seperti ditunjukkan dalam Gambar 8. Nilai PWM yang diberikan ke motor DC menyesuaikan dengan orientasi robot. Robot berusaha bertahan pada sudut 0° agar dapat bergerak secara lurus. Penyimpangan terbesar adalah $\pm 10^\circ$ dan terus dikoreksi. Dengan metode ini penyimpangan jalur gerak robot yang terjadi tidak terlalu besar seperti ditunjukkan dalam Gambar 9. Dalam waktu $\pm 4,5$ detik penyimpangan jalur kurang lebih 10 cm. Gambar 10(b) menunjukkan urutan gerakan robot dengan sistem *close loop*.



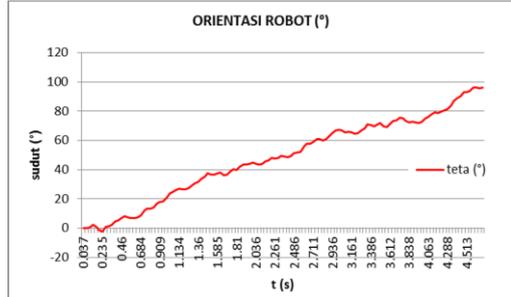
Gambar 8. Grafik PWM Motor Kanan dan Kiri dengan Sistem *Close Loop* untuk kedua kondisi roda normal



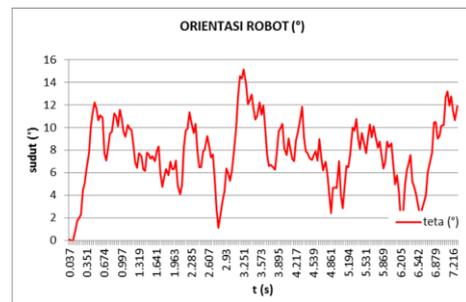
Gambar 9. Grafik Perbandingan Jalur Robot untuk Sistem *Open Loop* dan *Close Loop* untuk kedua kondisi roda normal

B. Hasil Pengujian untuk Roda Kanan Normal dan Roda Kiri Rusak

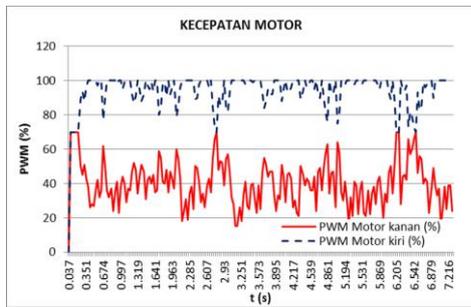
Hasil pengujian sistem dengan kondisi roda kanan normal dan roda kiri rusak menggunakan metode *open loop* dengan memberikan nilai PWM konstan membuat robot cenderung berbelok arah sudut positif seperti terlihat dalam Gambar 11. Dalam waktu $\pm 4,5$ detik orientasi sudah berubah menjadi 100° . Arah sudut positif membuat robot cenderung bergerak ke kiri seperti ditunjukkan dalam Gambar 14. Gambar 15 (a) menunjukkan urutan gerak robot dengan sistem *open loop*. Penyimpangan jalur yang terjadi dalam waktu tersebut sekitar 70 cm sampai dengan 90 cm ke kiri. Untuk kondisi roda tersebut idealnya gerakan akan cenderung bergerak ke kiri. Hal ini terjadi karena diameter roda kiri lebih kecil daripada diameter roda kanan.



Gambar 11. Grafik Orientasi Robot Saat kondisi Maju dengan Sistem *Open Loop* untuk roda kanan normal dan roda kiri rusak

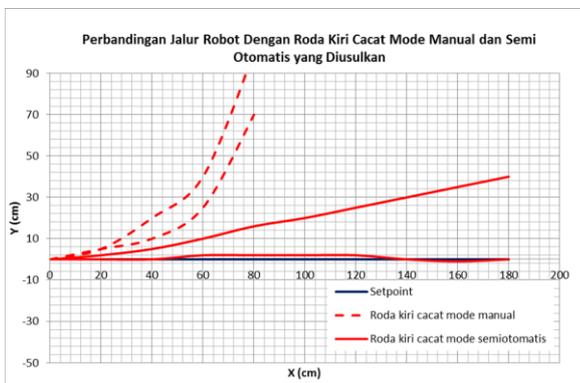


Gambar 12. Grafik Orientasi Robot Saat kondisi Maju dengan Sistem *Close Loop* untuk roda kanan normal dan roda kiri rusak

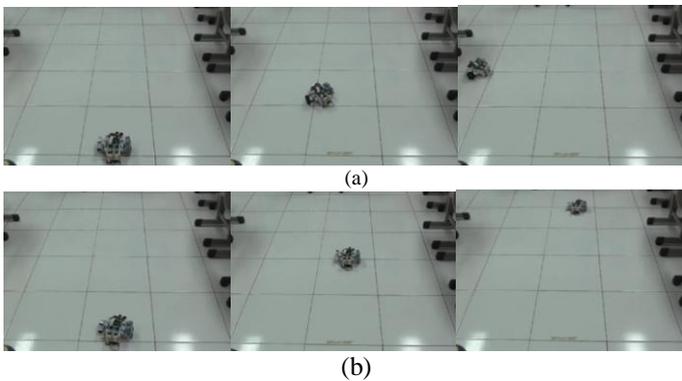


Gambar 13. Grafik PWM Motor Kanan dan Kiri dengan Sistem *Close Loop* untuk roda kanan normal dan roda kiri rusak

Pengujian dengan metode yang diusulkan secara *close loop* berbasis *gyrorate* didapatkan hasil yang lebih baik. Sistem mengubah nilai dari PWM sesuai dengan orientasi sudut yang dibaca oleh sensor seperti ditunjukkan dalam Gambar 12. Robot berusaha bertahan pada arah sudut 0°. Penyimpangan terbesar adalah ± 15° dan terus dikoreksi. Dengan metode ini penyimpangan jalur gerak robot yang terjadi tidak terlalu besar seperti ditunjukkan dalam Gambar 14. Gambar 15 (b) menunjukkan urutan gerak robot dengan sistem *close loop*. Dalam waktu ± 7 detik penyimpangan jalur kurang lebih 0 cm sampai dengan 40 cm.



Gambar 14. Grafik Perbandingan Jalur Robot untuk Sistem *Open Loop* dan *Close Loop* untuk roda kanan normal dan roda kiri rusak

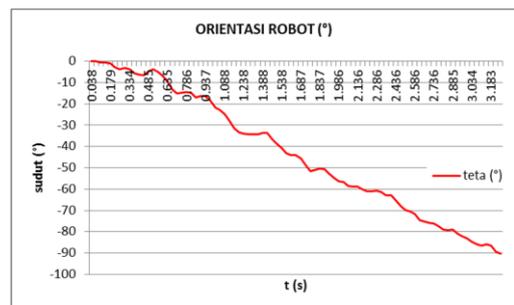


Gambar 15. Urutan Gerak Robot dengan Sistem *Open Loop* (a) dan *Close Loop* (b) untuk roda kanan normal dan roda kiri rusak

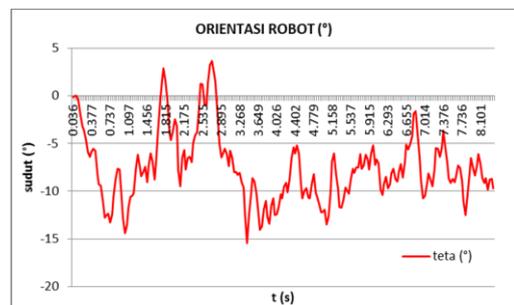
C. Hasil Pengujian untuk Roda Kanan Rusak dan Roda Kiri Normal

Hasil pengujian sistem dengan kondisi roda kanan rusak dan roda kiri normal menggunakan metode *open loop* dengan memberikan nilai PWM konstan membuat robot cenderung berbelok arah sudut negatif seperti terlihat dalam Gambar 16. Dalam waktu ± 3 detik orientasi sudah berubah menjadi -90°. Arah sudur positif membuat robot cenderung bergerak ke kanan seperti ditunjukkan dalam Gambar 19. Gambar 20 (a) menunjukkan urutan gerak robot dengan sistem *open loop*. Penyimpangan jalur yang terjadi dalam waktu tersebut sekitar 60 cm ke kanan. Untuk kondisi roda tersebut memang idealnya gerakan akan cenderung bergerak ke kanan. Hal ini terjadi karena diameter roda kanan lebih kecil daripada diameter roda kiri.

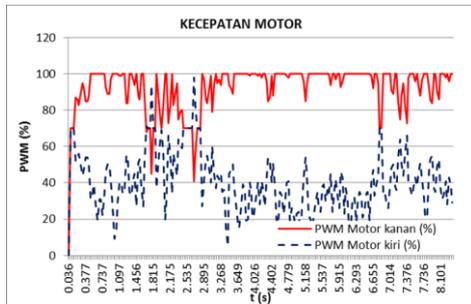
Percobaan untuk sistem *close loop* sedikit dimodifikasi dengan memberikan gangguan berupa penghalang yang dapat membuat selip roda. Pengujian dengan metode yang diusulkan secara *close loop* berbasis *gyrorate* didapatkan hasil yang lebih baik. Sistem mengubah nilai dari PWM sesuai dengan orientasi sudut yang dibaca oleh sensor seperti ditunjukkan dalam Gambar 17. Robot berusaha bertahan pada sudut 0°. Penyimpangan terbesar adalah ± 15° dan terus dikoreksi. Dengan metode ini penyimpangan jalur gerak robot yang terjadi tidak terlalu besar seperti ditunjukkan dalam Gambar 19. Gambar 20 (b) menunjukkan urutan gerak robot dengan sistem *close loop*. Dalam waktu ± 8 detik penyimpangan jalur kurang lebih 8 cm sampai dengan 40 cm.



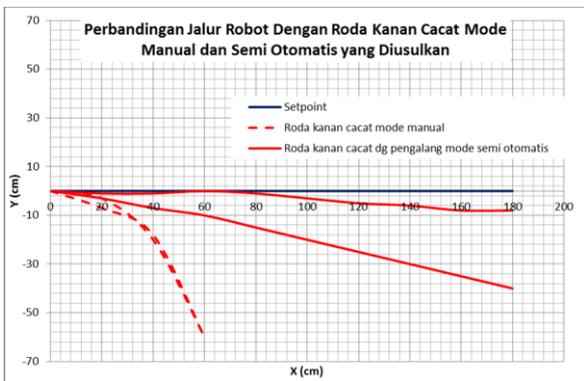
Gambar 16. Grafik Orientasi Robot Saat kondisi Maju dengan Sistem *Open Loop* untuk roda kanan rusak dan roda kiri normal



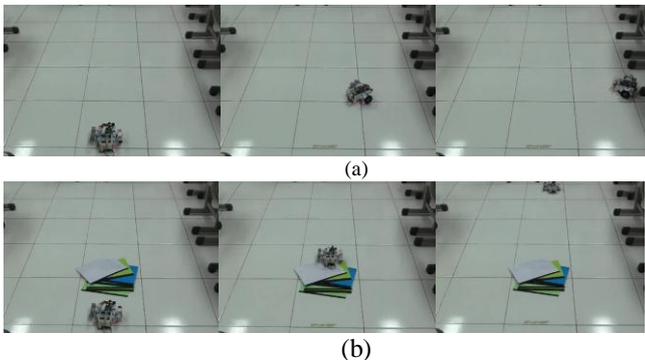
Gambar 17. Grafik Orientasi Robot Saat kondisi Maju dengan Sistem *Close Loop* untuk roda kanan rusak dan roda kiri normal



Gambar 18. Grafik PWM Motor Kanan dan Kiri dengan Sistem Close Loop untuk roda kanan rusak dan roda kiri normal



Gambar 19. Grafik Perbandingan Jalur Robot untuk Sistem Open Loop dan Close Loop untuk roda kanan rusak dan roda kiri normal



Gambar 20. Urutan Gerak Robot dengan Sistem Open Loop (a) dan Close Loop (b) untuk roda kanan rusak dan roda kiri normal

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diketahui bahwa sistem kendali arah robot berbasis gyrorate sensor telah berhasil direalisasikan. Dengan membandingkan dengan sistem open loop konvensional didapatkan bahwa

sistem yang diusulkan dapat memperbaiki jalur gerak robot secara signifikan. Hal ini ditandai dengan konsistensi sistem menghadapi variasi setup roda yang berbeda-beda untuk berjalan lurus. Sistem juga masih baik ketika robot menghadapi halangan yang membuat roda selip. Respon sistem dari hasil percobaan menunjukkan keadaan yang tidak steady state untuk mengatasi hal tersebut perlu dikembangkan sistem kendali yang lebih adaptif. Dengan sistem tersebut memungkinkan nantinya dapat diterapkan pada kendaraan roda empat dalam menghadapi selip roda, yang mana merupakan salah satu penyebab terjadinya kecelakaan ketika pengendara tidak dapat mengendalikan kendaraannya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Politeknik Negeri Madiun yang telah mendanai penelitian ini, serta laboratorium teknik komputer kontrol atas fasilitas yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Paul Jackson, "The Complete Origami Course,". New York: Gallery Books, 1989.
- [2] D.Y.Lee, G.P. Jung, M.K. Sin, S.H. Ahn and K.J. Cho, "Deformable Wheel Robot Based on Origami Structure," in Proc. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Karlsruhe, Germany, 2013. pp. 5613-5617.
- [3] D.Y.Lee, G.P. Jung, M.K. Sin, S.H. Ahn and K.J. Cho, "Fabrication of Origami Wheel using Pattern Embedded Fabric and its Application to a Deformable Mobile Robot," in Proc. 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), 2014. Hong Kong, China. pp. 2565.
- [4] P. Birkmeyer, K. Peterson and R. S. Fearing, "DASH: A Dynamic 16g Hexapedal Robot," in Proc. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. pp. 2683-2689.
- [5] A.O. Pulliny, N.J. Kohut, D. Zarrouk and R. S. Fearing, "Dynamic turning of 13 cm robot comparing tail and differential drive," in Proc. Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, 2012.. pp. 5086-5093.
- [6] A.M. Mehta and D. Rus, "An End-to-End System for Designing Mechanical Structures for Print-and-fold Robots," in Proc 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014. pp. 1460-1465.
- [7] A. M. Mehta, J. DelPreto, B. Shaya, and D. Rus, "Cogeneration of Mechanical, Electrical, and Software Designs for Printable Robots from Structural Specifications," in Proc. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) September 14-18, 2014. Chicago, IL, USA, pp. 2892-2897.
- [8] Hoover and A. Murdock, "Design of Minimally Actuated Legged Milli-Robots Using Compliant Mechanisms and Folding," Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., UC, Berkeley, 2010.