

Rancang Bangun Sistem Informasi Posisi Untuk Robot Beroda Berbasis *Rotary Encoder* dan *GPS Receiver*

Charisma Bathara Dewa¹, Christiand^{1*}, Arka Dwinanda Soewono¹, Marten Darmawan¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
BSD City, Jalan Raya Cisauk, Desa Sampora, Kec. Cisauk, Kab. Tangerang, Banten, 15435

* Email: christiand@atmajaya.ac.id

ABSTRAK

Dalam pengoperasian *mobile robot* (robot beroda), informasi terkait posisi dari sebuah robot yang sedang dioperasikan merupakan hal yang sangat penting. Informasi posisi robot diperlukan untuk menyelesaikan tugas yang telah diberikan kepada robot. Salah satu contoh tugas dari sebuah robot adalah melakukan patroli keamanan pada area terbuka yang telah ditentukan dengan cara berkeliling atau berpindah tempat dari suatu posisi ke posisi lain. Untuk tujuan tersebut, informasi terkait posisi robot bisa didapatkan dari penggunaan beberapa sensor posisi yang diintegrasikan ke dalam sistem robot. Pada kerja penelitian ini telah dikembangkan sebuah sistem informasi posisi yang ditujukan untuk *mobile robot* pada ruang terbuka dengan berbasis sensor *rotary encoder* dan *GPS (Global Positioning System)*. Melalui kerja penelitian ini dapat diketahui bahwa kombinasi sensor *rotary encoder* dengan *GPS* dapat digunakan untuk mendapatkan informasi posisi robot dengan hasil *error* 1,46 m pada arah sumbu x dan 1,54 m pada arah sumbu y untuk sensor *rotary encoder*, sedangkan untuk *GPS receiver error* 1,15 m pada arah sumbu x dan 1,23 m pada arah sumbu y dari koordinat ruang kerja.

Kata Kunci: *Mobile robot*, Posisi, *Rotary encoder*, *GPS*, Patroli keamanan.

ABSTRACT

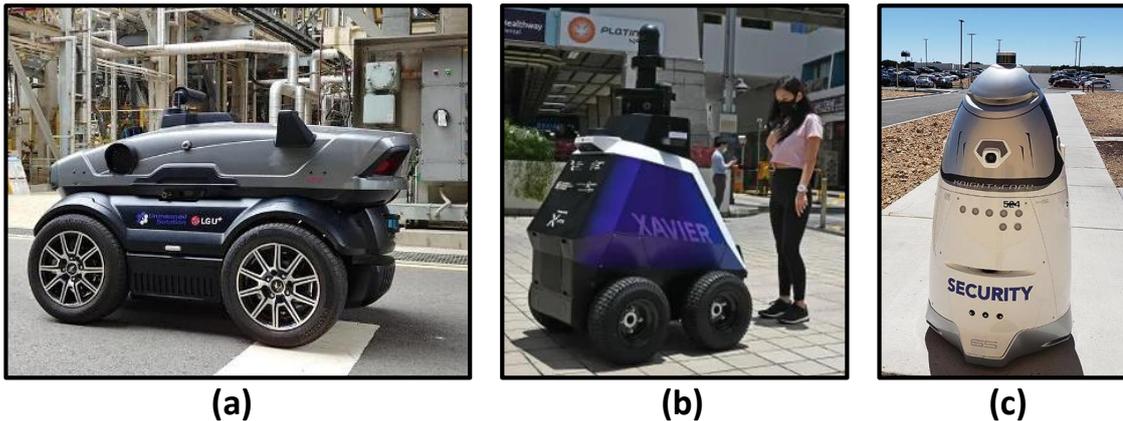
In the mobile robot operation, the information of robot position is an important resource for the robot. The position information supports the robot in finishing the assigned task. Surveillance activities in the open space area is one of the many examples of the robot tasks. In the surveillance task, the robot moves from one position to many positions during the operation. Several positioning sensors can be integrated to the robot system for achieving the reliable position information. In this research work, a positioning module for mobile robot was developed by using the rotary encoder and GPS (Global Positioning System) as the sensors. The result shows that the combination between the rotary encoder and GPS can be used to acquire the robot position information with the rotary encoder error approximately 1.46 m on the x-axis and 1.54 m on the y-axis, while the error of GPS receiver 1.15 on the x-axis and 1.23 m on the y-axis of the working space coordinate.

Keywords: *Mobile robot*, Position, *Rotary encoder*, *GPS*, Surveillance.

1. PENDAHULUAN

Mobile robot membutuhkan informasi terkait posisi dirinya sendiri terhadap lingkungan tempat kerjanya ketika sedang bernavigasi. Lebih daripada itu, dalam operasinya, *mobile robot* menggunakan informasi posisi untuk menandakan lokasi dari kejadian-kejadian penting selama robot tersebut beroperasi di lingkungan

kerjanya. Aplikasi patroli keamanan oleh *mobile robot* merupakan salah satu contoh pentingnya penandaan lokasi kejadian untuk keperluan pelaporan ketika terjadinya gangguan ketertiban di lingkungan (Gambar 1) [1][2][3]. Ketika ada kejadian seseorang yang memarkir kendaraannya di tempat yang tidak semestinya pada area perkantoran atau



Gambar 1. Berbagai robot patroli lingkungan: (a) LGU+ robot [1], (b) Xavier [2], (c) Twin arrows K5 robot [3].

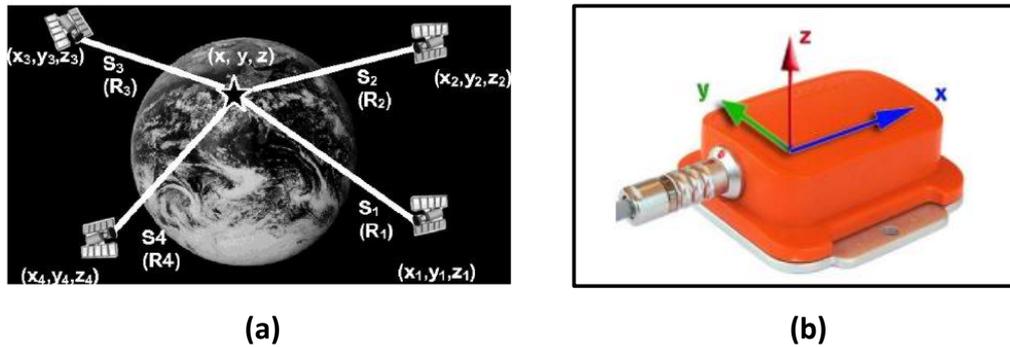
kampus, maka *mobile robot* yang sedang berpatroli perlu melaporkan lokasi titik parkir yang menjadi lokasi pelanggaran tersebut. Untuk mendapatkan informasi terkait posisi dari robot yang dengan akurasi yang baik, maka penggunaan sensor dan berbagai macam sensor posisi diperlukan.

Sebuah sistem pemberi informasi posisi menghasilkan luaran yang berupa informasi mengenai posisi robot pada tiap interval waktu tertentu. Sistem pemberi informasi posisi untuk kendaraan *autonomous* dan *mobile robot* dikategorikan menjadi dua berdasarkan area kerja di mana sistem tersebut dioperasikan, yaitu: penggunaan dalam ruangan (*indoor*) dan luar ruangan (*outdoor*). Sistem informasi posisi yang ditujukan untuk luar ruangan umumnya digunakan untuk *mobile robot* yang tugasnya adalah pemantauan (patroli) keadaan lingkungan maupun transportasi beberapa tempat di luar ruangan. Sistem informasi posisi untuk luar ruangan mengintegrasikan beberapa jenis sensor, diantaranya sensor *rotary encoder* dan GPS (*Global Positioning System*). Pengintegrasian informasi dari sensor-sensor tersebut akan mendapatkan hasil estimasi posisi yang lebih baik ketimbang penggunaan sensor tunggal.

Dalam usaha mewujudkan sebuah proses yang efisien untuk pemantauan keamanan (*surveillance*) di lingkungan kampus, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya telah memulai pengembangan robot *autonomous* yang diharapkan mampu melakukan tugas dalam pemantauan lingkungan (patroli) serta mampu untuk melaporkan kejadian penting tersebut dengan informasi tambahan berupa posisi tempat

terjadinya sebuah kejadian. Pengembangan robot yang dilakukan saat ini difokuskan untuk mencapai sistem navigasi yang memungkinkan robot bergerak secara mandiri pada ruang kerja. Sistem informasi posisi adalah salah satu modul yang diperlukan pada sistem navigasi tersebut.

Menyadari pentingnya sebuah sistem informasi posisi untuk operasional sebuah robot, maka diperlukan sebuah kerja penelitian untuk merancang dan membangun sistem tersebut. Kerja penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan : (a) apakah sensor yang sesuai untuk mendapatkan informasi posisi pada aplikasi luar ruangan? (b) apakah penggunaan sensor lebih dari satu dapat menghasilkan informasi posisi yang lebih akurat? (c) berapakah akurasi dari informasi posisi yang dihasilkan?. Pada artikel ini disampaikan hasil dari pengembangan sistem informasi lokasi berbasis *rotary encoder* dan GPS sebagai kerja awal untuk karakterisasi sensor-sensor yang mungkin digunakan untuk sebuah sistem pemberi informasi posisi tanpa melibatkan teknik integrasi informasi (*sensor fusion*). Pada Bab I dijelaskan latar belakang penelitian seputar sistem informasi posisi beserta kebutuhan aplikasinya. Bab II menjelaskan dasar teknologi sistem informasi posisi. Bab III menjelaskan metodologi penelitian yang dilakukan beserta eksperimen yang dilakukan. Bab IV menyajikan analisis



Gambar 2. (a) Multi-laterasi untuk menghitung posisi GPS receiver [4], (b) *Inertial measurement unit* (IMU) [5].

atas hasil eksperimen yang didapat. Bab V memaparkan kesimpulan.

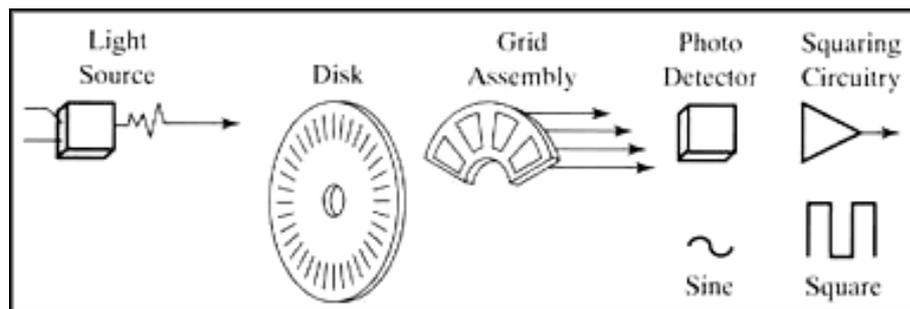
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sensor Posisi untuk *Mobile Robot*

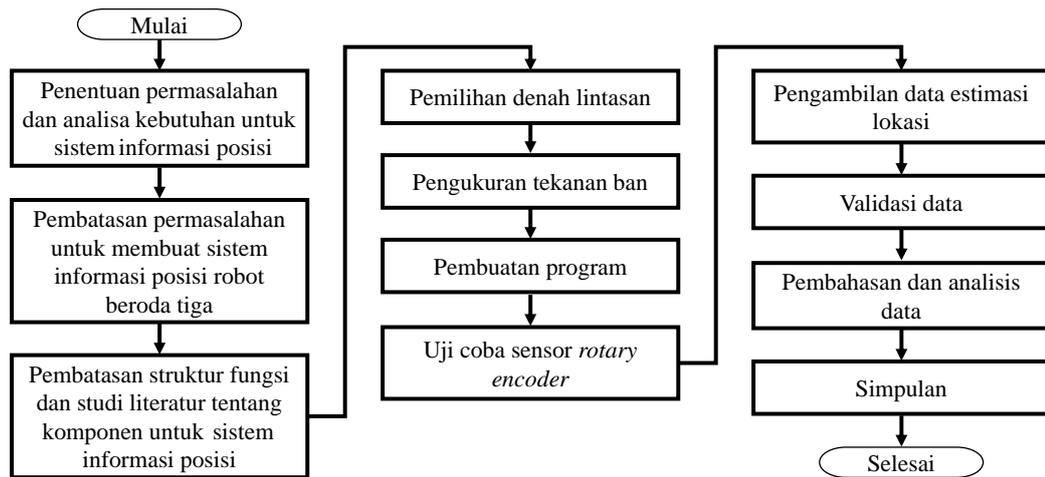
Sensor yang digunakan untuk sistem informasi pada *mobile robot* yang beroperasi pada luar ruangan umumnya menggunakan sensor posisi absolut di mana cakupan dari sensor tersebut jauh lebih besar dari ruang kerja (*workspace*) robot itu sendiri. GPS (dalam hal ini GPS *receiver*) adalah sebuah sensor yang mampu menangkap sinyal dari beberapa satelit sistem GPS yang kemudian dengan menggunakan metoda multi-laterasi maka dapat dihitung posisi dari sensor (*receiver*) tersebut dalam koordinat *geodetic* (Gambar 2.a). Dalam hal tersebut, walaupun posisi GPS dihitung relatif terhadap satelit yang berada di posisi *geo-stationary*, ruang kerja sensor GPS sangat jauh melebihi daripada ruang kerja *mobile robot* pada umumnya sehingga dapat dikatakan GPS merupakan sensor posisi absolut. Hal tersebut membuat GPS digunakan di banyak

pengembangan sistem informasi posisi pada *mobile robot*. Contoh penggunaan GPS sebagai sensor posisi dapat ditemukan pada kerja penelitian [7][8][9].

Sensor lain yang juga umum digunakan untuk mengetahui posisi *mobile robot* adalah IMU (*inertial measurement unit*) dan *rotary encoder*. Kedua sensor tersebut menghasilkan informasi dalam bentuk perubahan posisi dari waktu ke waktu. IMU bekerja berdasarkan percepatan dari sebuah badan terhadap kerangka inersia (*reference frame*), ditunjukkan pada Gambar 2.b. Informasi percepatan (baik itu percepatan sudut ataupun percepatan linear) tersebut diintegrasikan terhadap waktu sehingga menghasilkan sebuah informasi posisi yang terakumulasi. Kekurangan dari sensor yang prinsip perhitungannya berdasarkan integrasi per satuan waktu adalah meningkatnya *error* dengan cepat seiring berjalannya waktu integrasi. Hal tersebut disebut sebagai “*drift*” yang merupakan karakteristik sensor posisi pada kategori ini. Dalam kasus IMU, penambahan *error* yang terakumulasi semakin besar dikarenakan kontribusi *error* tambahan dari gerakan-gerakan minor yang



Gambar 3. Prinsip Kerja *Rotary Encoder* [6].



Gambar 4. Diagram Alir Kerja Penelitian.

tidak diinginkan. Pada *mobile robot*, getaran-getaran selama robot bergerak merupakan hal yang memperbesar *error* pada penggunaan IMU sebagai sensor posisi. Aplikasi dan kajian penggunaan IMU pada *mobile robot* dapat dilihat pada kerja penelitian sebelumnya [10][11][12].

Rotary encoder merupakan sensor lain yang dapat digunakan untuk mendapatkan informasi posisi dengan menggunakan metode integrasi terhadap waktu. *Rotary encoder* mengukur perubahan sudut dari sebuah gerakan rotasi (Gambar 3). *Rotary encoder* dipasang pada roda *mobile robot* untuk pengukuran perubahan sudut yang terjadi pada roda per-satuan waktu, yang kemudian informasi tersebut dikonversi menjadi informasi perubahan posisi robot melalui model kinematika *mobile robot*. Dibandingkan dengan IMU, *rotary encoder* lebih akurat dalam mendeteksi perubahan posisi yang terjadi dikarenakan gerakan-gerakan minor yang tidak diinginkan (misal : getaran kecil ketika robot dalam posisi diam) secara mekanis dapat diredam oleh sifat *damping* dari karet roda sehingga keadaan robot yang dikategorikan sebagai diam (kecepatan sudut maupun badan robot adalah nol) dapat terdeteksi dengan baik. Walaupun begitu, *rotary encoder* juga bisa mengalami *error* yang tidak diinginkan ketika terjadinya *slip* roda. Dalam situasi tersebut, roda dalam keadaan berputar namun secara nyata tidak menghasilkan gerak badan robot misal dikarenakan traksi roda tidak cukup atau roda tidak menapak dengan baik ke permukaan jalan. Dalam situasi tersebut, perubahan posisi

semu dari robot akan terdeteksi dan menghasilkan *error*. Penggunaan *rotary encoder* pada aplikasi sistem informasi *mobile robot* dapat dilihat pada [13][14][15].

3. METODOLOGI PENELITIAN.

Pelaksanaan kerja penelitian terkait pengembangan sistem informasi posisi untuk *mobile robot* patroli digambarkan pada diagram alir pada Gambar 4.

3.1 Pemilihan Denah Lintasan

Kriteria lintasan yang dilewati robot adalah berstruktur baik, berbentuk kotak, dan jauh dari kendaraan lalu-lalang. Lintasan harus berstruktur baik dikarenakan mencegah terjadinya *slip* pada roda, jika terjadi *slip* pada roda akan menimbulkan *error* pada *rotary encoder*. Struktur yang baik yang dimaksud adalah struktur lintasan yang memiliki bentuk geometri lintasan yang mudah untuk dievaluasi serta memiliki permukaan yang cukup untuk traksi roda robot. Bentuk kotak dipilih karena ketika robot tersebut bergerak dari titik *origin* (0,0) dan mengelilingi lintasan yang berbentuk kotak dan kemudian kembali lagi ke titik *origin* (0,0), data posisi yang terkumpul sepanjang lintasan idealnya akan membentuk kotak juga. Sehingga dari bentuk lintasan kotak tersebut keakurasian sistem informasi posisi dapat evaluasi. Lintasan eksperimen yang digunakan adalah parkir mobil Kampus 3 Unika Atma Jaya BSD dengan keliling ± 120 m.



Gambar 5. Pengukuran Tekanan Ban.

3.2 Pengukuran Tekanan Ban

Tekanan ban diperiksa sebelum eksperimen dikarenakan dapat memengaruhi diameter dari ban tersebut (Gambar 5). Kesalahan kecil dalam pengukuran diameter ban akan memengaruhi perhitungan besarnya perpindahan posisi. Di lain sisi tekanan yang tidak sama pada ban kiri dan kanan juga memengaruhi gerak lurus robot, jika salah satu tekanan ban kecil, maka robot tidak dapat bergerak lurus, sehingga *error* yang terjadi semakin besar.

3.3 Uji Coba Konversi Informasi Sensor Rotary Encoder

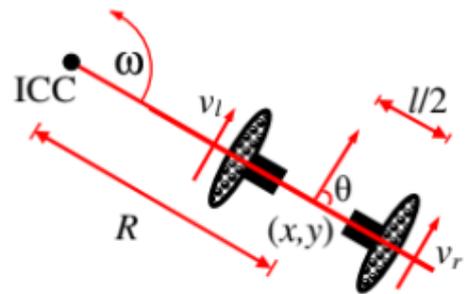
Uji coba konversi informasi dari *rotary encoder* bertujuan untuk memastikan fungsionalitas program yang telah dibuat. Percobaan ini dilakukan dengan cara menjalankan robot dengan kecepatan 0,025 *m/s* secara konstan pada lintasan pendek, selanjutnya diperlambat mencapai kecepatan 0,0125 *m/s*. Pada akhirnya robot tersebut diperlambat sampai robot berhenti. Grafik kecepatan sudut dipastikan sesuai berdasarkan

kesamaan bentuk dari grafik pertambahan *tick* (satuan perubahan *rotary encoder*). Perhitungan di Persamaan 1 dan 2 menunjukkan konversi informasi dari sensor *rotary encoder* ke kecepatan sudut dan linear roda secara berurutan.

$$\omega = \frac{n \cdot 3.6^\circ}{\Delta t} \quad (1)$$

$$v = \omega \cdot r \quad (2)$$

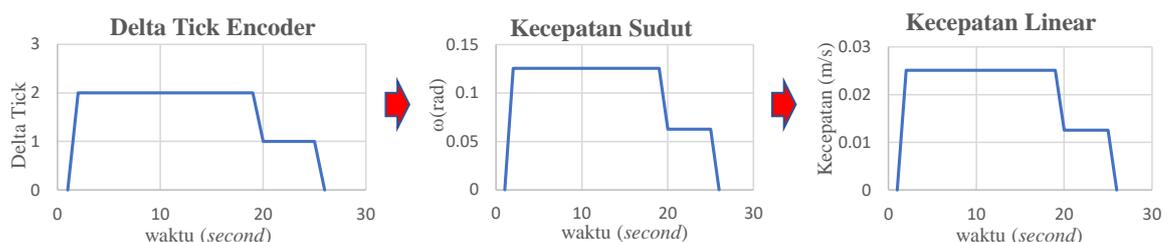
Delta tick encoder (n) menunjukkan jumlah perubahan satuan terkecil sudut yang bisa dideteksi oleh *rotary encoder* yaitu $3,6^\circ$. Satuan waktu *sampling* data dinyatakan oleh



Gambar 7. Kinematika Robot Beroda untuk Menghitung Posisi Robot Berdasarkan Informasi Rotary Encoder [16].

Δt dan jari-jari roda dinyatakan dengan r . Gambar 6 menunjukkan hasil uji coba konversi informasi dari sensor *rotary encoder*.

Gerak robot terhadap suatu titik putar (ICC - *instaneous center of curvature*, Gambar 7) pada tiap waktu t dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4, 5, dan 6. Gerak putar ini merupakan pertambahan



Gambar 6. Uji Coba Konversi Informasi Sensor Rotary Encoder.



Gambar 8. Pengambilan Data Posisi dari Sensor *Rotary Encoder* dan *GPS Receiver*.

posisi $\Delta \mathbf{x}$ dari waktu t ke $t+1$ yang dieksekusi dalam rentang waktu Δt .

$$R = 0.5 \cdot L \left(\frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \right) \quad (4)$$

$$v_{robot} = 0.5(v_R + v_L) \quad (5)$$

$$\omega_{robot} = 0.5 \frac{(v_R + v_L)}{R} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_{t+1} \\ y_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \sin(\theta_{t-1} + \omega_{robot} \Delta t) \\ R \cos(\theta_{t-1} + \omega_{robot} \Delta t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Posisi robot pada kordinat *Cartesian* yang ditulis sebagai titik $\mathbf{p} = (x, y)$ dapat dihitung dengan integrasi terhadap waktu pertambahan posisi yang terjadi dengan menggunakan Persamaan 7.

3.4 Pengambilan Data dari Sensor *Rotary Encoder* dan *GPS Receiver*

Posisi awal robot diberi tanda pada lintasan sebagai tanda awal dan kemudian juga diberikan penanda lokasi akhir robot berhenti. Dikarenakan keakurasian gerak robot harus dipastikan, maka unit *controller* pengendali gerak *autonomous* dimatikan dan robot didorong secara manual agar robot tepat berhenti di tiap-tiap titik acuan pengukuran. Robot didorong setiap 0,5 m untuk pengambilan data. Percobaan ini dilakukan

sebanyak lima kali. Di setiap belokan dari lintasan kecepatan dorong diperlamban supaya mengikuti garis lintasan dengan benar. Pada eksperimen yang dilakukan, gerakan robot yang diujicobakan adalah gerakan maju (*forward motion*) sehingga putaran roda baik kiri maupun kanan adalah di sisi sudut positif dari lingkaran roda. Gambar 8 menunjukkan penandaan lokasi pengambilan data sensor.

4. HASIL DAN ANALISIS

Dari eksperimen yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada bagian ini akan dijelaskan hasil serta analisis posisi yang terekam oleh sensor *rotary encoder* dan *GPS receiver*.

4.1 Hasil

Gambar 9 dan Tabel 1 menunjukkan hasil eksperimen (tiga dari lima eksperimen yang

Tabel 1. *Error* Posisi

No Eksp.	<i>Encoder</i>		GPS	
	X	Y	X	Y
1	1,31	1,39	1,13	1,12
2	1,43	1,54	1,23	1,24
3	1,65	1,71	1,18	1,45
4	1,51	1,57	1,18	1,27
5	1,41	1,48	1,19	1,02
Rata-rata	1,46	1,54	1,15	1,23

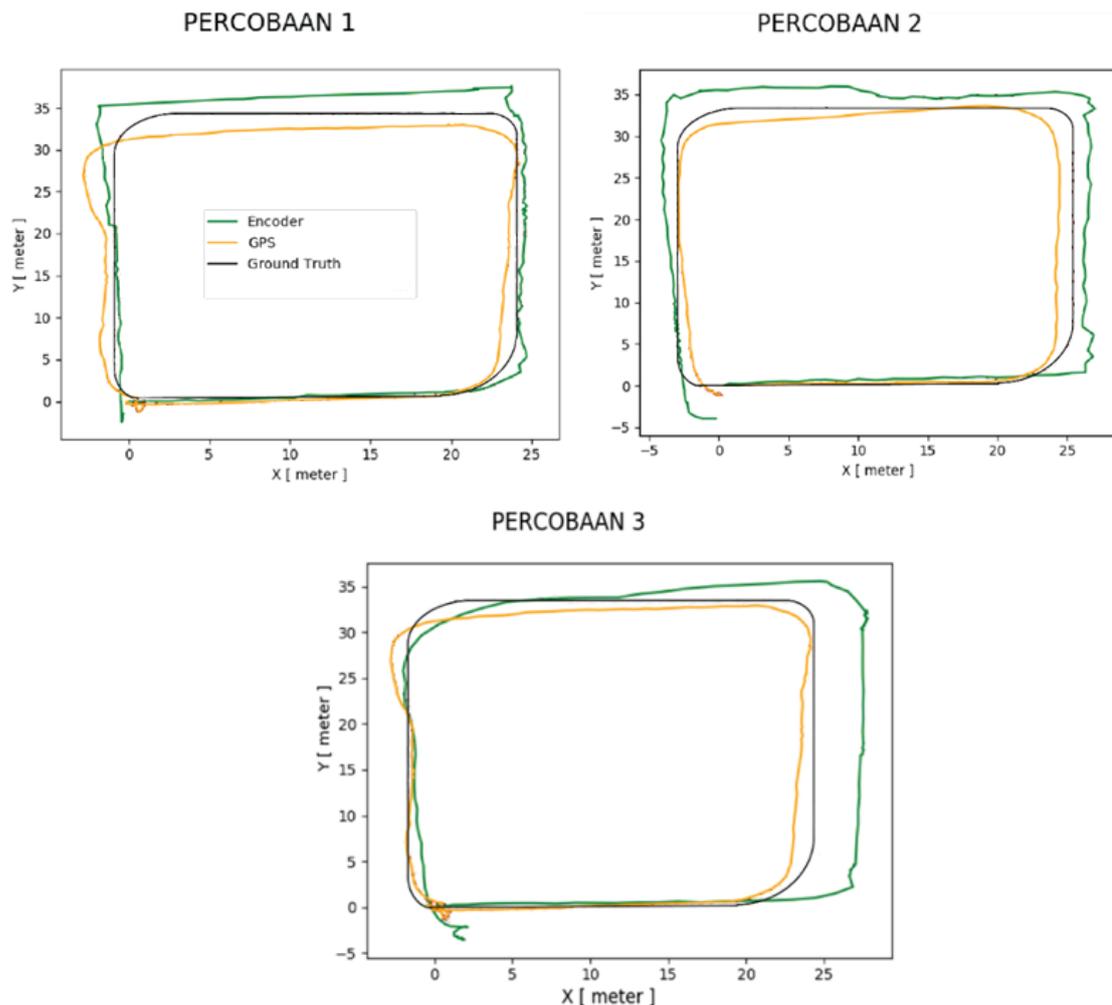
dilakukan) berupa data posisi dari kedua sensor ketika robot mengikuti lintasan yang telah ditentukan. Garis berwarna hijau adalah data posisi yang berasal dari sensor *rotary*

encoder. Garis berwarna kuning adalah data posisi yang berasal dari *GPS receiver*. Lintasan acuan ditunjukkan oleh garis warna hitam yang merupakan gabungan titik-titik yang berjarak 0,5 m membentuk kotak. Gerak robot pada setiap eksperimen dimulai dari titik nol dari koordinat ruang kerja.

Dari kelima data percobaan telah dihitung tingkat keakuratan kedua sensor yang digunakan dalam arah sumbu X dan sumbu Y untuk setiap titik acuan (per 0,5 m). Untuk tiap eksperimen, *error* (galat) rata-rata dihitung berdasarkan rata-rata aritmatika dari kumpulan (*series*) pengukuran *error* pada tiap titik, di mana *error* itu sendiri didefinisikan sebagai jarak *euclidean* dari posisi acuan ke posisi yang diberikan oleh sensor *rotary encoder* dan *GPS*.

4.2 Analisis

Gambar 9 menunjukkan bahwa sensor *rotary encoder* mempunyai nilai *error* yang besar terhadap lintasan acuan (*ground truth*). Hal tersebut dikarenakan *error* dari sensor *rotary encoder* terakumulasi pada saat robot bergerak. Secara khusus, ketika robot bergerak lurus maka tidak terjadi perubahan arah orientasi robot. Walaupun demikian, pada saat eksperimen dapat dipantau bahwa ada kondisi di mana kecepatan roda kiri tidak sama dengan roda kanan, dan hal tersebut juga mengakibatkan arah orientasi yang dibaca oleh sensor *rotary encoder* memiliki gangguan (*noise*). Hal yang dapat diperkirakan sebagai penyebab hal tersebut adalah permukaan jalan yang tidak rata serta *slip* (tidak adanya traksi) yang terjadi pada *belt* dengan *pulley* antara ban dan poros *rotary encoder*.



Gambar 9. Data Posisi dari Sensor *Rotary Encoder* dan *GPS Receiver*.

Pada saat area tikungan, *error* dari *rotary encoder* membesar karena terjadinya perubahan orientasi dan gerak lurus secara bersamaan. Selain daripada itu, *error* yang cenderung besar pada daerah tikungan dikarenakan gerakan *neutral steering* yang menyebabkan kedua roda berputar berlawanan arah (berputar di tempat / *pivot*). Perlu diketahui, besar sudut tikungan pada lintasan acuan adalah 90° . Untuk dapat mengikuti dengan tepat lintasan acuan tersebut, maka robot memang harus berbelok dengan cara *neutral steering*. Akibatnya, karena robot berbelok dengan cara *neutral steering* maka *error* pada kedua roda cenderung berlawanan arah yang menyebabkan *error* pada arah orientasi robot menjadi semakin besar ketimbang pada gerakan lurus. Sedikit *error* pada orientasi robot akan berpengaruh besar pada *error* posisi dalam sumbu X dan Y. Hal tersebut dapat dilihat pada hasil eksperimen di Gambar 8.

Error posisi yang ditunjukkan oleh GPS cenderung sesuai dengan spesifikasi keakuratan yang diberikan oleh pabrik pembuat, yaitu CEP (*Circular Error Probable*) kurang dari 2,5 m [17]. Oleh karena itu, jika rata-rata *error* yang dihitung secara jarak *euclidean* (jari-jari), maka akan bernilai 50% dari 2,5 m ($\sim 1,25$ m). Fenomena membesarnya *error* posisi pada daerah tikungan tidak terjadi pada GPS dikarenakan prinsip perhitungan yang berbeda dengan *rotary encoder*. Hal tersebut merupakan sebuah kelebihan yang nantinya akan saling mengisi dengan informasi posisi oleh *rotary encoder* dalam sebuah kerangka estimasi, seperti: *Kalman Filter* dan *Particle Filter*.

5. SIMPULAN

Dari kerja penelitian yang sudah dilakukan untuk membangun sebuah sistem informasi posisi untuk *mobile robot* patroli dengan menggunakan dua buah sensor yaitu *rotary encoder* dan GPS receiver. Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan :

- Error *rotary encoder* memiliki rata-rata sebesar 1,46 m pada arah sumbu x dan 1,54 m pada arah sumbu y.

- Error GPS receiver memiliki rata-rata sebesar 1,15 m pada arah sumbu x dan 1,23 m pada arah sumbu y.
- Pada daerah tikungan, *error* yang terjadi pada *rotary encoder* cenderung membesar. Namun hal tersebut tidak terjadi pada data posisi dari GPS receiver.

Dengan hasil keakuratan posisi yang telah disampaikan diatas, kedua sensor dapat digunakan sebagai sensor pada sistem informasi posisi untuk *mobile robot* pada aplikasi di luar ruangan. Kerja penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada implementasi kerangka integrasi kedua sensor sehingga estimasi lebih akurat dan bisa mengeksplorasi kelebihan masing-masing sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Park, S.J. (2020), LG Uplus demonstrates 5G-connected autonomous factory monitoring robot, Aju Bussines Daily, Accessed on 4-Oct-2021, url: <https://www.ajudaily.com/view/20200918102823884>.
- [2] Adams, E. (2021), Singapore is testing robots to patrol the streets for undesirable behavior like smoking, USA Today, Accessed on 4-Oct-2021, url: <https://www.usatoday.com/story/tech/news/2021/09/07/robots-now-patrol-streets-singapore-undesirable-behaviors/5753334001>.
- [3] Ritchey, D. (2018), Security Robots on Patrol, Security Magazine, Accessed on 4-Oct-2021, url: <https://www.securitymagazine.com/articles/89471-robots-on-patrol>.
- [4] Kijewski-Correa, T., Kareem, A., & Kochly, M. (2006). Experimental verification and full-scale deployment of global positioning systems to monitor the dynamic response of tall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 132(8), 1242-1253..
- [5] Jimenez, A. R., Seco, F., Prieto, C., & Guevara, J. (2009, August). A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU. In 2009 IEEE

- International Symposium on Intelligent Signal Processing (pp. 37-42). IEEE.
- [6] Ermansyah, S. D., (2016): Implementasi System Voice Recognition dan Rotary Encoder Pada Mobile Robot Sebagai Sistem Navigasi dan Perhitungan Posisi Robot. Skripsi. Program Studi Strata 1 Teknik Elektro. Universitas Jember.
- [7] Reina, G., Vargas, A., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2007, September). Adaptive kalman filtering for gps-based mobile robot localization. In 2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Ohno, K., Tsubouchi, T., Shigematsu, B., & Yuta, S. I. (2004). Differential GPS and odometry-based outdoor navigation of a mobile robot. *Advanced Robotics*, 18(6), 611-635.
- [9] Ross, R., & Hoque, R. (2020). Augmenting GPS with geolocated fiducials to improve accuracy for mobile robot applications. *Applied Sciences*, 10(1), 146.
- [10] Alatise, M. B., & Hancke, G. P. (2017). Pose estimation of a mobile robot based on fusion of IMU data and vision data using an extended Kalman filter. *Sensors*, 17(10), 2164.
- [11] Yi, J., Zhang, J., Song, D., & Jayasuriya, S. (2007, October). IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots. In 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 2845-2850). IEEE.
- [12] Malyavej, V., Kumkeaw, W., & Aorpimai, M. (2013, May). Indoor robot localization by RSSI/IMU sensor fusion. In 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (pp. 1-6). IEEE.
- [13] Park, K., Chung, H., Choi, J., & Lee, J. G. (1997, July). Dead reckoning navigation for an autonomous mobile robot using a differential encoder and a gyroscope. In 1997 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97 (pp. 441-446). IEEE.
- [14] Zunaidi, I., Kato, N., Nomura, Y., & Matsui, H. (2006). Positioning system for 4-wheel mobile robot: encoder, gyro and accelerometer data fusion with error model method. *CMU. Journal*, 5(1), 1.
- [15] Xu, Y., Shmaliy, Y. S., Ma, W., Jiang, X., Shen, T., Bi, S., & Guo, H. (2021). Improving Tightly LiDAR/Compass/Encoder-Integrated Mobile Robot Localization with Uncertain Sampling Period Utilizing EFIR Filter. *Mobile Networks and Applications*, 26(1), 440-448.
- [16] Hellström, T. (2011). Kinematics equations for differential drive and articulated steering. Department of Computing Science, Umeå University.
- [17] Mulberry (2021), BU353S4 BR353S4 GlobalSat G Star IV GPS Receiver, Accessed on 4-Oct-2021, url : <https://www.mulberrytec.com/globalsat-gps-receiver/>