

Uji Presisi dari *Nonholonomic Mobile Robot* pada Rancang Bangun Sistem Navigasi

Desmas A. Patriawan¹, Bagoes P. Natakusuma¹,
Ahmad A. Arifin¹, Hasan S. Maulana¹, Hery Irawan¹,
dan Bambang Setyono¹

Journal of Mechanical Engineering,
Science, and Innovation
e-ISSN: 2776-3536
2021, Vol. 1, No. 1
ejournal.itats.ac.id/jmesi

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
e-mail: desmas@itats.ac.id

Abstract

Navigation is an important part of vehicle. Global Positioning System (GPS) is most widely used navigation system in vehicles. However, with an accuracy of 5-10 meters, GPS cannot be applied in the control system part of the vehicle. The addition of an inertia measurement unit (IMU) sensor is expected to be able to add accuracy to vehicle movements. The vehicle used is a wheeled robot with a nonholonomic system. On this robot, IMU sensor, GPS and controller are installed so that the robot can rotate and then go straight with the predetermined coordinates. The test results show that the robot has a response time of 4.1 seconds without a controller and 2.1 seconds with a controller. Angle accuracy from 5 ° to 2 °.

Keywords: GPS, IMU, PID, Navigasi dan nonholonomic robotic

Abstrak

Navigasi menjadi bagian yang penting bagi kendaraan. *Global positioning system* (GPS) merupakan sistem navigasi yang paling banyak digunakan pada kendaraan. Namun dengan akurasi 5-10 meter membuat GPS tidak bisa diaplikasikan dalam bagian sistem kendali pada kendaraan. Penambahan sensor *inertia measurement unit* (IMU) diharapkan mampu menambahkan akurasi pada Gerakan kendaraan. Kendaraan yang digunakan adalah robot beroda dengan sistem nonholonomic. Pada robot ini dipasang Sensor IMU, GPS dan kontroler supaya robot tersebut bisa berputar lalu melaju secara lurus dengan kordinat yang sudah ditentukan. Hasil pengujian didapatkan robot memiliki respon time sebesar 4.1 detik tanpa kontroler dan 2.1 detik dengan kontroler. Akurasi sudut dari 5° menjadi 2°.

Kata kunci: GPS, IMU, PID, Navigasi dan nonholonomic robot.

Date received: 30 March 2021; accepted: 27 April 2021

Handling Editor: Naili Saidatin

PENDAHULUAN

Sistem navigasi sudah menjadi bagian penting dari kehidupan manusia modern. Hampir semua manusia di kota besar menggunakan sistem navigasi untuk mengetahui lokasi dari tujuan yang diinginkan. Sebagian besar navigasi menggunakan *global positioning system* (GPS). GPS adalah sistem yang bisa digunakan untuk mendeteksi keberadaan tempat orang atau benda dengan memanfaatkan satelit. Teknologi ini dikembangkan oleh *Department of Defence* (DoD) militer Amerika Serikat dan sukses di komersilkan [1].

Salah satu kelemahan dalam menggunakan GPS adalah tingkat akurasi. Pada awal penggunaan GPS hanya bisa melakukan *tracking* dengan akurasi antara 10-15 meter [2]. Dengan akurasi tersebut perlu dilakukan beberapa teknik untuk memperbaiki akurasi dari GPS. Cara yang cukup murah adalah dengan menggunakan variasi dari Kalman, memanfaatkan Fuzzy logic sebagai filter dan seleksi informasi [3]. Dengan memanfaatkan ketiga metode tersebut akurasi yang awalnya hanya 10-15 meter menjadi ± 1 meter dengan 95% keberhasilan.

Perkembangan tingkat akurasi GPS sudah mulai meningkat, bahkan dengan geodetic GPS akurasi yang didapatkan sampai ± 1 cm [4]. Namun dengan akurasi tersebut hanya berupa data, sehingga perlu sensor tambahan. Sensor ini nanti juga akan digunakan sebagai pengambil data untuk sistem robotic. Sensor yang akan digunakan adalah *inertia measurement unit* (IMU). IMU merupakan sebuah unit sensor dengan menggunakan teknologi *Micro-Electro Mechanical System* (MEMS) yang digunakan untuk pengukuran percepatan linier, percepatan sudut, dan medan magnet lemah seperti MEMS accelerometer, MEMS gyroscope, dan MEMS magnetometer [5]. Dimana dalam hal ini jika ketiga sensor di atas dikombinasikan maka dapat digunakan untuk mengukur perubahan posisi, perubahan heading sistem pada titik acuan tertentu dengan lebih presisi dan akurat.

Pada artikel, sensor IMU digunakan untuk membantu proses sistem navigasi dari mobile robot dengan mendeteksi magnetic heading robot terhadap heading target pada sensor MEMS magnetometer dan, yang selanjutnya diteruskan ke MEMS Gyroscope dan MEMS Accelerometer untuk mendeteksi sudut pada sumbu yaw, pitch, roll pada mobile robot saat melakukan navigasi berjalan lurus maupun manuver. Sensor IMU juga dapat digunakan untuk meminimalisir kesalahan akibat gangguan dari lingkungan dan perangkat sistem mekanik robot yang tidak presisi dari rencana desain yang telah dibuat. Sehingga permasalahan dalam sistem navigasi mobile robot tersebut adalah bagaimana cara membuat robot agar dapat melakukan navigasi sesuai dengan waypoint target yang telah direncanakan dengan mulus (smooth) walaupun terdapat gangguan. Dalam hal ini untuk menunjang hal tersebut selain sensor digunakan pula sistem kontrol PID [6] dan filter kalman dengan sensor IMU sebagai feedback dari sistem tersebut.

METODOLOGI PENELITIAN

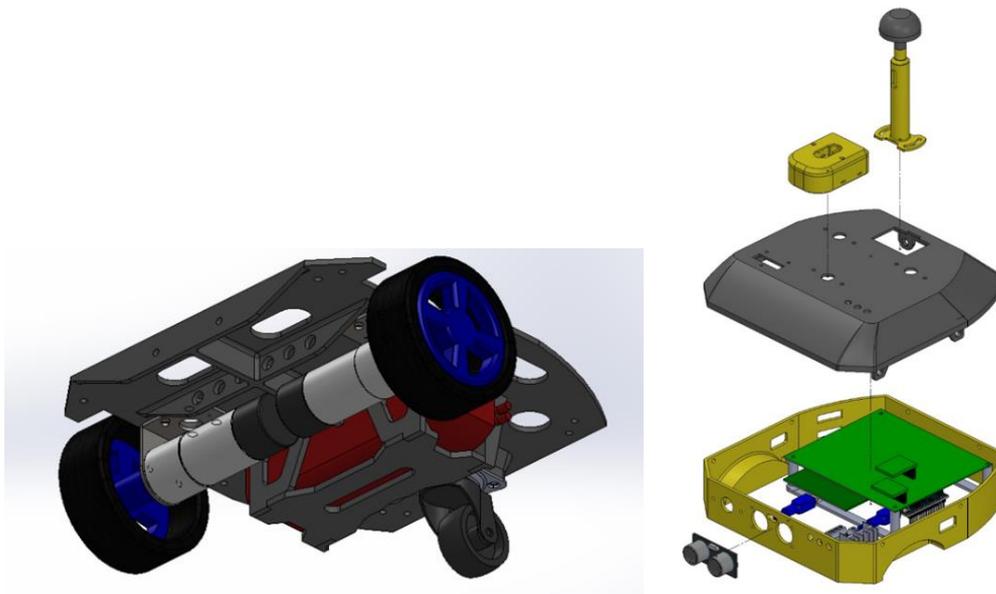
Desain Mekanik Robot

Proses perencanaan mekanik dibagi menjadi dua bagian utama yaitu perencanaan desain frame robot dan perencanaan desain body robot. Pada proses ini perancangan dilakukan dengan menggunakan software CAD SolidWorks. Penggunaan software tersebut didasari dengan berbagai tujuan, antara lain agar didapatkan model CAD 3D atau analisa geometri [7], sehingga dapat meminimalisir terjadinya kesalahan saat assembly antara komponen mekanik maupun dengan board elektronik, agar

didapatkan perkiraan beban dan momen inersia, dan agar dapat dianalisa lebih lanjut sebelum dilakukan penyetakan atau manufaktur.

Pada pembuatan bagian frame terdiri dari modul gearmotor JGA25-370, dan mount gearmotor. Dua faktor utama dalam mendesain frame dari robot adalah dimensi standar dari nonholonomic mobile robot secara geometris dengan gearbox motor dan stress concentration dari bean robot dan penumpunya. Untuk bagian frame ini terbuat dari terbuat dari bahan plastik PLA dengan UTS 59 MPa dan dengan ketebalan tiga mm dan dengan struktur khusus yang mampu menahan beban body di atasnya. Berikut ini adalah gambar tampak isometris dari bagian frame robot. Analisis kekuatan rangka dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam perangkat lunak bisa dengan Solidwork [8] ataupun ANSYS, dengan bantuan software CAE ANSYS terhadap beban body sebesar 1,5 Kg dan didapatkan hasil tegangan maksimum yaitu sebesar 1,7618 MPa yang masih sangat aman dari tegangan maksimum PLA yaitu $59 \text{ MPa} \times (0,5/2,5) = 11,8 \text{ MPa}$.

Pada bagian body robot merupakan tempat dari komponen elektronik seperti mikrokontroller, sensor, dan juga baterai. Faktor utama dalam mendesain body robot adalah mengkonsep peletakan posisi dari sensor terhadap titik pusat geometri body robot, dan juga peletakan posisi shield PCB mikrokontroller. Bagian body ini seluruhnya terbuat dari bahan PLA juga dengan tujuan agar beban robot menjadi ringan dan mudah direvisi jika ada kesalahan, dalam proses manufakturnya seluruhnya menggunakan mesin cetak 3 Dimensi sehingga dapat meningkatkan kepresisian robot dan dapat mendesain sesuai yang diinginkan. Berikut ini gambar tampak samping dan atas body robot. Dari hasil perhitungan didapatkan beban maksimum dari body robot adalah sekitar 1,784 Kg, sehingga perencanaan beban 1,5 Kg aman. Gambar 2 dapat dilihat desain dari rangka dan bodi robot.

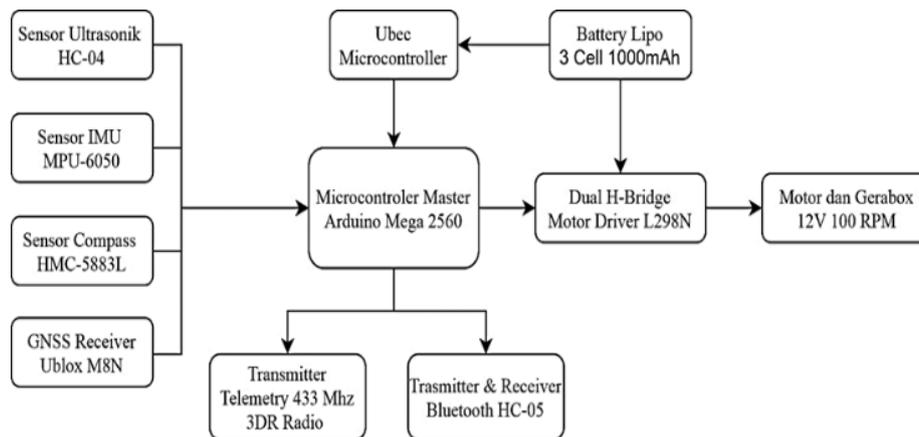


Gambar 1. Desain dari rangka dan bodi robot

Desain Sistem Elektronik Robot

Rangkaian dari Sistem elektronik robot ini terdiri dari komponen modul sensor, modul mikrokontroller, dan aktuator servo. Pada artikel ini modul sensor terdiri dari dua sensor IMU, yaitu sensor IMU Compass HMC5883L dan sensor IMU MPU6050. Pada sensor HMC5883L terdapat sensor magnetometer yang berfungsi untuk mengakses

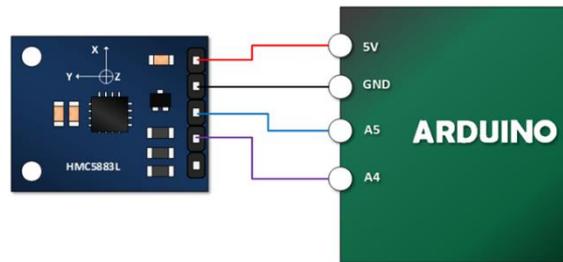
posisi derajat kompas atau heading terhadap sudut bearing tujuan atau setpoint compass dan mengarahkan robot terhadap sudut tujuan tersebut dimana selanjutnya sudut tujuan ini akan dijadikan sebagai setpoint untuk sensor IMU MPU6050. Selanjutnya sensor IMU MPU6050 tersebut berfungsi sebagai sensor feedback untuk kontrol PID pada saat robot melakukan manuver berjalan lurus, dengan menggunakan kombinasi sensor akselerometer dan giroskop pada sensor tersebut. Pada Gambar 2 dapat dilihat diagram sistem elektronik robot.



Gambar 2. Blok diagram sistem elektronik pada robot.

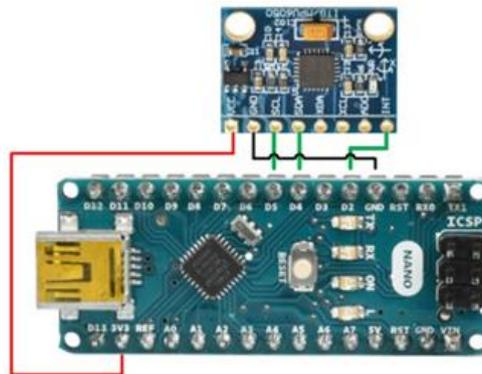
Selanjutnya, modul receiver *global navigation satellite system* (GNSS) berfungsi sebagai penerima posisi keberadaan robot terhadap titik-titik tujuan yang telah di masukan ke dalam program. Pada artikel ini, modul mikrokontroller yang digunakan adalah mikrokontroller Arduino Mega 2560. Mikrokontroller Arduino dengan basis ATmega2560 berfungsi sebagai pengakses kedua sensor IMU dengan komunikasi I2C dan modul receiver GNSS dengan komunikasi serial, dimana data mentah dari sensor dan receiver tersebut selanjutnya di proses hingga menjadi data compass heading, data Yaw Z IMU, dan data latitude longitude. Setelah didapatkan data yang diinginkan maka selanjutnya adalah memprosesnya kedalam kontrol PID dan untuk modul GNSS terdapat filter kalman untuk meminimalisir noise saat menerima sinyal yang kacau. Setelah dilakukan seluruh proses tersebut, selanjutnya adalah mengirimkan sinyal output PWM ke Driver Motor L298N yang selanjutnya dikonversi dan dikirim ke Motor DC. Untuk selanjutnya, pada penelitian ini, aktuator yang digunakan adalah Motor DC JGA25-370 dengan kecepatan sudut maksimum 100 RPM. Motor ini berfungsi untuk menghasilkan gerakan mekanik berupa gerak manuver robot dari sinyal input yang dikirimkan.

Modul sensor GY-273 ini menggunakan chip HMC-5883L dari Bosch yang terdiri dari 2-Axis sensor MEMS magnetometer. Modul ini berguna untuk mengakses arah mata angin atau arah kompas dengan menggunakan kombinasi sensor MEMS magnetometer pada arah x, y, dan z pada sensor untuk megarahkan robot terhadap sudut bearing dan mengaturnya sebagai setpoint compass yang digunakan untuk proses navigasi robot. Pada gambar 3 dapat dilihat *wiring* diagram modul GY-273 dengan Arduino Nano.



Gambar 3. Wiring diagram antara modul GY-273 dengan Arduino Nano.

Modul sensor GY-521 ini adalah modul sensor IMU yang menggunakan unit mikroprosesor MPU6050 yang didalamnya terdiri dari tiga sensor IMU akselerometer dan tiga sensor IMU giroskop. Sensor ini adalah salah satu sensor cerdas karena dapat menyediakan data gerakan yang telah diolah melalui sebuah pemrosesan internal yang lebih dikenal dengan DMP (Digital Motion Processor). Protokol yang digunakan dalam modul sensor ini adalah dengan menggunakan komunikasi I2C. Pada Gambar 4 dapat dilihat *wiring* diagram antara modul GY-521 dengan Arduino Nano.



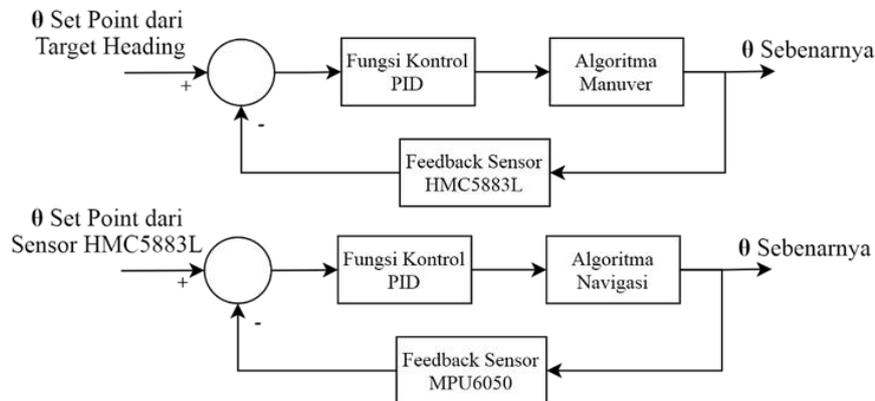
Gambar 4. Wiring diagram modul GY-521 dengan Arduino nano.

Desain Sistem Kontrol

Dalam pengaplikasian sensor IMU pada platform nonholonomic mobile robot ini diperlukan suatu sistem kontrol yang diterapkan pada robot agar dapat bekerja sesuai dengan keinginan. Dalam artikel ini digunakan sistem kontrol PID. Kontroler PID adalah kontroler yang mudah untuk diaplikasikan kedalam perangkat keras. Kontroler PID bisa digunakan untuk melakukan navigasi *waypoint*, melacak *trajectory* dan menghindari tabrakan [9], [10]. Kontroler PID ini akan diaplikasikan dengan sensor IMU MPU6050 dan IMU HMC5883L pada robot tersebut. Tujuan penggunaan sensor IMU dan sistem kontrol PID sendiri sebenarnya adalah untuk memperbaiki navigasi gerak lurus dan manuver pada robot dikarenakan ketidak sempurnaan presisian struktur mekanik robot maupun kondisi lingkungan yang tidak rata, sehingga gerak robot yang ditargetkan lurus menjadi sedikit berbelok.

Kontrol PID digunakan agar mendapat respon yang cepat untuk mencapai keadaan steady state. Berikut pada Gambar 8. adalah blok diagram kontrol PID yang diterapkan pada robot untuk memperbaiki gerak berjalan lurus pada robot. Pengaplikasian sensor IMU dan sistem kontrol PID sendiri sebenarnya adalah untuk memperbaiki gerak berjalan lurus pada robot dikarenakan ketidak sempurnaan struktur mekanik robot maupun lingkungan yang tidak rata, sehingga gerak langkah robot yang ditargetkan lurus menjadi sedikit berbelok-belok.

Kontrol PID digunakan agar mendapat respot yang cepat untuk mencapai keadaan steady state. Berikut pada gambar 3.19 adalah blok diagram kontrol PID yang diterapkan pada robot untuk memperbaiki gerak berjalan lurus maupun manuver pada robot. Gambar diagram PID dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Blok diagram control PID.

Dikarenakan sistem kontrol PID ini diterapkan pada mikro-kontroller yang dimana pengolahan sinyal dilakukan hanya pada waktu diskrit dalam sistem, maka sistem kontrol PID yang digunakan adalah sistem kontrol PID Digital. Dalam hal ini, konversi sinyal dari kontinyu ke digital, pengolahan sinyal error, sampai konversi balik digital ke kontinyu dilakukan pada interval atau waktu sampling tertentu. Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PID dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \dots (1)$$

Untuk bentuk integral dan diferensial dapat ditulis dalam bentuk diskrit sebagai berikut :

$$\int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{k=0}^K e(k)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \quad \dots (2)$$

Sehingga diperoleh dalam bentuk kontroler PID diskrit ialah sebagai berikut :

$$u_{(k)} = K_p \times e_k + K_i \times T \times \sum_0^k e_k + \frac{1}{T} \times K_d \times (e_k - e_{k-1}) \quad \dots (3)$$

Dimana :

- K_p , K_i , K_d adalah parameter kontrol PID
- Sp adalah parameter set point kontrol PID
- θ (theta) adalah sudut aktual posisi derajat yaw
- error adalah nilai kesalahan terbaru
- error_sblm adalah nilai kesalahan sebelumnya
- T_s adalah waktu sampling (waktu cuplik)

Kontroler PID juga perlu mendapat data navigasi yang baik. Salah satu caranya adalah menggunakan filter Kalman. Filter Kalman dapat di aplikasikan pada navigasi GNSS sebagai target *tracking* dan *terrain-referenced navigation* (TRN). Dengan filter Kalman membuat linierisasi model medan dan menangani kemiringan yang efektif secara lokal [11].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi Desain *Nonholonomic Mobile Robot*

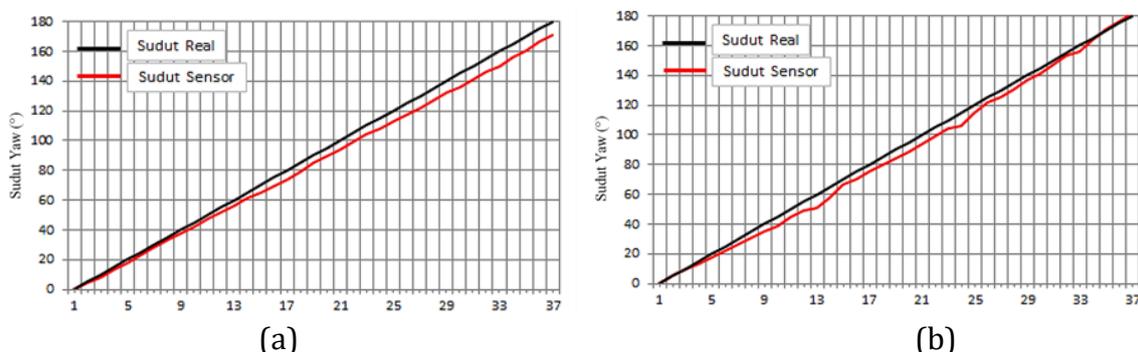
Pembuatan body dan frame robot dalam penelitian ini seluruhnya menggunakan bahan plastik PLA dan dicetak dengan menggunakan mesin printer tiga dimensi. Berikut dibawah ini adalah gambar realisasi dari robot yang telah didesain. Gambar realisasi robot dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 6. Realisasi robot *Nonholonomic*.

Pengujian Karakteristik Sensor IMU

Pada pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik modul sensor IMU dalam pembacaan nilai posisi derajat yaw dan heading terhadap nilai posisi sudut yaw yang sebenarnya dan untuk mendapatkan nilai rata-rata kesalahan. Dalam pengujian ini, alat bantu yang digunakan adalah penggaris busur, dengan ketelitian pembacaan posisi derajat yaw 1 derajat.



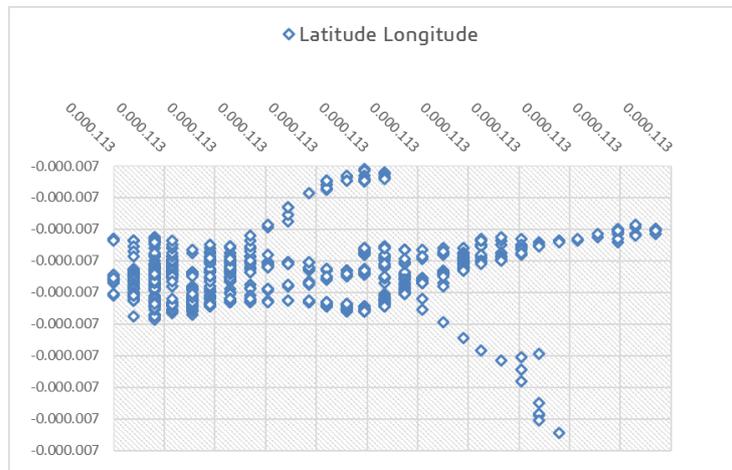
Gambar 7. Perbandingan gerak lurus robot (a) dengan modul MPU6050 dan (b) HMC583L.

Dari hasil yang didapatkan pada Gambar 6 didapatkan bahwa sensor modul HMC583L mendapatkan hasil lebih baik jika dibandingkan dengan MPU6050. Pada

modul MPU6050 mengalami perbedaan sudut 5.514° . Sedangkan pada modul sensor HMC5583L 3.973° . Dari hasil pengujian ini sensor yang digunakan adalah HMC5583L.

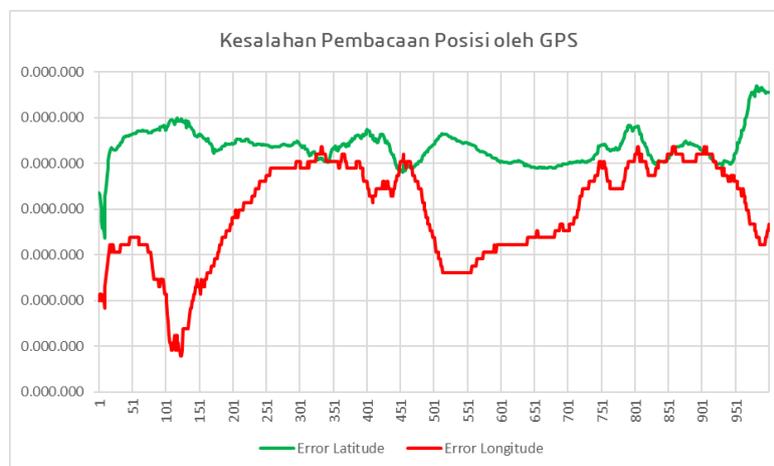
Pengujian Karakteristik dan Filter Kalman pada Receiver GNSS

Pada pengujian ini dilakukan untuk mengetahui besar radius toleransi dari modul receiver GNSS, dengan mengambil sampel data koordinat latitude dan longitude dari satelit GPS dan Glonass. Untuk pengujian ini modul u-blox M8N diatur dengan frekuensi 5 Hz (frekuensi maksimum modul) atau update posisi per 0,2 milidetik dan dengan baudrate 9600 bit/s. Pada saat pembacaan sinyal GPS oleh modul GNSS dapat dilihat pada Gambar 7. Hasil pada Gambar 7 menunjukkan bahwa sinyal GPS yang ditangkap mengalami banyak error, padahal robot tersebut digerakan pada *trajectory* yang lurus.



Gambar 8. Pembacaan sinyal GPS oleh modul GNSS pada saat kendaraan bergerak lurus.

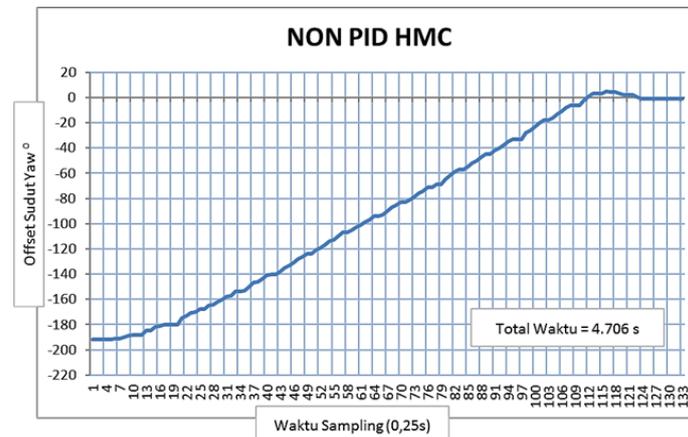
Error saat pembacaan sinyal GPS dapat juga dilihat pada gambar 8. Error yang cukup besar disebabkan oleh kepresisian sinyal GPS yang digunakan. Dalam penelitian ini modul GPS yang digunakan adalah GPS yang memiliki akurasi antara 5-10 meter. Dengan akurasi yang rendah dan kendaraan yang robot yang kecil menyebabkan navigasi memiliki error yang cukup besar. Namun dengan penambahan sensor IMU diharapkan error pembacaan sinyal bisa dikurangi.



Gambar 9. Kesalahan pembacaan sinyal GPS pada robot nonholonomic.

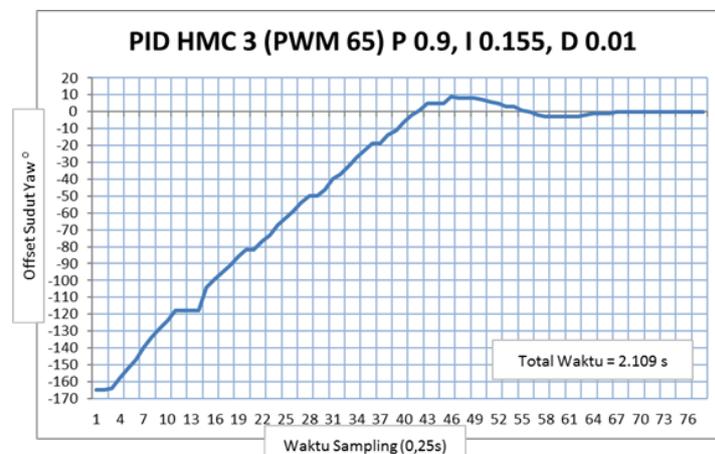
Pengujian Robot Nonholonomic

Pengujian karakteristik IMU dan penangkapan sinyal GPS sudah dilakukan pada pengujian sebelumnya. Pada pengujian kali ini Sensor IMU dan navigasi GPS dipasang pada robot nonholonomic, kemudian robot tersebut harus bisa berputar dan berjalan secara lurus. Pengujian pertama dilakukan tanpa kontroler PID. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 10. Pengujian Robot nonholonomic tanpa kontroler PID.

Dari hasil pada Gambar 9 didapatkan bahwa robot mampu mendapatkan settling time sebesar 4,7 detik. Hasil tersebut cukup jauh jika dibandingkan dengan menggunakan kontroler PID. Gambar 10 dapat dilihat settling time robot yang berputar lalu bergerak sesuai dengan trajectory yang diinginkan sebesar 2,1 detik.



Gambar 11. Respon robot terhadap *settling time* dengan menggunakan kontroler PID.

Dari hasil yang didapatkan pada Gambar 10, menunjukkan bahwa robot mengalami respon yang jauh lebih baik ketika memiliki kontroler PID. Tanpa kontroler PID robot bisa berputar dan bergerak lurus namun waktu yang diperlukan jauh lebih lama jika dibandingkan dengan robot yang menggunakan kontroler PID.

KESIMPULAN

Keakuratan dalam melakukan navigasi dan pergerakan robot nonholonomic tidak bisa didapatkan hanya dengan modul GPS. Dengan tambahan Modul IMU Membuat gerakan robot nonholonomik menjadi lebih akurat jika hanya menggunakan GPS.

Penambahan kontroler PID pada robot dengan nilai $P = 1$, $I = 0.25$ dan $D = 0.001$ didapatkan respon waktu 2.1 detik. Respon waktu ini jauh lebih cepat jika dibandingkan tanpa kontroler dengan respon waktu sebesar 4.1 detik.

DEKLARASI PENULIS

Penulis menyatakan tidak ada potensi konflik kepentingan dengan sehubungan dengan penelitian, kepenulisan, dan / atau publikasi ini artikel.

PENDANAAN

Penulis tidak menerima dukungan finansial untuk penelitian, kepenulisan, dan/atau publikasi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Enge and P. Misra, "Special Issue on Global Positioning System," Proc. IEEE, vol. 87, no. 1, p. 13, 1999.
- [2] L. L. Arnold and P. A. Zandbergen, "Positional accuracy of the Wide Area Augmentation System in consumer-grade GPS units," Comput. Geosci., vol. 37, no. 7, pp. 883–892, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.cageo.2010.12.011.
- [3] N. A. J. Toloza, "Techniques to improve the GPS precision," Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl., vol. 3, p. 6, 2012.
- [4] E. N. Julianto, I. Safrel, and A. Taveriyanto, "High Accuracy Geodetic Control Point Measurement Using GPS Geodetic With Static Methods," J. Tek. Sipil Dan Perenc., vol. 20, no. 2, pp. 81–89, Nov. 2018, doi: 10.15294/jtsp.v20i2.16300.
- [5] P. Lohchab, K. Rangra, and A. Dureja, "MEMS and Study of various Actuators," vol. 03, no. 06, p. 4.
- [6] D. A. Patriawan, B. Pramujati, and H. Nurhadi, "Preliminary Study on Magnetic Levitation Modeling Using PID Control," Appl. Mech. Mater., vol. 493, pp. 517–522, Jan. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.493.517.
- [7] M. Munadi and H. Abdillah, "Pengaruh Resolusi 3D CAD STL Pada Kualitas Geometri dan Dimensi (G&D) Produk Pola Cor 3D Printer," Infotekmesin, vol. 11, no. 2, pp. 130–136, Aug. 2020, doi: 10.35970/infotekmesin.v11i2.225.
- [8] H. Irawan, D. A. Patriawan, M. Munir, and D. Abdillah, "ANALISIS KEKUATAN RANGKA, SISTEM TRANSMISI DAYA DAN KAPASITAS MESIN PENCABUT BULU AYAM 'IDE' 2 IN 1 PORTABEL DENGAN PENYIRAMAN LANGSUNG," vol. 04, no. 02, p. 5, 2019.
- [9] G. M. Qian et al., "Waypoint Navigation of Quad-rotor MAV Using Fuzzy-PID Control," in Intelligent Manufacturing & Mechatronics, M. H. A. Hassan, Ed. Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 271–284.
- [10] J. C. Mohanta, D. R. Parhi, S. R. Mohanty, and A. Keshari, "A Control Scheme for Navigation and Obstacle Avoidance of Autonomous Flying Agent," Arab. J. Sci. Eng., vol. 43, no. 3, pp. 1395–1407, Mar. 2018, doi: 10.1007/s13369-017-2899-y.
- [11] Y. Kim and H. Bang, "Introduction to Kalman Filter and Its Applications," in Introduction and Implementations of the Kalman Filter, F. Govaers, Ed. IntechOpen, 2019.