

Gambar Kedalaman yang Dibantu untuk Mencetak Gol di Robot Sepak Bola Beroda

Hendra Kusuma
Departemen Teknik Elektro Institut
Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia
hendraks@its.ac.id

Tasripan
Departemen Teknik Elektro Institut
Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, tasripan@its.ac.id

Rudy Dikairono Departemen
Teknik Elektro Institut Teknologi
Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia
rudydikairono@its.ac.id

Dzulfikar Ahmad Samhan Departemen
Teknik Elektro Institut Teknologi
Sepuluh Nopember Surabaya,
Indonesia
dzulfikar.ahmad.smhn@gmail.com

Abstrak-Penelitian ini membahas pengembangan sistem pengambilan keputusan tingkat lanjut untuk robot sepak bola beroda, dengan fokus khusus pada tugas penting untuk menentukan sudut bidikan optimal untuk mencetak gol. Tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan kemampuan robot dalam mengidentifikasi dan menargetkan area gawang yang tidak dijaga secara akurat. Untuk mencapai hal ini, pendekatan baru digunakan, yang mengintegrasikan kedalaman dan data gambar RGB untuk memprediksi posisi ruang yang tidak dijaga di dalam area gawang. Prediksi ini difasilitasi oleh penggunaan kamera kedalaman Intel Realsense D435i, yang menangkap gambar RGB dan kedalaman secara bersamaan.

Metodologi ini melibatkan pemrosesan data gambar gabungan untuk memperkirakan lokasi area yang tidak dijaga, kemudian mengubah lokasi ini menjadi sudut bidikan yang tepat untuk robot. Keefektifan teknik ini telah diuji secara ketat di 60 titik uji yang berbeda. Hasilnya menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan sistem yang berhasil memprediksi area yang tidak dijaga di semua kasus pengujian dan mencapai tingkat kesalahan rata-rata hanya 1,3% dalam koordinat yang diprediksi.

Penelitian ini tidak hanya membuktikan kelayakan penggunaan data gambar terintegrasi untuk pengambilan keputusan robotik dalam lingkungan olahraga yang dinamis, tetapi juga menetapkan dasar untuk peningkatan lebih lanjut dalam interaksi robotik otonom dalam pengaturan dunia nyata yang kompleks.

Kata Kunci- sistem bidik, citra kedalaman, robot sepak bola beroda.

I. PENDAHULUAN

Teknologi robotik semakin menjadi bagian integral dari kehidupan manusia, meningkatkan berbagai sektor termasuk kedokteran [1], [2], interaksi sosial [3], [4], dan proses industri [5], [6]. Kemajuan terbaru dalam kecerdasan buatan telah memungkinkan robot untuk melakukan tugas-tugas kompleks yang secara tradisional hanya dapat dilakukan oleh manusia [3]. Perkembangan ini tidak hanya meningkatkan kemampuan dan efisiensi robot, tetapi juga memicu kegembiraan di antara para penggemar robotika di seluruh dunia.

Antusiasme ini telah mendorong terciptanya berbagai acara robotika global, salah satunya adalah ROBOCUP. ROBOCUP memiliki beberapa divisi kompetisi robot, dengan Middle Size League (MSL) sebagai divisi utama dalam sepak bola robotik. Acara-acara ini tidak hanya menampilkan perkembangan mutakhir dalam teknologi robotik, tetapi juga mempromosikan inovasi dan kolaborasi di antara para ahli di bidangnya.

Middle Size League (MSL) adalah kompetisi yang menampilkan robot sepak bola beroda otonom. Robot-robot ini menggunakan beberapa motor sebagai mekanisme pergerakan utamanya. Sifat otonom dari robot-robot ini menghadirkan tantangan yang signifikan bagi para penggemar robotika yang ditugaskan untuk mengembangkan kemampuan pengambilan keputusan yang canggih. Kemampuan ini memungkinkan robot untuk menentukan tindakan mereka secara dinamis, berdasarkan input lingkungan secara real-time.

Salah satu tantangan utama dalam mengembangkan robot sepak bola ini adalah merancang mekanisme mencetak gol yang efektif. Aspek utama yang perlu dipertimbangkan termasuk mekanisme penembakan, yang memungkinkan robot menendang bola, dan mekanisme pembedikan, yang menentukan arah tembakan. Kedua komponen ini sangat penting untuk performa robot dalam menargetkan dan mencetak gol secara akurat, sehingga memerlukan rekayasa dan integrasi yang tepat.

Penelitian ini akan berfokus pada mekanisme pembedikan robot sepak bola, yang sangat penting untuk keberhasilan mencetak gol. Tujuan utama dari mekanisme ini adalah untuk mengidentifikasi ruang yang tidak dijaga di dalam area gawang. Ruang-ruang yang teridentifikasi ini kemudian berfungsi sebagai referensi bagi sistem untuk menentukan titik bidikan yang paling efektif. Dengan menargetkan area yang tidak dijaga ini secara tepat, robot dapat secara signifikan meningkatkan peluangnya untuk mencetak gol.

Penelitian sebelumnya tentang deteksi gawang untuk robot Middle Size League (MSL) sebagian besar mengandalkan deteksi warna RGB [7], [8]. Meskipun penelitian-penelitian ini memberikan hasil yang memuaskan, ketergantungan mereka pada warna dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam berbagai kondisi pencahayaan. Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian ini mengusulkan penggunaan kamera kedalaman untuk meningkatkan akurasi deteksi sasaran dengan memasukkan informasi kedalaman. Intel Realsense D435i telah dipilih untuk tujuan ini, karena penelitian sebelumnya telah mengkonfirmasi keefektifannya dalam mempersepsikan jarak secara akurat [9]-[11]. Dengan mengintegrasikan data kedalaman dengan RGB, pendekatan ini bertujuan untuk menciptakan sistem pendeteksian sasaran yang lebih kuat dan dapat diandalkan, yang tidak terlalu rentan terhadap perubahan lingkungan.

Penelitian ini akan menggunakan kombinasi citra kedalaman dan RGB untuk mengidentifikasi secara akurat wilayah diminati di dalam gawang. Gambar-gambar ini akan memberikan pandangan komprehensif tentang area sasaran, memungkinkan untuk analisis yang terperinci. Dengan menggunakan data ini sebagai dasar, sistem akan menggunakan proses eliminasi langsung untuk menentukan area gawang yang tidak dijaga. Metode ini secara sistematis mengecualikan daerah

© 2024 oleh penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-NonKomersial 4.0 Internasional.
Bagaimana cara mengutip: Kusuma, H., Tasripan, D.A., Samhan, D.A., Ali, S., Dikairono, R. (2024). Depth Image Assisted Aim untuk Mencetak Gol pada Robot Sepak Bola Beroda. *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, 8(2).

pemain bertahan atau rintangan lainnya, memastikan bahwa area yang tersisa merupakan target optimal untuk mencetak gol.

Bagian selanjutnya dari makalah ini disusun sebagai berikut: Bagian 2 memberikan gambaran umum tentang perangkat dan terminologi yang digunakan, serta penjelasan rinci tentang keseluruhan sistem yang digunakan dalam penelitian ini. Bagian 3 menyajikan hasil yang diperoleh dari berbagai pengujian yang dilakukan selama penelitian. Terakhir, Bagian 4 menyajikan kesimpulan yang diambil dari hasil penelitian dan mendiskusikan jalan yang potensial untuk penelitian selanjutnya.

II. METODOLOGI

A. Robot IRIS

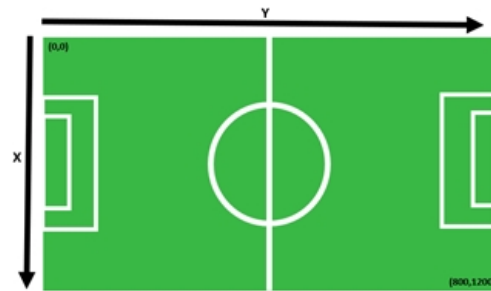
Penelitian ini akan diimplementasikan dengan menggunakan robot yang dikembangkan oleh tim IRIS dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember, yang berkompetisi di Middle Size League (MSL). Robot seperti yang ditunjukkan pada . 1, dilengkapi dengan empat roda omnidirectional sebagai aktuator utamanya, yang memungkinkannya untuk bergerak ke segala arah di permukaan tanah. Untuk pemotretan, robot ini menggunakan motor DC brushless torsi tinggi, sehingga memungkinkan bidikan yang dahsyat. Rangkanya yang terbuat dari baja tahan karat, didesain untuk menahan tabrakan dengan robot lain, sehingga meningkatkan daya tahannya dalam lingkungan yang kompetitif. Selain itu, robot ini dilengkapi dengan kamera omnidirectional yang dipasang di atas bingkainya. Kamera ini sangat penting untuk menangkap lingkungan pengambilan keputusan ya



Gbr. 1. Robot IRIS

Untuk kerangka kerja pemrograman, tim IRIS menggunakan Robot Operating System (ROS) untuk mengelola semua proses di dalam robot [12]. ROS adalah kerangka kerja perangkat lunak yang kuat yang dirancang untuk aplikasi robotik, yang mampu mendukung proses multi-threaded secara simultan. ROS terdiri dari beragam alat yang menyediakan fungsionalitas yang luas bagi para pengembang. Fitur penting dari ROS adalah kemampuan multibahasa, yang memungkinkannya untuk mendukung berbagai bahasa pemrograman dalam lingkungan multi-threaded. Selain itu, sebagai platform sumber terbuka, ROS memfasilitasi pengembangan dan penyesuaian yang mudah oleh komunitas penelitian dan pengembangan global [13].

Untuk memahami lingkungannya secara efektif, robot memerlukan kemampuan untuk memperkirakan posisi objek di sekitarnya. Untuk tujuan ini, sistem koordinat tetap sangat penting untuk berfungsi sebagai referensi. Gbr. 2 mengilustrasikan sistem koordinat diadopsi oleh robot IRIS. Dalam sistem ini, panjang bidang diwakili oleh sumbu Y, sedangkan bidang



Gambar 2. Sistem Koordinat Lapangan

lebar diwakili oleh sumbu X. Dalam penelitian ini, pengaturan khusus ini akan disebut sebagai sistem koordinat lapangan.

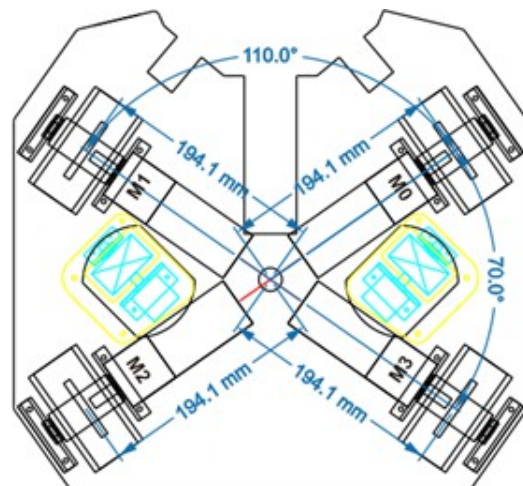
Untuk meningkatkan kemampuan robot dalam menentukan posisi objek secara akurat, sangat penting untuk memperkirakan lokasinya sendiri di lapangan. Perkiraan ini dicapai dengan menggunakan rotary encoder yang dipasang di bagian bawah robot. Gbr. 3 mengilustrasikan penempatan encoder ini. Setiap enkoder dipasangkan dengan roda omnidirectional, yang memungkinkan robot untuk menghitung posisinya saat ini berdasarkan perpindahan dari titik referensi awal. Perpindahan berasal dari jumlah rotasi yang direkam oleh rotary encoder, seperti yang ditentukan dalam Persamaan (1).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + 45^\circ) & \cos(\theta + 135^\circ) \\ \sin(\theta +) & \sin(\theta +) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RE0 \\ RE1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(x,y) : perkiraan posisi robot

RE0 : perpindahan encoder putar kiri RE1

perpindahan encoder putar kanan



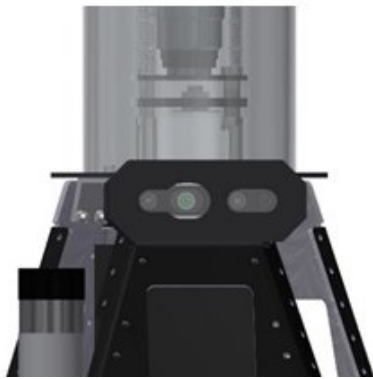
Gbr. 3. Penempatan Rotary Encoder (Bagian Hijau)

B. Intel Realsense D435i

Pemilihan kamera kedalaman sangat penting untuk keberhasilan penelitian ini, karena secara signifikan mempengaruhi hasilnya. Kamera harus memenuhi beberapa persyaratan khusus untuk berfungsi secara efektif dalam sistem. Pertama, kamera harus memiliki kecepatan pengambilan gambar yang cepat; minimum yang diperlukan adalah 30 frame per detik untuk memastikan sinkronisasi dengan kamera utama robot. Kedua, kamera harus mampu beradaptasi dengan berbagai



Gbr. 4 Intel Realsense D435i



Gbr. 5 Penempatan Kamera Kedalaman

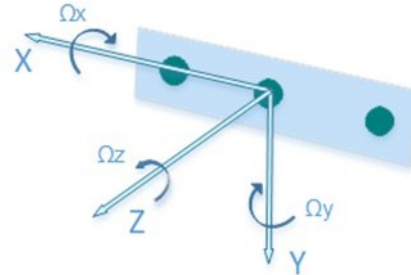
kondisi pencahayaan. Hal ini sangat penting karena adanya potensi variasi antara pencahayaan di lingkungan pengujian dan tempat acara yang sebenarnya. Terakhir, kamera harus cukup ringkas untuk diintegrasikan secara mulus ke dalam desain robot IRIS.

Berdasarkan kriteria ini, Intel Realsense D435i (Gbr. 4) dipilih sebagai kamera kedalaman untuk penelitian ini. Kamera ini menawarkan kecepatan pengambilan gambar yang tinggi hingga 90 frame per detik, jauh melebihi persyaratan minimum 30 fps. Kemampuan ini memastikan sinkronisasi yang optimal dengan kamera robot lainnya. Selain itu, desainnya sangat sesuai untuk lingkungan di dalam dan luar ruangan, menjawab kebutuhan untuk beradaptasi dalam kondisi pencahayaan yang berbeda. Selain itu, sasisnya yang ringkas sangat ideal untuk integrasi, pas di dalam kerangka robot IRIS.

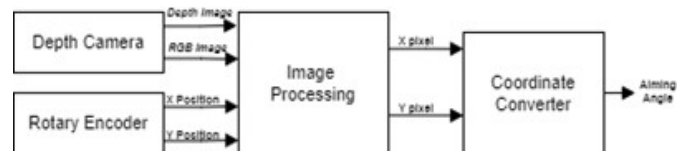
Kamera kedalaman ini (Gbr. 5) berbeda dari kamera lainnya, karena menyertakan sensor sekunder yang meningkatkan kemampuannya untuk melihat sekelilingnya. Sensor ini adalah Inertial Measurement Unit (IMU) 6-DOF (Derajat Kebebasan), yang membantu mendeteksi gerakan dan orientasi secara akurat. Sistem koordinat yang digunakan oleh IMU dirinci dalam Gbr. 6 dan akan dirujuk di seluruh penelitian ini sebagai sistem koordinat kamera.

C. Gambaran Umum Sistem

Arsitektur sistem penelitian ini mencakup beberapa proses yang saling berhubungan, yang secara kolektif digambarkan pada Gbr. 7. Inti dari sistem ini adalah blok pemrosesan gambar. Komponen penting ini memproses gambar kedalaman dan RGB yang ditangkap oleh kamera kedalaman untuk mengidentifikasi area yang tidak dijaga di dalam gawang. Output dari blok ini adalah koordinat piksel dari area ini. Koordinat ini kemudian diteruskan ke blok konverter koordinat, yang menghitung sudut bidik yang diperlukan agar robot dapat menargetkan zona yang tidak dijaga secara efektif.



Gbr. 6 Sistem Koordinat Intel Realsense D435i [11]



Gbr. 7 Diagram Blok Sistem

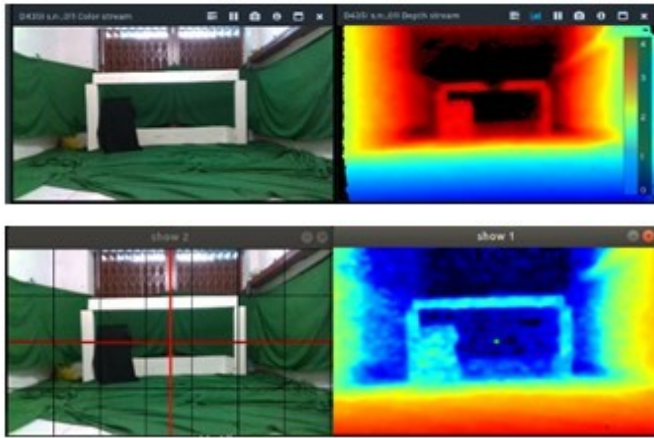
D. Blok Kamera Kedalaman

Sebelum memulai algoritme pemrosesan gambar, gambar mentah yang ditangkap oleh kamera depth memerlukan prapemrosesan. Langkah ini diperlukan karena perbedaan bidang pandang antara gambar kedalaman dan RGB. Seperti diilustrasikan dalam Gbr. 8, objek tampak lebih kecil dalam gambar kedalaman daripada gambar RGB, perbedaan yang dihasilkan dari bidang pandang yang bervariasi. Perbedaan ini menyebabkan koordinat objek yang tidak konsisten pada kedua jenis gambar tersebut. Untuk mengatasi masalah ini, gambar harus disejajarkan untuk memastikan keduanya memiliki bidang pandang yang sama. Gbr. 9 menunjukkan hasil penyelarasan ini, yang menunjukkan bahwa objek sekarang tampak memiliki ukuran yang sama pada kedua gambar. Penyelarasan ini memfasilitasi koordinat yang tersinkronisasi antara gambar kedalaman dan RGB, yang penting untuk pemrosesan lebih lanjut yang akurat.

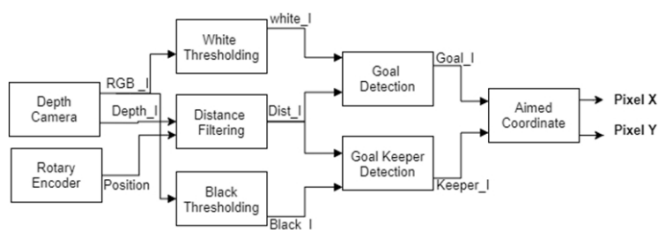
E. Algoritma Pemrosesan Gambar

Untuk memperkirakan posisi area yang tidak dijaga, sistem memproses data gambar yang diperoleh dari kamera kedalaman. Pemrosesan ini melibatkan serangkaian langkah, masing-masing dirancang untuk mengidentifikasi dan menganalisis bagian gambar yang relevan di mana tidak ada rintangan atau pelindung. Alur kerja terperinci dari urutan pemrosesan gambar ini digambarkan pada Gbr. 10.

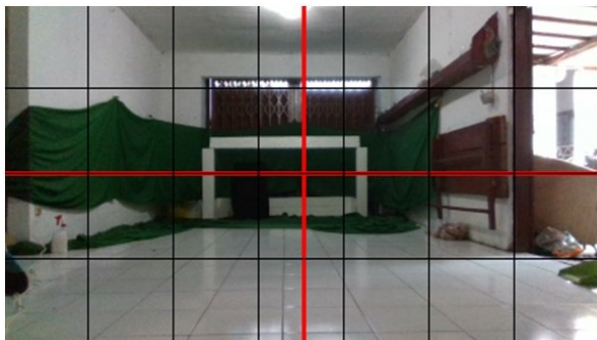
Tujuan utama dari tahap pemrosesan gambar adalah untuk meningkatkan pengenalan gawang dan penjaga gawang berdasarkan warna dan jarak dari robot. Untuk mencapai hal ini, gambar RGB pada Gbr. 11 digunakan untuk memfilter objek berdasarkan warna, mengidentifikasi objek yang cocok dengan warna khas gawang dan penjaga gawang. Hasil dari proses penyaringan berbasis warna ini digambarkan pada Gbr. 12 dan Gbr. 13. Secara khusus, Gbr. 12 mengisolasi objek berwarna putih, yang merupakan indikasi gawang,



Gbr. 11 Perbedaan Bidang Pandang



Gambar 12 Diagram Blok Pemrosesan Gambar



Gbr. 13 Gambar Sasaran RGB

sedangkan Gbr. 13 memfokuskan pada objek berwarna hitam, yang sesuai dengan penjaga gawang.

Seperti telah disebutkan sebelumnya, penelitian ini menggunakan gambar RGB dan gambar kedalaman untuk meningkatkan pengenalan sasaran. Sistem mengekstrak informasi jarak dari gambar kedalaman, yang melengkapi data warna dari gambar RGB. Tidak seperti gambar RGB, yang disaring berdasarkan warna, gambar kedalaman disaring nilai jarak setiap piksel. Proses penyaringan selektif ini mengisolasi objek dalam rentang jarak tertentu, yang ditentukan oleh posisi relatif robot dan sasaran. Metode untuk menghitung rentang jarak ini diuraikan dalam Persamaan (2). Gbr. 14 menampilkan hasil penyaringan ini, yang menunjukkan hanya objek yang berada dalam rentang jarak yang telah ditentukan.

$$rg = \sqrt{(xr - xg)^2 - (yr - yg)^2} \pm offset(2) (xr, yr) :$$

koordinat robot

(xg, yg) : koordinat tujuan

rg referensi jarak

offset variabel untuk mengontrol rentang.



Gbr. 8 Ambang Batas Sasaran (Ambang Batas Putih)



Gbr. 9 Ambang Batas Penjaga Gawang (Ambang Batas Hitam)



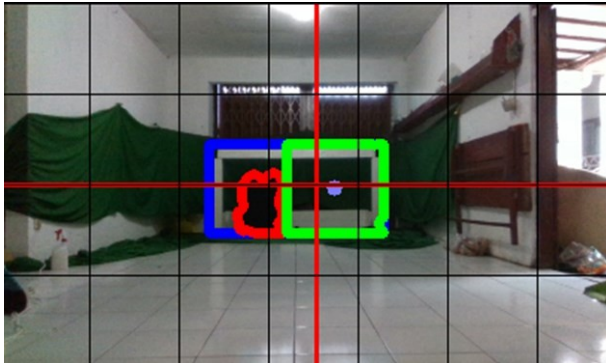
Gbr. 10 Penyaringan Jarak

Meskipun Gambar 14 dan 12 berhasil mengisolasi objek yang terkait dengan sasaran, namun masih mengandung sejumlah besar noise dari objek lain yang terdeteksi. Untuk mengurangi hal ini, sistem menggabungkan gambar-gambar ini untuk mengurangi noise, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15. Gambar gabungan ini berfungsi sebagai referensi utama untuk pengenalan sasaran, memfasilitasi deteksi posisi sasaran yang lebih akurat. Namun, mengidentifikasi area yang tidak dijaga dalam gawang memerlukan langkah tambahan. Area yang tidak dijaga ini ditentukan melalui proses eliminasi sederhana, yang melibatkan pengurangan area yang ditempati oleh penjaga gawang dari total area gawang. Metode ini secara efektif mengisolasi bagian gawang yang tidak dijaga, yang sangat penting untuk penargetan tembakan yang akurat.

Hasil dari proses pengenalan sasaran ditampilkan pada . 16. Dalam gambar ini, persegi panjang biru menguraikan area gawang yang terdeteksi, yang menunjukkan di mana letak gawang. Penjaga gawang diwakili oleh objek merah, yang menyoroti posisinya di dalam gawang. Area yang tidak dijaga, di mana tidak rintangan atau penjaga gawang, digambarkan dengan warna hijau.



Gbr. 14 Ambang Batas Gabungan



Gbr. 15 Hasil Akhir

kotak. Representasi visual ini dengan jelas membedakan antara gawang, penjaga gawang, dan bagian yang tidak dijaga, sehingga memungkinkan penilaian dan penargetan yang akurat selama permainan.

F. Blok Konverter Koordinat

Hasil akhir dari blok pemrosesan gambar adalah koordinat piksel area yang tidak dijaga. Untuk memanfaatkan data ini secara efektif untuk penargetan, koordinat piksel ini harus dikonversi ke dalam koordinat dunia nyata. Konversi ini dicapai dengan menggunakan fungsi Intel Realsense 'deproject pixel to point', yang menerjemahkan dimensi piksel ke dalam pengukuran spasial.

Meskipun kamera kedalaman memiliki kemampuan untuk menghitung koordinat 3D, sistem ini hanya menggunakan koordinat 2D yang sesuai dengan sistem koordinat lapangan, yang terdiri dari sumbu X dan Y. Nilai untuk X dan Y dihitung dengan menggunakan Persamaan (3) dan (4). Dengan menggunakan persamaan ini, memastikan bahwa sudut bidikan dibatasi dalam area sasaran, sehingga meningkatkan akurasi tindakan penargetan sasaran.

$$X = \left(\frac{A-B}{B-C} \right) + 300 \quad (3)$$

$$Y = d \quad (4)$$

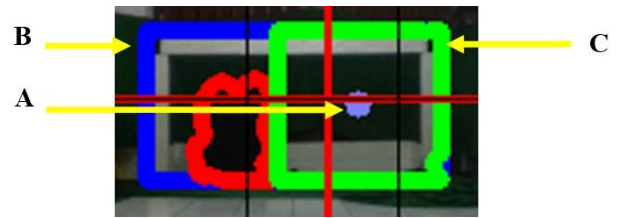
(X, Y) : Perkiraan posisi yang tidak dijaga

A : koordinat piksel area yang tidak dijaga (Titik A, Gbr. 16)

B : bagian paling kiri area gawang (Titik B, Gbr. 16)

C : bagian paling kanan area gawang (Titik C, Gbr. 16)

D : nilai kedalaman terdekat



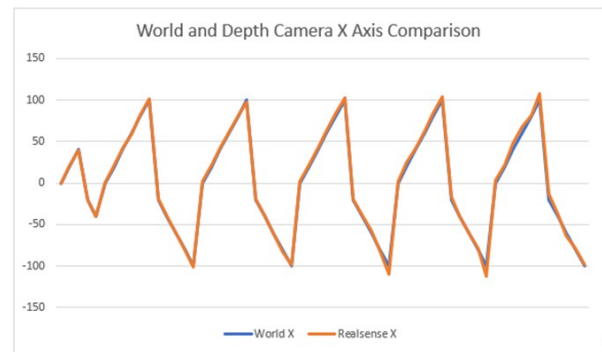
Gbr. 16 Titik Sasaran yang Menarik

III. PENGUJIAN DAN HASIL

A. Uji Deteksi Koordinat

Penelitian ini mencakup beberapa pengujian untuk memverifikasi keakuratan sistem, yang dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap awal melibatkan uji deteksi koordinat. Selama pengujian ini, sebuah objek berukuran lebar 43 cm dan tinggi 80 cm ditempatkan di berbagai lokasi di dalam ruang pengujian di depan kamera kedalaman. Kamera Intel Realsense kemudian memperkirakan koordinat objek, yang kemudian dibandingkan dengan koordinat aktual yang diukur untuk menilai keakuratannya. Gambar 18 dan 19 menampilkan perbandingan antara koordinat dunia nyata dan perkiraan.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa kesalahan rata-rata pada sumbu X adalah 5,7%, dan pada sumbu Y adalah 1,49%. Kedua kesalahan berada dalam batas kesalahan yang dapat diterima yaitu 10%, yang menunjukkan kemampuan sistem untuk memperkirakan posisi secara andal dalam kisaran akurasi yang dapat ditoleransi.

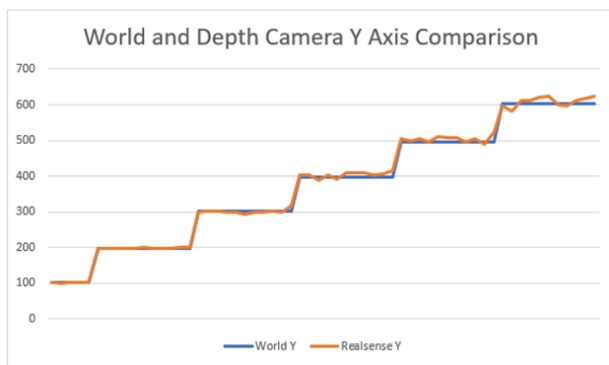


Gbr. 17 Grafik Perbandingan untuk Sumbu X

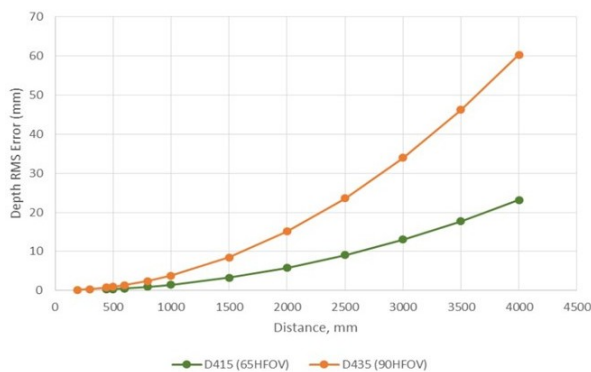
Gbr. 19 menunjukkan peningkatan kesalahan yang nyata untuk objek diposisikan lebih dari 300 cm dari kamera. Pengamatan ini konsisten dengan spesifikasi yang diberikan oleh Intel Realsense D435i [14]. Peningkatan kesalahan pada jarak yang lebih jauh selaras dengan keterbatasan kemampuan penginderaan kamera yang diketahui, seperti yang dirinci dalam dokumentasi produsen.

B. Tes Pengukuran Lebar

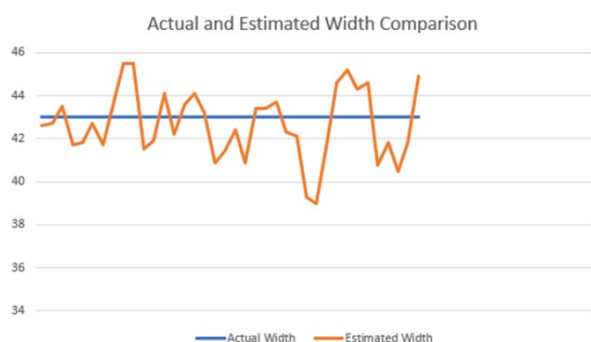
Seperti yang dijelaskan di Bagian F dari bagian metodologi, untuk memperkirakan secara akurat koordinat dunia nyata dari area gawang yang tidak dijaga, sistem membandingkan jarak antara titik paling kiri dan paling kanan dari area gawang. Untuk memvalidasi keakuratan metode ini, dilakukan pengujian khusus. Dalam pengujian ini, kamera kedalaman memperkirakan jarak antara koordinat paling kanan dan paling kiri dari satu objek, sama halnya dengan pengujian deteksi koordinat. Lebar aktual objek yang digunakan dalam pengujian ini adalah 43 cm. Gbr. 21 menyajikan perbandingan antara lebar aktual dan lebar



Gbr. 18 Grafik Perbandingan untuk Sumbu Y



Gbr. 19 Grafik RMS Error terhadap Jarak [15]



Gbr. 20 Perbandingan Lebar Aktual dan Estimasi

yang diperkirakan oleh kamera. Hasilnya menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan dalam pengujian ini adalah 3,14%.

C. Tes Deteksi Area Tanpa Penjagaan

Pengujian terakhir ini sangat penting untuk memastikan fungsionalitas dan akurasi sistem secara keseluruhan. Dalam pengujian ini, sistem diposisikan di berbagai lokasi di sekitar area pengujian untuk mendeteksi area gawang yang tidak dijaga. Area yang tidak dijaga yang terdeteksi oleh sistem kemudian dibandingkan dengan area yang tidak dijaga yang sebenarnya untuk menghitung akurasi sistem secara keseluruhan. Selain itu, pengujian ini mengevaluasi apakah sistem berhasil memperkirakan sudut bidikan. Keberhasilan ditentukan oleh perkiraan koordinat yang berada dalam kisaran aktual area yang tidak dijaga. Untuk memberikan representasi yang jelas tentang hasil pengujian, Tabel 1 menampilkan pilihan data pengujian beserta hasilnya. Data yang komprehensif menunjukkan bahwa kesalahan rata-rata di seluruh pengujian adalah 1,3%, mengonfirmasi bahwa sistem secara konsisten dan akurat mengidentifikasi posisi area yang tidak dijaga dari semua titik pengujian.

Tabel 1 Hasil Tes Akhir

Pos x	Pos y	Diperkirakan X	nyata x	Kiri tujuan	benar tujuan	Kesalahan (%)	Sukses
400	600	362.185	365	300	430	0.77	1
490	630	355.856	365	300	430	2.50	1
310	630	365.625	365	300	430	0.17	1
400	600	343.333	350	300	400	1.90	1
490	630	339.669	350	300	400	2.95	1
310	630	350.406	350	300	400	0.11	1
400	600	343.333	350	300	400	1.90	1
400	600	440.678	435	370	500	1.30	1
490	630	439.2	435	370	500	0.96	1
310	630	446.341	435	370	500	2.60	1
400	690	441.429	435	370	500	1.47	1
400	600	454.622	450	400	500	1.02	1
490	630	454.098	450	400	500	0.91	1
310	630	460.976	450	400	500	2.43	1

Pos x : Posisi sistem dalam sumbu X

Pos Y : Posisi sistem dalam sumbu Y

Perkiraan X : Perkiraan posisi tidak dijaga dalam

sumbu X X Nyata : Posisi aktual yang tidak dijaga dalam

sumbu X Kiri / Kanan Sasaran : Rentang area yang tidak dijaga

Kesalahan : Perbedaan untuk posisi aktual dan perkiraan

III. GEGAR OTAK

Rangkaian pengujian pertama memvalidasi kemampuan kamera kedalaman Intel Realsense D435i untuk memperkirakan posisi dengan kesalahan rata-rata 5,7% pada sumbu X dan 1,49% pada sumbu Y, jauh di bawah batas kesalahan yang dapat diterima sebesar 10%. Hasil ini menegaskan keandalan Intel Realsense D435i untuk estimasi posisi dalam lingkup penelitian ini.

Tes pengukuran lebar menilai keandalan metode yang digunakan untuk menghitung area gawang yang tidak dijaga. Dengan kesalahan rata-rata 3,14% dalam estimasi lebar, Intel Realsense D435i menunjukkan keandalan yang tinggi, mendukung kesimpulan bahwa metode untuk menghitung area gawang yang tidak dijaga dapat diandalkan dan cocok untuk aplikasi.

Pengujian terakhir bertujuan untuk mengukur keakuratan seluruh sistem, mengevaluasi kesalahan dalam estimasi koordinat dan tingkat keberhasilan sistem. Hasilnya menunjukkan kesalahan rata-rata yang sangat rendah, yaitu 1,3% dalam estimasi koordinat dan tingkat keberhasilan 100%. Tingkat keberhasilan yang sempurna dapat dikaitkan dengan area yang relatif luas yang tidak dijaga, yang memastikan bahwa bahkan dengan beberapa kesalahan estimasi koordinat, koordinat yang ditargetkan masih berada dalam kisaran yang sebenarnya. Temuan ini menegaskan bahwa sistem beroperasi secara efektif sebagaimana mestinya.

Singkatnya, pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa keseluruhan sistem sangat akurat dan dapat diandalkan untuk aplikasi yang dimaksudkan, menegaskan kemampuan Intel Realsense D435i dan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini.

IV. PENELITIAN DI MASA DEPAN

Penelitian ini menggunakan metode baru untuk menghitung posisi area yang tidak dijaga di dalam gawang, yang telah terbukti relatif efektif. Namun, masih ada potensi yang cukup besar untuk ditingkatkan. Keterbatasan utama dari pendekatan saat ini adalah ketergantungannya pada pendeteksian secara akurat bagian paling kanan dan paling kiri dari gawang untuk memperkirakan posisi area yang tidak dijaga. Ketergantungan ini dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam kondisi tertentu di mana ekstremitas ini dikaburkan atau tidak terlihat dengan jelas. Untuk

Untuk meningkatkan keandalan dan ketahanan penelitian, mengembangkan metode baru yang tidak bergantung pada rentang sasaran sangat penting. Pendekatan seperti ini berpotensi memberikan hasil yang lebih konsisten dan akurat di berbagai skenario, sehingga meningkatkan efektivitas sistem secara keseluruhan.

REFERENSI

- [1] S. E. Butner dan M. Ghodoussi, "Mengubah robot bedah untuk telesurgery manusia," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 19, no. 5, hal. 818-824, Oktober 2003, doi: 10.1109/TRA.2003.817214.
- [2] A. A. Morgan, J. Abdi, M.A.Q. Syed, "Robot dalam Perawatan Kesehatan: Tinjauan Ruang Lingkup." *Laporan Robotika Terkini* 3, 271-280 (2022). <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00095-4>
- [3] K. Severinson-Eklundh, A. Green, dan H. Hüttenrauch, "Aspek sosial dan kolaboratif dari interaksi dengan robot servis," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 42, no. 3-4, hal. 223-234, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0921-8890(02)00377-9.
- [4] M. J. Matarić, "Robotika yang membantu secara sosial: Penambahan manusia versus otomatisasi". *Sci. Robot.* 2, eaam5410 (2017). DOI : 10.1126/scirobotics.aam5410
- [5] B. Singh, N. Sellappan, dan P. Kumaradhas, "Evolusi Robot Industri dan Aplikasinya," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*
- [6] P. Cano, Y. Tsutsumi, C. Villegas, dan J. Ruiz-del-Solar, "Robust Detection of White Goals," dalam *RoboCup 2015: Robot World Cup XIX*, Cham, 2015, hlm. 229-238.
- [7] M. Hägele, K. Nilsson, J.N. Pires, R. Bischoff. "Robotika Industri". Dalam: Siciliano, B., Khatib, O. (eds) *2016 Springer Handbook of Robotika*. Buku Pegangan Springer. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_54
- [8] A. K. Mulya, F. Ardilla, dan D. Pramadihanto, "Pelacakan bola dan deteksi gawang untuk robot sepak bola ukuran sedang menggunakan kamera omnidirectional," dalam *Symposium Elektronika Internasional (IES) 2016*, Denpasar, Indonesia, September 2016, hal. 432-437, doi: 10.1109/ELECSYM.2016.7861045.
- [9] M. S. Ahn dkk., "Analisis dan Pemodelan Kebisingan Intel RealSense D435 untuk Robot Bergerak," dalam *Konferensi Internasional ke-16 tentang Robot Ubiquitous (UR) 2019*, Jeju, Korea (Selatan), Juni 2019, hal. 707 - 711, doi: 10.1109/URAI.2019.8768489.
- [10] J. D. Mejia-Trujillo dkk., "Perbandingan KinectTM dan Intel RealSenseTM D435: studi pendahuluan untuk analisis gerakan," 2019, hlm. 4.
- [11] S. Sayyar-Roudsari, S. A. Hamoush, T. M. V. Szeto, dan S. Yi, "Menggunakan Sistem Visi Komputer 3D untuk Inspeksi Struktur Beton Bertulang," dalam *Advances in Computer Vision*, vol. 944, K. Arai and S. Kapoor, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, hlm. 608-618.
- [12] A. R. Tinkar dkk., "Makalah Deskripsi Tim: Tim IRIS 2020," 2020, p. 8.
- [13] M. Quigley dkk., "ROS: Sistem Operasi Robot sumber terbuka," hal. 6.
- [14] "Cara Mendapatkan Data IMU dari D435i dan T265," Intel RealSense, [Online]. Tersedia: <https://www.intelrealsense.com/how-to-mendapatkan-data-imu-dari-d435i-dan-t265/>.
- [15] A. Grunnet-Jepsen, J. N. Sweetser, dan J. Woodfill, "Metode Terkenal untuk Menyetel Kamera Kedalaman Intel® RealSense™ D400 untuk Performa Terbaik," hal. 10.