

# Perancangan Low-Cost Testbed Untuk Validasi Lokasi dan Orientasi Mobile Robot

Fakih Irsyadi<sup>1\*</sup>, Jans Hendry<sup>2</sup>, Priyova Muhammad Rafief<sup>3</sup>, Aji Bambang Sasongko<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, D.I. Yogyakarta  
Email: <sup>1\*</sup>fakih.irsyadi@ugm.ac.id

(Naskah masuk: 15 Nov 2023, direvisi: 23 Jan 2024, diterima: 24 Jan 2024)

## Abstrak

Lokalisasi robot adalah proses penentuan lokasi *mobile robot* terhadap lingkungannya. Ini penting untuk pengoperasian robot otonom, karena lokasi robot saat ini akan mempengaruhi keputusan tindakan robot selanjutnya. Pengoperasian di dalam ruangan dan area terbatas membuat lokalisasi robot menjadi lebih menantang, mengingat perangkat *Global Positioning System* (GPS) tidak dapat digunakan, dan masih menarik banyak peneliti hingga saat ini. Makalah ini mengusulkan desain, konstruksi, dan validasi *testbed* robot berbiaya rendah, yang memungkinkan pengukuran lokasi dan orientasi *mobile robot* secara *real time* menggunakan sistem penglihatan atas. Beberapa masalah yang dihadapi dalam desain dan pengembangan seperti pengaturan posisi kamera dan pemilihan pengenalan robot telah berhasil diatasi. Beberapa fungsi pustaka OpenCV diimplementasikan untuk melakukan pengolahan video. Pustaka Tkinter digunakan dalam pengembangan *Graphical User Interface* (GUI) pada penelitian ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi dan orientasi robot baik statis maupun dinamis dengan rata-rata nilai kesalahan kurang dari 3,8 cm pada pengujian statis dan terbukti mampu merekam pergerakan robot baik pada lintasan lurus maupun melingkar. Sehingga *setup testbed* dapat direkomendasikan sebagai solusi cepat dan murah untuk verifikasi dan pengambilan data pada berbagai penelitian yang membutuhkan perekaman lokasi dan orientasi robot baik statis maupun dinamis. Beberapa perbaikan diperlukan untuk menjadikan sistem lebih handal dan akurat.

**Kata Kunci:** *Testbed*, Robotika, Lokalisasi Robot, Pengolahan Citra

## *Low-Cost Testbed Design for Validation of Mobile Robot Location and Orientation*

### Abstract

*Robot localization is the process of determining where a mobile robot is located with respect to its environment. This is important for autonomous robot operation because the robot's current location will influence the robot's next action decision. Indoor and confined area operations make robot localization more challenging, considering that global positioning system (GPS) devices cannot be used, and still attract many researchers today. This paper proposes the design, construction, and validation of a low-cost robotic testbed, which allows for location and orientation measurement of mobile robots in real-time using the overhead vision system. Several problems encountered in the design and development, such as camera position adjustment and robot identifier selection, are successfully addressed. Several functions of the OpenCV library are implemented to do video processing. The Tkinter library is used in Graphical User Interface (GUI) development. The test results show that the system can be used to identify a robot's location and orientation both statically and dynamically, with an average error of less than 3.8 cm in static testing, and is proven to be able to record robot movements in both straight and circular trajectories. Thus, the testbed setup can be recommended as a fast and cheap solution for verification and data retrieval in various research that require recording the location and orientation of robots, both static and dynamic. Several improvements are needed to make the system more reliable and accurate.*

**Keywords:** *Testbed, Robotics, Robot Localization, Image Processing*

## I. PENDAHULUAN

Sejak puluhan tahun yang lalu, perkembangan robot mobil telah memberikan kontribusi yang besar terhadap peningkatan produktifitas pada berbagai bidang, seperti pada manufaktur, pertanian, militer, dan edukasi. Terlebih kondisi pandemi COVID-19 menjadikan tren kenaikan pemanfaatan robot mobil di berbagai bidang khususnya pelayanan kesehatan, keamanan dan industri makanan dimana bergerak menuju pengurangan interaksi manusia ke manusia dan memperbanyak interaksi manusia ke mesin untuk meminimalisir penyebaran virus [1]. Dalam menjalankan misinya, robot mobil biasanya akan dioperasikan secara otonom (*autonomous*), dimana robot mobil dapat menjalankan tugasnya dan beroperasi suatu lingkungan secara mandiri, tanpa kontrol dan intervensi manusia. Robot otonom biasanya bekerja dengan mengikuti tiga langkah, yaitu *perception* (mengambil data dari lingkungan sekitar), *localization* (mengidentifikasi lokasinya sendiri), *navigation* (perencanaan gerakan), dan *movement control* (pengendalian gerak), untuk melakukan tugas yang telah ditentukan [2].

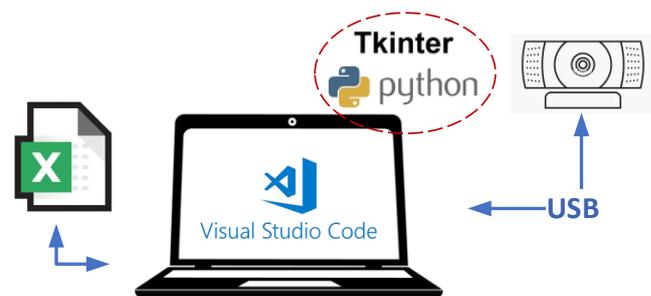
Pada dasarnya, *localization* merupakan salah satu permasalahan yang paling sering diteliti oleh banyak pihak. Tahap ini sangat penting bagi keberhasilan progres navigasi. Dengan informasi lokasi robot yang akurat, maka robot dapat menentukan pergerakan selanjutnya untuk mencapai lokasi tujuan. *Localization* dibagi menjadi 2, yaitu *indoor* dan *outdoor localization*. *Outdoor localization* dapat secara efektif diselesaikan melalui penggunaan modul *Global Positioning System* (GPS). Tetapi, GPS tidak dapat digunakan pada area *indoor*. Sehingga penentuan lokasi robot mobil dilakukan dengan pemasangan sensor baik pada robot, untuk mendapatkan lokasi relatif terhadap obyek lain di sekitar, maupun pada lingkungan, untuk mendapatkan lokasi absolut dari robot [3]. Telah banyak metode yang dikembangkan *indoor localization* ini seperti metode *odometry* [4][5] dan *Radio Frequency Identification* (RFID) [2] dimana proses verifikasi dan pengambilan data penelitian dilakukan secara manual. Pada dasarnya pemanfaatan media pengujian dan verifikasi (*testbed*) sebagai media pengujian dan verifikasi algoritma *indoor localization* telah dilakukan. Penelitian [3][6][7] menggunakan *test bed* berbasis kamera yang dipasang tegak lurus dengan lantai pengujian untuk memverifikasi lokasi robot pada saat penerapan suatu algoritma. Pada makalah ini akan membahas terkait perancangan dan implementasi *testbed* yang dapat digunakan untuk untuk mengidentifikasi lokasi dan orientasi robot serta merekam data pengukuran secara aktual (*real-time*). Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi alternatif solusi, selain simulasi dan pengukuran manual, yang dapat digunakan untuk verifikasi penerapan algoritma robot yang melibatkan pengukuran variabel lokasi dan orientasi robot secara aktual.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Sistem Testbed

Secara umum, *testbed* merupakan suatu konfigurasi perangkat atau sistem yang dapat digunakan untuk mengamati

dan menguji kinerja dari suatu mesin. Saat ini telah banyak penelitian tentang pengembangan sistem *testbed* untuk pengujian diberbagai bidang, selain bidang robotik, pengembangan *testbed* yang dilakukan pada bidang produksi semikonduktor [8] dan energi [9]. Pada penelitian ini, *testbed* dibangun dengan tujuan untuk mengukur lokasi dan orientasi robot yang dijalankan pada suatu arena pengujian dimana nantinya data yang didapatkan dapat digunakan untuk keperluan pengembangan maupun pengukuran keberhasilan suatu algoritma. Sistem *testbed* terdiri dari dua komponen utama, yaitu kamera dan sistem pengolahan citra. Kamera dipasang tegak lurus dengan lantai pengujian dan digunakan untuk mengambil video yang digunakan sebagai masukan sistem pengolahan citra. Sepertihalnya pada penelitian [2], pada penelitian ini digunakan 2 buah kamera yang dipasang secara *parallel* untuk memperlebar jangkauan area pengujian. Algoritma pengolahan citra yang digunakan adalah algoritma deteksi warna dimana sistem dapat mendeteksi dan menentukan koordinat titik tengah dari suatu *object* dengan warna tertentu. Titik koordinat objek selanjutnya akan dipetakan menjadi lokasi robot terhadap area pengujian. Robot diberikan penanda berupa topi dengan 2 warna yang saling kontras yang terinspirasi dari penelitian [10]. Setiap warna akan terdeteksi oleh sistem sebagai suatu obyek yang memiliki titik pusat. Kedua lokasi koordinat titik pusat akan digunakan untuk menentukan orientasi robot. Gambar 1 menunjukkan detail perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dalam sistem.



Gambar 1. Detail Perangkat Penyusun Sistem

Penentuan lokasi dan orientasi robot dilakukan melalui pengolahan citra dari kamera dengan menggunakan beberapa fungsi pustaka *OpenCV* yang dijalankan pada lingkungan pengembangan program *Visual Studio Code* dengan bahasa pemrograman *Python*. Sistem *testbed* juga dilengkapi dengan *Graphical User Interface* (GUI), menggunakan pustaka *Tkinter*, yang berfungsi untuk menampilkan video yang diambil oleh kamera, merekam data lokasi dan orientasi secara aktual, dan menampilkan grafik hasil pembacaan sebelumnya. Seluruh data lokasi dan orientasi robot yang telah direkam selanjutnya disimpan pada file dengan format *Microsoft Excel*. Perancangan fitur-fitur ini diharapkan dapat mempermudah proses verifikasi dan pengambilan data penelitian.

### B. Deteksi Robot

Pada bagian ini akan menjelaskan terkait algoritma yang digunakan untuk pengolahan citra yang digunakan pada

penelitian ini. Pembahasan dibagi menjadi dua bagian, yaitu deteksi lokasi dan deteksi orientasi robot.

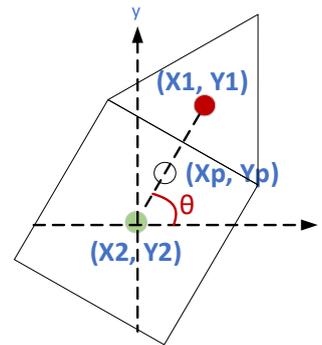
a. Deteksi Lokasi Robot

Pada sistem ini, proses pendeteksian dilakukan berdasarkan pada warna objek yang terlihat oleh kamera. Pada kasus ini, warna bagian robot yang terlihat oleh kamera adalah bagian atasnya. Pendeteksian warna ini dilakukan secara bertahap dengan menggunakan algoritma atau perintah yang ada pada *library* OpenCV di bahasa Python. Gambar 2 merupakan detail mekanisme identifikasi lokasi robot.



Gambar 2. Detail Mekanisme Identifikasi Lokasi Robot

Mekanisme penentuan lokasi robot diawali dengan proses konversi gambar yang diambil ke dalam format HSV agar proses pendeteksian objek atau robot menjadi lebih mudah dan akurat. Pada format HSV terdapat tiga komponen, *Hue*, *Saturation*, dan *Value*, dimana ketiganya memiliki nilai yang berbeda pada setiap warna. Sehingga pendeteksian objek dilakukan dengan mengatur batas nilai ketiga variabel sesuai dengan warna objek yang akan dideteksi. Tahap selanjutnya adalah proses penapisan (*filtering*) yang bertujuan untuk memperjelas hasil citra deteksi yang telah dipisahkan dari proses sebelumnya. Pada penelitian ini, proses penapisan dilakukan dengan cara *thresholding*, dimana semua piksel gambar, yang telah dirubah menjadi format *grayscale*, dengan intensitas di atas ambang batas akan diubah menjadi satu nilai (biasanya putih), sementara yang di bawah ambang batas diubah menjadi nilai lain (biasanya hitam). Selanjutnya dilakukan deteksi kontur dengan menggunakan algoritma atau fungsi *built in* pada *library opencv findContours*. Fungsi ini dapat mendeteksi garis tepi (kontur) pada suatu objek yang diinginkan. Algoritma *bounding rectangle* selanjutnya diterapkan untuk mengukur koordinat posisi pada sumbu kartesian (x dan y) serta mendapatkan nilai panjang dan lebar dari obyek yang terdeteksi. Setelah diketahui titik pusat dari kedua obyek warna, kemudian dapat digunakan untuk menghitung titik pusat dari seluruh objek yang terdeteksi atau robot mobil. Gambar 3 merupakan representasi lokasi dan orientasi robot. Titik pusat dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan 1 dan 2 berikut:



Gambar 3. Representasi Lokasi dan Orientasi Robot

Koordinat  $x_p$ ,

$$x_p = \frac{x_2 + x_1}{2} \tag{1}$$

Koordinat  $y_p$ ,

$$y_p = \frac{y_2 + y_1}{2} \tag{2}$$

sehingga koordinat titik pusat robot yaitu  $(x_p, y_p)$ .

b. Penentuan Orientasi Robot

Alur proses untuk mendapatkan nilai orientasi dari robot merupakan lanjutan dari proses deteksi koordinat robot yaitu dengan menggunakan variabel dari kedua titik pusat objek warna merah dan hijau sehingga kemudian didapatkan nilai sudut orientasi dari robot. Pertama-tama cari nilai  $\Delta x$  dan  $\Delta y$  dari kedua obyek warna menggunakan Persamaan 3 dan 4 berikut:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \tag{3}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 \tag{4}$$

Kemudian variabel tersebut dijadikan nilai radian serta nilai derajat menggunakan Persamaan 5 dan 6 berikut:

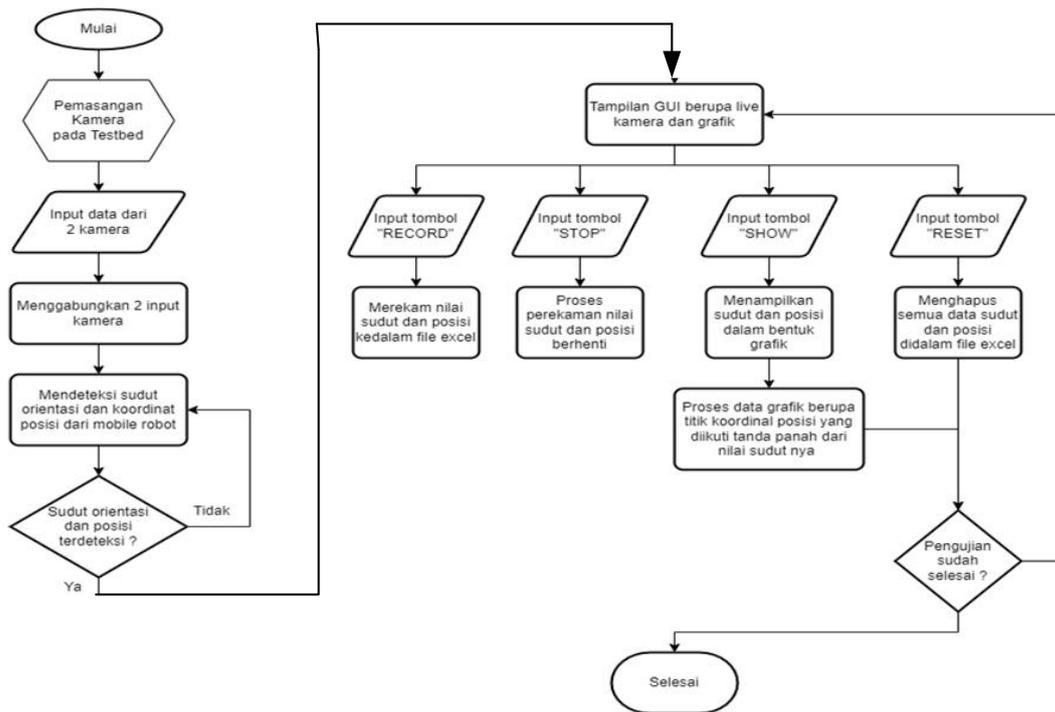
$$\theta_{rad} = \tan^{-1}(\Delta x, \Delta y) \tag{5}$$

$$\theta = \theta_{rad} \times 180/\pi \tag{6}$$

sehingga didapatkan nilai orientasi dari robot mobil.

C. Graphical User Interface (GUI)

*Graphical User Interface* atau GUI yang digunakan pada sistem ini dibuat menggunakan *library* dalam bahasa *Python* yaitu *Tkinter*. GUI dirancang untuk memiliki banyak fitur *monitoring* yaitu *livecam camera*, *button*, serta grafik posisi dari *mobile robot*. Gambar 4 menunjukkan *flowchart* mekanisme kerja GUI.

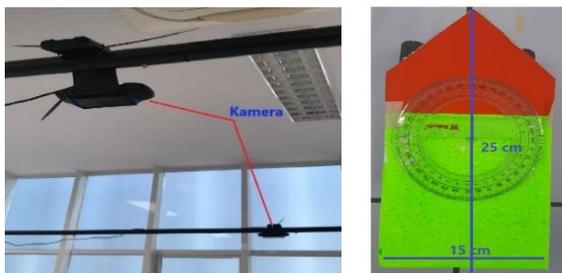
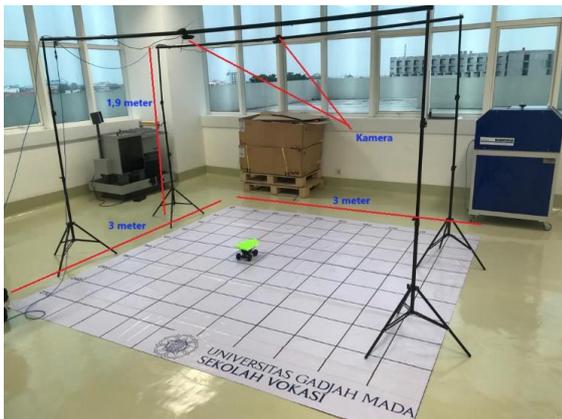


Gambar 4. Flowchart Mekanisme Kerja GUI

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

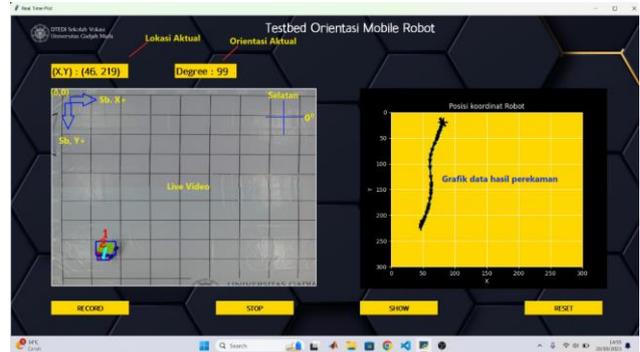
#### A. Realisasi Sistem

Saat ini *setup testbed* telah berhasil dibuat dan dipasang di laboratorium PCB, Gedung TILC SV UGM. Gambar 5 merupakan realisasi sistem. *Tripod* dipilih sebagai tiang agar *setup testbed* lebih *portable*.



Gambar 5. Realisasi Setup Testbed

Seluruh fitur yang telah direncanakan dalam pengembangan GUI berhasil diimplementasikan. GUI dapat menampilkan nilai koordinat lokasi dan orientasi robot secara aktual, merekam data pengukuran dengan format *file Ms. Excel*, melalui button "*record*", dan menampilkan data pengukuran yang telah disimpan kedalam grafik, melalui button "*show*" (Gambar 6).



Gambar 6. Realisasi GUI

#### B. Kalibrasi Sistem

Sebelum dilakukan pengujian, langkah pertama adalah kalibrasi kamera. Tahap ini bertujuan untuk menghitung nilai *pixel-per-matrix* yang nantinya berguna untuk proses penentuan lokasi riil robot berdasarkan koordinat *pixel* citra robot. Secara umum, proses *mapping* akan dilakukan dari ukuran citra hasil penggabungan keluaran kedua kamera, yaitu 640x480 *pixels*, ke arena *testbed* yang tercover, yaitu 300cm x 225cm. Proses pemetaan sangat dipengaruhi oleh jarak antara kamera dengan obyek, dimana untuk *setup*

*testbed* ini, 190 cm. Mekanisme kalibrasi yang dilakukan adalah dengan membandingkan hasil pengukuran riil (menggunakan meteran) terhadap jarak *pixel* yang terukur untuk setiap sumbunya. Dari hasil observasi didapatkan Perasamaan 7 dan 8 pemetaan koordinat ke lokasi riil robot sebagai berikut.

$$x_{real} = 2,71 * x_p \tag{7}$$

$$y_{real} = (1,82 * y_p) - 4 \tag{8}$$

**C. Pengujian Sistem**

Saat pengujian, GUI *testbed* dijalankan pada laptop Acer Aspire A515-45 dengan processor AMD Ryzen 5 5500U with Radeon Graphics (12 CPUs) 2.1 GHz, RAM 8 GB. Kamera yang digunakan adalah Logitech C920 dan C922 HD Stream webcam. Pengujian *setup testbed* dilakukan melalui 2 metode percobaan, yaitu:

a. Pengujian statis

Pengujian statis bertujuan untuk menguji akurasi pengukuran lokasi dan orientasi robot. Pengukuran dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sistem ketika robot diletakkan pada lokasi-lokasi yang sebelumnya telah diukur secara manual dengan orientasi robot yang bervariasi. Hasil pengujian posisi statis disajikan pada Tabel 1. Selisih posisi didapat dari hasil pengurangan antara pengukuran riil dengan hasil pembacaan.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Posisi Statis

Pengukuran		Pembacaan		Selisih		
x(cm)	y(cm)	θ(°)	x(cm)	y(cm)	Δx(cm)	Δy(cm)
86	42	90	85	42	-1	0
127	86	180	124	88	-3	2
171	72	270	171	79	0	7
215	114	0	218	118	3	4
184	142	180	181	145	-3	3
98	142	180	96	146	-2	4
114	186	270	113	193	-1	7
158	198	0	161	202	3	4

Hasil percobaan memperlihatkan bahwa rata-rata error kurang dari 3,8 cm. Salah satu hal yang ikut berkontribusi pada nilai *error* ini adalah *error* pengamatan karena penentuan koordinat riil dilakukan dengan pengukuran secara manual. Hasil lain yang menjadi perhatian bagi peneliti adalah trend nilai *error* yang tinggi ketika *heading* robot bernilai 270° atau searah dengan sumbu y positif. Efek pengabungan kedua *image* secara vertikal, penentuan bentuk identifikasi robot, dan algoritma penentuan titik pusat robot perlu diobservasi kembali meskipun hasil yang didapatkan saat ini memiliki rata-rata *error* yang cukup kecil dibandingkan dengan ukuran *coverage area* dari *testbed*.

Selanjutnya, hasil pengujian orientasi statis disajikan pada Tabel 2. Selisih sudut didapat dari hasil pengurangan antara pengukuran riil dengan hasil pembacaan. Hasil pengujian orientasi menunjukkan hasil yang akurat. Kesalahan pengamatan menjadi salah satu faktor yang dapat

berkontribusi terhadap nilai kesalahan tersebut mengingat pengukuran sudut riil dilakukan secara manual.

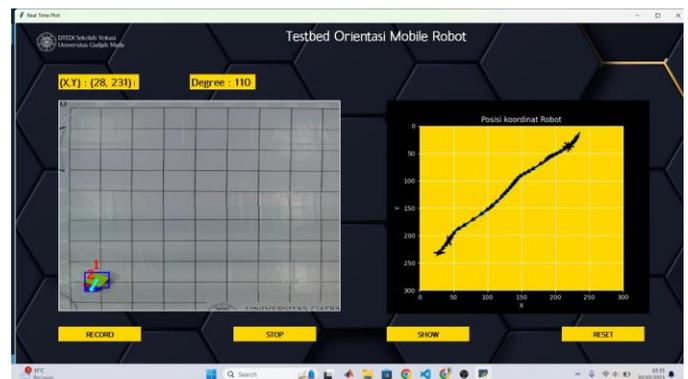
Tabel 2. Hasil Pengukuran Orientasi Statis

Sudut Hasil Pengukuran (°)	Sudut Hasil Pembacaan (°)	Δθ (°)
0	0	0
40	39	1
90	91	-1
132	130	2
180	180	0
211	212	-1
270	270	0

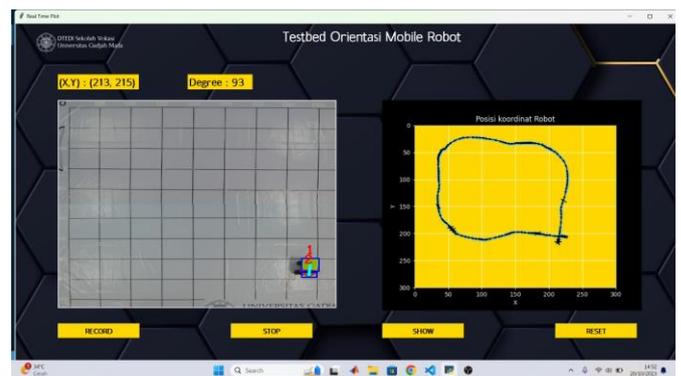
b. Pengujian dinamis

Pengujian dinamis bertujuan untuk menguji kemampuan penjejakan (*tracking*) saat robot bermanuver. Pengujian dilakukan dalam 2 skenario, yaitu untuk lintasan lurus dan lintasan *loop*. Seluruh data pengujian dinamis direkam oleh sistem dalam format *file Ms. Excel*.

Pengujian dinamis dilakukan dengan merekam perubahan posisi dari titik tengah dan orientasi robot yang menggambarkan pergerakan robot untuk pergerakan lurus maupun melingkar. Gambar 7 dan 8 merupakan hasil pengujian dinamis robot dengan lintasan diagonal dan melingkar yang digerakkan secara manual menggunakan perangkat *remote control*.



Gambar 7. Hasil Pengujian Dinamis Dengan Lintasan Diagonal



Gambar 8. Hasil Pengujian Dinamis Lintasan Melingkar

Hasil pengujian dinamis menunjukkan bahwa *setup testbed* dapat merekam pergerakan robot dengan rata-rata kecepatan gerak 0,05 m/s dengan halus dan akurat dengan sampling time data terukur maksimum 40 ms.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengusulkan *setup testbed* yang dapat digunakan untuk mengukur lokasi dan orientasi robot baik statis maupun dinamis. Penggunaan perangkat dengan spesifikasi menengah menjadikan *setup testbed* ini terjangkau untuk diterapkan. *Testbed* yang diusulkan memiliki rata-rata nilai error kurang dari 3,8 cm pada pengujian statis dan terbukti mampu merekam pergerakan robot baik pada lintasan lurus maupun melingkar. Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa *setup testbed* dapat direkomendasikan sebagai solusi cepat dan murah untuk verifikasi dan pengambilan data untuk berbagai penelitian yang membutuhkan perekaman lokasi dan orientasi robot baik statis maupun dinamis. Beberapa perbaikan diperlukan untuk menjadikan sistem lebih handal dan akurat.

#### V. UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian dapat berjalan dengan pendanaan yang bersumber dari Hibah Dana Masyarakat (Damas) Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada tahun anggaran 2023. Penulis juga ingin berterimakasih kepada seluruh tim yang terlibat dalam penelitian ini.

#### REFERENSI

- [1] A. Loganathan and N. S. Ahmad, "A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 40, p. 101343, 2023, doi: 10.1016/j.jestch.2023.101343.
- [2] F. A. X. Da Mota, M. X. Rocha, J. J. P. C. Rodrigues, V. H. C. De Albuquerque, and A. R. De Alexandria, "Localization and navigation for autonomous mobile robots using petri nets in indoor environments," in *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 31665–31676. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2846554.
- [4] S. Adinandra and A. Syarif, "A low cost indoor localization system for mobile robot experimental setup," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1007, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1007/1/012055.
- [5] F. Fahmizal, A. Priyatmoko, E. Apriaskar, and A. Mayub, "Heading Control on Differential Drive Wheeled Mobile Robot with Odometry for Tracking Problem," 2019 Int. Conf. Adv. Mechatronics, Intell. Manuf. Ind. Autom. ICAMIMIA 2019 - Proceeding, pp. 47–52, 2019, doi: 10.1109/ICAMIMIA47173.2019.9223412.
- [6] Y. D. Satriyo, A. Rusdinar, and I. Prasetya Dwi Wibawa, "The position monitoring system of automated guided vehicle (AGV) in the industrial production process," *Proc. 2018 8th Int. Work. Comput. Sci. Eng. WCSE 2018*, no. Wcse, pp. 98–103, 2018, doi: 10.18178/wcse.2018.06.017.
- [7] G. Jácome, M. Sierra and P. J. Cruz, "A Mini-sized Agent Testbed for Applications in Mobile Robotics," 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), Medellin, Colombia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921109.
- [8] D. Kopp, M. Hassoun, A. Kalir and L. Mönch, "SMT2020—A Semiconductor Manufacturing Testbed," in *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 33, no. 4, pp. 522-531, Nov. 2020, doi: 10.1109/TSM.2020.3001933.
- [9] SoetedjoA., LomiA., and PUSPITAB. J., "A Hardware Testbed of Grid-Connected Wind-Solar Power System.", *ijsgset*, vol. 1, no. 2, pp. 52-56, Dec. 2019.
- [10] G. Kiswanto, M. Safhire, R. Afrianto, and R. Nurcahya, "Visual servoing of mobile microrobot with centralized camera," *MATEC Web Conf.*, vol. 153, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1051/matecconf/201815302001.