

Indonesian Journal of Computer Science

ISSN 2302-4364 (*print*) dan 2549-7286 (*online*) Jln. Khatib Sulaiman Dalam, No. 1, Padang, Indonesia, Telp. (0751) 7056199, 7058325 Website: ijcs.stmikindonesia.ac.id | E-mail: ijcs@stmikindonesia.ac.id

Sistem Lokalisasi *Mobile*-Robot Pertanian Otonom Berbasis *Ultra-Wideband* (UWB) dan Sensor Inersia

Nobby Bagus Muliawan¹, Indra Adji Sulistijono²

¹nobby.bm@gmail.com, ²indra@pens.ac.id Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Informasi Artikel	Abstrak
Diterima : 10 Jan 2023 Direview : 14 Jan 2023 Disetujui : 26 Feb 2023	Sistem kendali pergerakan kendaraan pertanian otonom membutuhkan sistem lokalisasi yang akurat. Pada penelitian ini, penentuan posisi robot otonom berbasis DWM1000 dan sensor inersia diusulkan. Algoritma Trilaterasi digunakan untuk mendapatkan posisi berdasarkan 3 titik <i>anchor</i>
Kata Kunci	terhadap robot. Sistem UWB (<i>Ultra-Wideband</i>) menghitung jarak dengan menggunakan TDOA (<i>Time Difference of Arrival</i>) dengan perhitungan SDS-
Lokalisasi, Ultra- Wideband, Kalman-filter, Mobile Robot.	TWR (<i>Symetrical Double Sided-Two Way Ranging</i>) untuk menentukan jarak. Data posisi yang didapatkan kemudian disaring dengan Kalman- <i>filter</i> pada aksis X dan Y. Berdasarkan pengujian <i>experimen</i> sensor UWB pada <i>mobile</i> robot pertanian otonom, didapatkan hasil akurasi yang cukup baik dengan nilai eror simpangan rata-rata sebesar 0,33m.

Keywords	Abstrak		
Localization, Ultra- wideband, Kalman-filter, Mobile Robot.	The movement control system of autonomous agricultural vehicles requires an accurate localization system. In this research, positioning of autonomous robots based on DWM1000 and inertial sensors is proposed. Trilateration algorithm is used to obtain the position based on 3 anchor points towards the robot. The UWB (Ultra-Wideband) system calculates the distance by using TDOA (Time Difference of Arrival) with SDS-TWR (Symmetrical Double Sided-Two Way Ranging) calculation to determine the distance. The position data obtained is then filtered with a Kalman-filter on the X and Y axis. Based on experimental testing of UWB sensors on autonomous agricultural mobile robots, good accuracy results are obtained with a mean deviation error value of 0.33m.		

A. Pendahuluan

Pertanian adalah industri yang vital karena kontribusinya terhadap stabilitas kehidupan masyarakat, pendapatan dan pekerjaan nasional dan sebagai penyedia bahan baku untuk industri lain. Oleh karena itu, sektor pertanian memiliki dampak langsung pada semua segmen masyarakat dengan dimensi ekonomi, sosial dan lingkungannya [1]. Teknologi robotika untuk pertanian akan memainkan peran penting yang tidak dapat disangkal dalam pertanian berkelanjutan di masa depan [2]. Khususnya, dalam dekade terakhir, penggunaan kendaraan otonom dalam pertanian presisi telah semakin diminati. Robot tidak hanya digunakan untuk pemantauan tanaman, seperti inspeksi udara untuk kontrol pertumbuhan, tetapi robot mengambil peran kunci dalam kehidupan harian petani dan produsen [3].

Untuk mencapai otonomi, robot tak berawak dilengkapi dengan sistem lokalisasi atau penentuan posisi yang secara konsisten dan tepat menentukan pose robot, yaitu posisi dan arah, saat melakukan navigasi di seluruh lingkungan [4]. Pengembangan sistem penentuan posisi robot melahirkan berbagai macam metode dan teknik lokalisasi. Pada beberapa referensi seperti penentuan posisi berbasis *multi-*GNSS (*Global Navigation Satellite System*), *dead-recognig* melalui IMU (*Inertial Measurement Unit*), dan pengembangan sistem lokalisasi berbasis fitur 3D kamera [5][6][7]. Lalu pengembangan sistem lokalisasi dengan fusi *odometry* dengan UWB dan penentuan posisi berbasis Lidar *Ranging* [8][9][10].

Kombinasi sensor biasanya diintegrasikan dalam algoritma estimasi keadaan seperti *Particle Filters* (PF) dan *Kalman Filter (KF)* secara linier dan non-linier [11][12], di mana teknik fusi *multi*-sensor tersebut dirancang sambil mempertimbangkan model gerak dan keistimewaan robot. Algoritma fusi sensor yang paling populer adalah pendekatan berbasis *Kalman Filtering*, dan filter berbasis *machine learning* [13][14]. Untuk melokalisasi robot, banyak sensor yang digunakan dan metode fusi telah dikembangkan. Pada penelitian [15][16], menggunakan *Received Signal Strength Indication* (RSSI) dari *Wireless Local Area Network* (WLAN) dan IMU untuk mendapatkan perkiraan kedudukan robot berdasarkan metode EKF (*Extended Kalman Filter*).

Dalam penelitian ini, berfokus pada pengembangan sistem penentuan posisi *mobile* robot pertanian otonom berbasis UWB dan sensor inersia. Algoritma Trilaterasi digunakan untuk mendapatkan posisi berdasarkan 3 titik *anchor* terhadap robot. Sistem UWB (*Ultra-Wideband*) menghitung jarak menggunakan TDOA (*Time Difference Of Arrival*) dengan perhitungan SDS-TWR (*Symetrical Double Sided-Two Way Ranging*) untuk menentukan jarak. Data posisi yang didapatkan kemudian disaring dengan Kalman*-filter* pada aksis X dan Y. Pengujian dilakukan dengan *experimen* langsung pada kendaraan traktor pertanian. Traktor yang digunakan berjenis traktor tangan 2 roda yang menganut sistem setir DDMR (*Differential Drive Mobile Robot*).

B. Metode Yang Diusulkan

Pada penelitian ini alur tahapan penelitian menggunakan metode penelitian pada Gambar 1 sebagai berikut.



Gambar 1. Metode penelitian

Tahap penelitian diawali dengan Perancangan Sistem. kemudian Eksperimen & Pengambilan Data, lalu dilanjutkan dengan Analisa dan Validasi. Perancangan sistem merupakan pembuatan desain sistem hingga implementasinya, serta metode yang digunakan. Pengambilan data menjelaskan tentang bagaimana cara memperoleh data dari sistem yang dikembangkan. Kemudian data hasil pengujian akan dianalisis hasilnya secara menyeluruh dan dilakukan validasi dari data hasil yang diperoleh. Rancangan sistem penentuan posisi dari *mobile* robot pertanian berbasis UWB dan sensor Inersia ditampilkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Metode yang diusulkan

B.1. Differential Drive Mobile Robot

Differential Drive Mobile Robot (DDMR) adalah robot darat berbasis roda dengan dua derajat kebebasan dan dua *actuator*. DDMR terdiri dari dua roda gerak independen pada kiri dan kanan sasis dan roda bebas di belakang atau di depan robot untuk menyeimbangkan keseluruhan struktur robot. Sifat pergerakannya tergantung pada konfigurasi kecepatan pada setiap roda.

DDMR biasanya digunakan pada penelitian aplikasi robotika untuk menguji perbedaan navigasi dan algoritma halangan berdasarkan pergerakannya dan

penerapan mekanik sederhana [17]. Sistem posisi dan orientasi pada DDMR ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Posisi dan Orientasi DDMR

Masalah *kinematik* adalah studi tentang gerak *mobile* robot dan perilaku sistem mekaniknya. Hal ini penting untuk konfigurasi desain robot dan parameter pengontrol. Pada bagian ini, matematika gerak DDMR diturunkan tanpa mempertimbangkan gaya apa pun yang memengaruhi gerakan. Parameter pengendali utama DDMR adalah kecepatan sudut roda kiri dan kanan dan ruang konfigurasinya yang terletak di permukaan dua dimensi [18]. Posisi dan orientasi DDMR digambarkan oleh dua *frame* yang berbeda seperti pada Gambar 3. Di mana *frame* global (x_g, y_g) dan *frame* robot (x_r, y_r). *Frame* pertama dalam koordinat tetap dasar di mana koordinat posisi DDMR adalah (x_g, y_g) dan sudut orientasi DDMR adalah θ_g . *frame* kedua adalah *frame* bergerak yang melekat pada DDMR di mana koordinat posisi DDMR adalah (x_r, y_r) dan orientasi DDMR adalah θ_r . DDMR berbasis roda meliputi poros yang menghubungkan pusat rotasi roda kiri dan kanan yang memiliki panjang L. Arah *heading* DDMR adalah arah x_r . Matriks transformasi digunakan untuk konversi antara *frame* global dan *frame* robot sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_g \\ \dot{y}_g \\ \dot{\theta}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}$$
(1)

Parameter-parameter berikut ini digunakan untuk menurunkan persamaan model kinematik. Di mana ω_r dan ω_l masing-masing adalah kecepatan sudut roda kanan dan kiri. Lalu v_r dan v_l masing-masing adalah kecepatan linier roda kanan dan kiri. v dan ω masing-masing adalah kecepatan linier dan sudut DDMR. Pada sistem tersebut, diasumsikan roda-roda DDMR bergulir dengan kecepatan sudut yang berbeda $\omega_r \neq \omega_l$, setiap roda menyentuh tanah pada satu titik, dan setiap roda bergulir tanpa tergelincir di tanah. Dalam hal ini, kedua roda mengikuti lintasan melingkar dengan titik pusat yang sama yaitu COR (*Center Of Rotation*).

Indonesian Journal of Computer Science

DDMR bergerak dengan kecepatan linier v dan kecepatan sudut ω sepanjang lintasan melingkar dengan jari-jari R di sekitar COR. Di mana R adalah panjang garis yang menghubungkan titik COR dan titik pusat poros roda. Didapatkan kecepatan linier dan sudut ketika DDMR menyelesaikan satu putaran penuh mengelilingi COR selama periode waktu T:

$$v = 2\pi R / T \tag{2}$$

$$\omega = 2\pi / T \tag{3}$$

dari Persamaan (2) dan (3), didapatkan fungsi kecepatan linier DDMR sebagai fungsi kecepatan angular

$$v = \omega R \tag{3}$$

Kecepatan linier dari setiap roda dapat dihitung dengan mengaitkan jari-jari lingkaran lintasan yang sesuai untuk setiap roda dalam Persamaan (4)

$$v_r = \omega(R + l/2) \tag{5}$$

$$v_l = \omega(R - l/2) \tag{6}$$

Kecepatan linier dari setiap roda dapat diwakili oleh kecepatan sudut dan jarijari roda sebagai berikut $vr = \omega_r \times r \operatorname{dan} vl = \omega_l \times r$. Dari Persamaan (5) dan (6) jari-jari lintasan melingkar yang akan diikuti oleh DDMR R seperti pada Persamaan (7). Kecepatan linier dan sudut DDMR diwakili oleh kecepatan sudut kedua roda seperti pada Persamaan (9), sedangkan Persamaan (8) diturunkan dari Persamaan (4), (5) dan (6)

$$R = \frac{rL(\omega_r + \omega_l)}{2(\omega_r - \omega_l)}$$
(7)

$$v = \frac{r}{2}(\omega_r + \omega_l) \tag{8}$$

$$\omega = \frac{r}{L}(\omega_r + \omega_l) \tag{9}$$

Kemudian kecepatan linier DDMR digambarkan dalam rangka robot \dot{x}_r dan arah robot \dot{y}_r . Sesuai asumsi sebelumnya, jika roda bergulir tanpa slip lateral, komponen kecepatan linier dalam \dot{y}_r sama dengan nol dan kecepatan sudut $\omega = \dot{\theta}$

$$v = \dot{x}_r = \frac{r}{2}(\omega_r + \omega_l), \qquad \dot{y}_r = 0$$
 (10)

Komponen kecepatan DMR dalam frame robot dapat ditunjukkan pada Persamaan (11). dengan mensubstitusikan ke dalam Persamaan (1) didapatkan persamaan model kinematik DDMR yang menggambarkan kecepatan DDMR sebagai fungsi dari kecepatan sudut roda kanan dan kiri.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r/2 & r/2 \\ 0 & 0 \\ r/2 & r/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}$$
(11)
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_g \\ \dot{y}_g \\ \dot{\theta}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\cos\theta & \frac{r}{2}\cos\theta \\ \frac{r}{2}\sin\theta & \frac{r}{2}\sin\theta \\ \frac{r}{2}\sin\theta & \frac{r}{2}\sin\theta \\ \frac{r}{L} & \frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix}$$
(12)

Persamaan (12) digunakan untuk mensimulasikan model DDMR secara terprogram dan untuk mendapatkan posisi dan lintasan yang diikuti model dengan menghitung posisi barunya $x_g(t + \Delta t)$, $y_g(t + \Delta t)$ dan orientasi $\theta_g(t + \Delta t)$ untuk setiap iterasi simulasi dengan pertambahan waktu Δt :

$$x_g(t + \Delta t) = x_g(t) + \dot{x}_g \tag{13}$$

$$y_g(t + \Delta t) = y_g(t) + \dot{y}_g \tag{14}$$

$$\theta_g(t + \Delta t) = \theta_g(t) + \dot{\theta}_g \tag{15}$$

B.2. Sensor *Ultra-WideBand* (UWB) DWM1000

Penentuan posisi dilakukan dengan menghitung posisi robot terhadap bumi layaknya sistem kerja dari Satelit GPS. Sensor pada robot akan menghitung jarak terhadap 3 posisi jangkar yang terpasang. Dari jarak tersebut akan dikonversi menjadi posisi menggunakan metode Trilaterasi. Rancangan modul DWM1000 dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Modul DWM1000 terintegrasi dengan kontroler

Modul DWM1000 berupa rangkaian Sensor UWB terintegrasi dengan Kontroler. Keluaran dari modul ini bisa berupa jarak atau posisi. Untuk menghitung jarak antar setiap perangkat acuan terhadap objek dengan menggunakan estimasi *Time of Flight* (ToF). Modul DWM100 akan menghitung waktu tunda komunikasi antara *transceiver* dan transponder. Penundaan waktu tersebut kemudian dikalikan dengan kecepatan cahaya (c) sebesar 299.729.458 m/s dan dibagi dua, maka didapatkan jarak obyek yang dicari [19]. Secara matematis, untuk menghitung waktu antara *transceiver* dan transponder dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{16}$$

di mana t₁ adalah waktu data karakter dikirim sedangkan t₂ adalah waktu data karakter diterima. Teknik pengukuran jarak menggunakan ToF menawarkan tingkat resolusi sampai dengan centimeter dibandingkan dengan menggunakan *Receive Signal Strength Indicator* (RSSI), karena pengukuran jarak menggunakan ToF lebih tahan terhadap gangguan sinyal yang lain.

B.3. Pengukuran Jarak Dengan Algoritma SDS-TWR

Pengukuran jarak dengan menggunakan algoritma SDS-TWR (*Symetrical Double Sided-Two Way Ranging*) dengan skema pengukuran jarak seperti Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Skema perhitungan jarak dengan algoritma SDS-TWR

*T*_{round1}, *T*_{round2}, *T*_{reply1}, *T*_{reply2} merupakan durasi waktu pengiriman dan penerimaan komunikasi antara *tag* dengan *anchor*. Perhitungan jarak menggunakan algoritma SDS-TWR menghasilkan eror yang lebih kecil. Persamaan dari pengukuran jarak dengan algoritma SDS-TWR adalah sebagai berikut:

$$T_{prop} = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}}$$
(17)

Algoritma TWR jenis ini mengatasi permasalahan T_{reply1} dan T_{reply2} yang harus bernilai sama, memungkinkan hasil yang lebih baik dan eror yang lebih kecil [20].

B.4. Perhitungan Posisi dengan Metode Trilaterasi

Persamaan Trilaterasi merupakan persamaan yang digunakan untuk mencari koordinat sebuah titik referensi berdasarkan jarak titik tersebut ke 3 titik *anchor*. Di mana koordinat titik *anchor* sudah diketahui atau didefinisikan. Sistem ini diilustrasikan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Ilustrasi model persamaan Trilaterasi

Dengan menggunakan persamaan matematis dari model tersebut didapatkan persamaan matematis dari garis r_1 , r_2 , dan r_3 sebagai berikut:

$$r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}$$
(18)

$$r_2 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}$$
(19)

$$r_3 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}$$
(20)

dari ketiga persamaan tersebut didapatkan persamaan yang menunjukkan perpotongan dari ketiganya. Di mana titik perpotongan merepresentasikan posisi koordinat yang diinginkan (x, y) [20]. Koordinat tersebut ditunjukkan dalam Persamaan (21) dan Persamaan (22) berikut:

$$x = \frac{\begin{pmatrix} (r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2) \times (2(y_3 - y_2)) \\ -(r_2^2 - r_3^2 + x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2) \times (2(y_2 - y_1)) \end{pmatrix}}{(2(x_2 - x_3)) \times (2(y_2 - y_1)) - (2(x_1 - x_2)) \times (2(y_3 - y_2))}$$
(21)

$$y = \frac{(r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2) + (2x(x_1 - x_2))}{2(y_2 - y_1)}$$
(22)

Indonesian Journal of Computer Science

B.5. Pengaturan Posisi Anchor

Posisi ketiga *anchor* perlu didefinisikan di dalam peta. Posisi penempatan *anchor* yang baik berbentuk segitiga di mana objek berada di tengah *anchor* tersebut. Penempatan yang baik dapat dilihat pada Gambar 7. Posisi *anchor* A1 berada di koordinat (0, b) lalu A2 (a,0) dan A3 (2a, 2b). *Anchor* A3 diletakkan pada ujung area jangkauan yang berbentuk persegi sehingga memudahkan dalam instalasi. Jarak jangkauan teruji dari DWM1000 kurang dari 25m, maka rekomendasi jarak sisi persegi kurang dari 17,6m (jarak sudut ke sudut = 25).



Gambar 7. Penempatan posisi anchor DWM1000

B.6. Kalman Filter Dua Dimensi

Kalman Filter digunakan untuk menyaring data agar didapat nilai yang lebih halus dan mendekati kondisi nyata [21]. Pada parameter posisi terdapat dua variabel yaitu x dan y. Oleh karena itu formula Kalman Filter juga digunakan untuk masing-masing variabel tersebut. Untuk menghitung nilai Kalman Gain dari aksis X (KGx), dan Kalman Gain untuk aksis Y (KGr) menggunakan persamaan berikut ini:

$$KG_X = \frac{E_{EST_X}}{E_{EST_x} + E_{MEA}}$$
(23)

$$KG_Y = \frac{E_{EST_Y}}{E_{EST_Y} + E_{MEA}}$$
(24)

Lalu untuk menghitung nilai estimasi terkini pada aksis X (EST_{Xt}) dan nilai estimasi terkini pada aksis Y (EST_{Yt}) menggunakan persamaan:

$$EST_{X_t} = EST_{X_{t-1}} + KG_X[MEA - EST_{X_{t-1}}]$$
(25)

$$EST_{Y_t} = EST_{Y_{t-1}} + KG_Y [MEA - EST_{Y_{t-1}}]$$
(26)

Selanjutnya untuk menghitung eror estimasi terkini pada aksis X (E_{EST_Xt}) dan eror estimasi terkini pada aksis Y (E_{EST_Yt}) dengan persamaan:

$$E_{EST_Xt} = [1 - KG_X]E_{EST_Xt-1}$$
(27)

$$E_{EST_Yt} = [1 - KG_Y]E_{EST_Yt-1}$$
(28)

di mana,

KG _X	: Kalman Gain aksis X
KGy	: Kalman Gain aksis Y
EST_X_t	: Estimasi aksis X terkini
EST_Y_t	: Estimasi aksis Y terkini
EST_X_{t-1}	: Estimasi aksis X sebelumnya
EST_Y_{t-1}	: Estimasi aksis Y sebelumnya
Eest-xt	: Eror estimasi aksis X terkini
E_{EST-Yt}	: Eror estimasi aksis Y terkini
Eest-xt-1	: Eror estimasi aksis X sebelumnya
$E^{EST-Yt-1}$: Eror estimasi aksis Y sebelumnya
Емеа	: Nilai eror pengukuran yang ditentukan
MEA	: Nilai posisi (Trilaterasi sensor DWM1000)

Dalam penerapan *filter*, beberapa variabel perlu didefinisikan. Adapun parameter awal yang perlu didefinisikan yaitu: inisial estimasi aksis sebelumnya (EST_{Xt-1} dan EST_{Yt-1}), inisial eror estimasi aksis ($EEST_{Xt-1}$ dan $EEST_{Yt-1}$), dan inisial eror pengukuran (E_{MEA}).

B.7. Skenario Pengujian

Pada Pengujian Penentuan posisi dilakukan di bidang datar berupa lapangan dengan area aktif sensor seluas 16x16 meter (berdasarkan penempatan *anchor*). Adapun spesifikasi sistem *hardware* yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1 di bawah ini.

	Tabel 1. Spesifikasi perangkat pengujian				
No	o Nama Keterangan				
1	Modul DWM1000	1 <i>tag</i> , 3 <i>anchor</i> , kecepatan rotasi data 20Hz			
2	IMU BNO055	Kecepatan absolute orientation (Quaterion, 100Hz)			
3	Transmisi data	NRF24L01, Kecepatan Transmisi 2Mbps			
4	Format pengiriman	data1, data2, data3 datan, <i>buffer</i> 100 <i>char arrays</i> .			
5	pengaturan rotasi data	5x pengiriman / detik. Kecepatan pengiriman=5Hz.			

Pada proses pengujian, mula-mula *drone* diterbangkan untuk mendapatkan dokumentasi citra udara sebagai acuan validasi data. Lalu data dari robot dikirim ke komputer dengan menggunakan modul *wireless* NRF24L01. Data yang masuk akan disimpan di komputer dan ditampilkan ke *User Interface* (UI) untuk pengamatan secara *real-time*. Skenario pengujian ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Skenario pengujian

Pada awal pengujian perlu menambahkan definisi parameter awal atau kalibrasi untuk mengubah/mengganti nilai awal dari parameter tersebut. Parameter yang digunakan untuk kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Definisi parameter				
		X (m)	Y (m)	
	Anchor 1	0,00	10,00	
Posisi	Anchor 2	10,00	0,00	
	Anchor 3	15,00	15,00	
		Heading (°)	DWM (°)	
Arah Hadap	Definisi Awal	0,00	0,00	

Untuk memastikan proses inisialisasi selesai, bisa dilihat pada peta UI (*User Interface*). Proses initialization dikatakan berhasil saat posisi robot di lapangan sesuai dengan posisi yang tertangkap pada UI. Setelah proses definisi, semua kamera diaktifkan dan layar tampilan laptop juga direkam. Selanjutnya traktor didorong membentuk jalur kotak besar (8x8) dan kotak kecil (5x5). Dari pengujian sistem penentuan posisi robot pertanian otonom dengan lintasan kotak sebanyak 2 kali putaran didapatkan beberapa hasil data pengujian. Adapun data hasil pengujian yang diambil yaitu: foto citra udara, posisi sensor DWM1000, dan arah hadap dari robot selama pengujian. Posisi yang didapatkan akan diproses dengan *Kalman Filter* untuk mendapatkan hasil data yang lebih halus.

C. Hasil dan Pembahasan



Gambar 9. Foto udara GroundTruth (a) putaran ke-1 dan (b) putaran ke-2

Hasil pengambilan citra udara menghasilkan dokumentasi seperti pada Gambar 9. Gambar tersebut diekstraksi dari video citra udara selama pengujian. Peta citra udara dikonversi menjadi skala meter dengan mengacu pada skala perbedaan posisi antara *anchor* pada peta (dalam pixel). Hasil data posisi referensi (*GroundTruth*) dari robot ditunjukkan pada Gambar 10 di bawah ini.



Gambar 10. Foto udara GroundTruth (a) putaran ke-1 dan (b) putaran ke-2



Hasil Pengujian Penentuan Posisi:

Gambar 11. Hasil estimasi posisi (a) putaran ke-1 dan (b) putaran ke-2





Gambar 13. Rata-rata akumulasi simpangan posisi terhadap referensi

Pada Gambar 11-13 menunjukkan hasil pengujian posisi berupa posisi, eror, dan rata-rata simpangan terhadap referensi. Kemudian untuk mengetahui respons filter pada setiap aksis, maka hasil estimasi dan eror posisi setiap aksis juga ditampilkan pada Gambar 14-19 berikut ini.



Hasil Pengujian Penentuan Posisi pada Aksis X:





Gambar 15. Eror simpangan terhadap referensi pada aksis X



Gambar 16. Rata-rata akumulasi simpangan terhadap referensi pada aksis X



Hasil Pengujian Penentuan Posisi pada Aksis Y:

Gambar 18. Eror Simpangan terhadap referensi pada aksis Y





Untuk menentukan akurasi paling baik ditentukan dari rata-rata akumulasi eror ($\bar{X}|\Sigma_{eror}|$) yang paling sedikit. Maka semua hasil pengujian dibandingkan dan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rangkuman hasil pengujian posisi							
	Ax	Axis X		Axis Y		Simpangan (dX,dY)	
	$ar{X}$ Σ_{eror}	Max err	$ar{X} \mid \Sigma_{eror} \mid$	Max Err	$ar{X} \mid \Sigma_{eror} \mid$	Max Err	
DWM1000	0,19	0,88	0,21	1,00	0,33	1,02	
Data Terfilter	0,22	1,02	0,22	1,11	0,37	1,12	

Dari hasil pengujian tersebut meninjau dari simpangan posisi didapatkan akurasi tertinggi pada penentuan posisi berbasis UWB dengan nilai simpangan ratarata 0,33m. Lalu data terfilter menyusul dengan nilai simpangan rata-rata sebesar 0,37m. Dari segi kepresisian, data terfilter lebih presisi dibanding dengan tanpa filter. Sinyal data juga lebih halus dikarenakan rendahnya variasi nilai eror simpangan.

D. Simpulan

Sistem UWB (*Ultra-Wideband*) dan sensor Inersia yang diusulkan memiliki akurasi tinggi dan presisi. Di mana sistem penentuan posisi tersebut layak untuk memandu posisi dari robot pertanian otonom. Sistem penentuan posisi telah dievaluasi terhadap posisi *groundtruth* menggunakan perbandingan akurasi posisi dengan mengacu pada rata-rata eror simpangan. Dari pengujian yang telah dilakukan didapat hasil penentuan posisi yang akurat dan halus dengan nilai simpangan rata-rata sebesar 0,33cm. Pada aplikasi yang telah dilakukan sistem UWB masih terbatas dalam jangkauan, di mana tidak lebih dari 17x17 meter persegi. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya akan dikembangkan sistem koordinasi *anchor* UWB dengan jumlah yang lebih banyak untuk meningkatkan area jangkauan.

E. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung dan didanai oleh Keputusan Direktur Jenderal Pendidikan Vokasi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 81/D/HK/2021 Tanggal 24 November 2021 dan Keputusan Kementerian Keuangan Nomor KEP-3/LPDP.4/2021 Tanggal 26 November 2021 tentang tim periset pengampu program Riset Keilmuan Terapan Dalam Negeri Bagi Dosen Perguruan Tinggi Vokasi tahun anggaran 2021.

F. Referensi

- [1] M. M. Ozguven, "The Newest Agricultural Technologies," *Curr. Investig. Agric. Curr. Res.*, vol. 5, no. 1, Oct. 2018, doi: 10.32474/ciacr.2018.05.000201.
- [2] A. Roshanianfard, N. Noguchi, H. Okamoto, and K. Ishii, "A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University)," *Journal of Terramechanics*, vol. 91. Elsevier Ltd, pp. 155–183, Oct. 01, 2020. doi: 10.1016/j.jterra.2020.06.006.
- [3] P. Astolfi, A. Gabrielli, L. Bascetta, and M. Matteucci, "Vineyard Autonomous Navigation in the Echord++ GRAPE Experiment," Jan. 2018, vol. 51, no. 11, pp. 704–709. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.401.

- [4] B. J. McLoughlin, H. A. G. Pointon, J. P. McLoughlin, A. Shaw, and F. A. Bezombes, "Uncertainty characterisation of mobile robot localisation techniques using optical surveying grade instruments," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 7, Jul. 2018, doi: 10.3390/s18072274.
- [5] J. Guo et al., "Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture," Precis. Agric., vol. 19, no. 5, pp. 895–911, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11119-018-9563-8.
- [6] T. H. Nguyen, T.-M. Nguyen, and L. Xie, *Tightly-Coupled Single-Anchor Ultra-wideband-Aided Monocular Visual Odometry System*. 2020. doi: 10.0/Linux-x86_64.
- J. Li, C. Wang, X. Kang, and Q. Zhao, "Camera localization for augmented reality and indoor positioning: a vision-based 3D feature database approach," *Int. J. Digit. Earth*, vol. 13, no. 6, pp. 727–741, Jun. 2020, doi: 10.1080/17538947.2018.1564379.
- [8] T. H. Nguyen and L. Xie, "Relative Transformation Estimation Based on Fusion of Odometry and UWB Ranging Data," Feb. 2022, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2202.00279
- [9] T.-M. Nguyen, M. Cao, S. Yuan, Y. Lyu, T. H. Nguyen, and L. Xie, "LIRO: Tightly Coupled Lidar-Inertia-Ranging Odometry," Oct. 2020, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2010.13072
- [10] R. Liu *et al.*, "Cost-Effective Mapping of Mobile Robot Based on the Fusion of UWB and Short-Range 2-D LiDAR," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 27, no. 3, pp. 1321–1331, Jun. 2022, doi: 10.1109/TMECH.2021.3087957.
- [11] N. Zhou, L. Lau, R. Bai, and T. Moore, "Novel prior position determination approaches in particle filter for ultra wideband (UWB)-based indoor positioning," *Navig. J. Inst. Navig.*, vol. 68, no. 2, pp. 277–292, Jun. 2021, doi: 10.1002/navi.415.
- [12] K. Ansari, "Real-Time Positioning Based on Kalman Filter and Implication of Singular Spectrum Analysis," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 58–61, Jan. 2021, doi: 10.1109/LGRS.2020.2964300.
- [13] D. Feng, C. Wang, C. He, Y. Zhuang, and X. G. Xia, "Kalman-Filter-Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 4, pp. 3133–3146, Apr. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2965115.
- [14] A. Siemuri, K. Selvan, H. Kuusniemi, P. Välisuo, and M. S. Elmusrati, "Improving precision GNSS positioning and navigation accuracy on smartphones using machine learning," in *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+ 2021*, 2021, pp. 3081–3093. doi: 10.33012/2021.18004.
- [15] A. Ochoa-De-eribe-landaberea, L. Zamora-Cadenas, O. Peñagaricano-Muñoa, and I. Velez, "UWB and IMU-Based UAV's Assistance System for Autonomous Landing on a Platform," *Sensors*, vol. 22, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22062347.

- [16] J. Li, T. Gao, X. Wang, D. Bai, and W. Guo, "The IMU/UWB/odometer fusion positioning algorithm based on EKF," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2369, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/2369/1/012092.
- [17] A. Ismaiel and M. Y. Filimonov, "A simulation-based study to calculate all the possible trajectories of differential drive mobile robot," in *AIP Conference Proceedings*, Mar. 2021, vol. 2333. doi: 10.1063/5.0041751.
- [18] T. Hellström, "Kinematics Equations for Differential Drive and Articulated Steering," Sweden, Aug. 2011.
- [19] DecaWave, "Product Overview," 2017. [Online]. Available: https://www.qorvo.com/products/d/da007948
- [20] W. . Fakhris, N.Tamami, and A.H. Alasiry, "LOKALISASI POSISI MULTI NODE MENGGUNAKAN METODE TRILATERASI UNTUK APLIKASI PEMANTAUAN PEMAIN BOLA BASKET," Surabaya, Jul. 2019.
- [21] R. E. Kalman, "An Introduction to Kalman Filter," *Univ. North Carolina Chapel Hill, Dep. Comput. Sci. TR*, pp. 41–95, 1995.