

Perancangan Prototipe Robot Kolaboratif Berbasis *Computer Vision* untuk Proses *Material Handling*

Muhammad Farouk Setiawan^a, P. Paryanto^{a*}, Joga Dharma Setiawan^a

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275

*E-mail: paryanto@ft.undip.ac.id

Abstract

Collaborative robots in the manufacturing sector have the potential to increase productivity based on their ability to actively engage in joint work with humans. However, collaborative robots that are commonly used are specialized robots designed for collaboration. Therefore, this study proposes a collaborative robot design that can be used on various types of robot manipulators by providing ease of setup and use for users. The collaborative robot design uses a prototype robot manipulator by applying computer vision as the main concept in running collaboration in the material handling process. The results obtained by the robot in carrying out the collaboration have a success rate of 92% for placing objects one by one and 84% for placing objects continuously, and the safety system of the robot produces a good enough system to be able to overcome if there was a collision between the robot and the user. These results show that the robot can perform collaboration successfully with the simplest concept that can be applied, namely without requiring many complex processes, complicated calculations, and the use of various additional equipment besides a camera.

Keywords: *human-robot collaboration, robot manipulator, computer vision, material handling*

Abstrak

Robot kolaboratif dalam sektor manufaktur memiliki potensi untuk meningkatkan produktivitas berdasarkan kemampuan robot untuk secara aktif terlibat dalam kerja bersama dengan manusia. Namun demikian, robot kolaboratif yang umumnya digunakan merupakan robot khusus yang didesain untuk menjalankan kolaborasi. Sehingga pada penelitian ini mengajukan sebuah rancangan robot kolaboratif yang dapat digunakan pada berbagai jenis *robot manipulator* dengan memberikan kemudahan dalam hal pengaturan dan penggunaan untuk *user*. Adapun rancangan robot kolaboratif menggunakan prototipe *robot manipulator* dengan menerapkan *computer vision* sebagai konsep utama dalam menjalankan kolaborasi pada proses *material handling*. Hasil yang diperoleh robot dalam menjalankan kolaborasi tersebut adalah dengan tingkat kesuksesan 92% untuk peletakan objek secara satu per satu dan 84% untuk peletakan objek secara terus menerus, dan sistem keamanan dari robot menghasilkan sistem yang cukup baik untuk dapat mengatasi adanya tabrakan antara robot dan *user*. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa robot dapat melakukan kolaborasi dengan baik dengan konsep yang paling sederhana yang dapat diterapkan, yaitu tanpa memerlukan banyak proses yang rumit, perhitungan yang rumit, dan penggunaan berbagai peralatan tambahan selain sebuah kamera.

Kata kunci: *human-robot collaboration, robot manipulator, computer vision, material handling*

1. Pendahuluan

Robot kolaboratif atau dikenal dengan istilah COBOT (*Collaborative Robot*) adalah salah satu jenis robot yang dirancang untuk dapat melakukan kolaborasi dengan manusia. Konsep kolaborasi robot dan manusia dalam hal ini adalah berkaitan dengan gagasan yang dikenal dengan istilah *Human-Robot Collaboration* (HRC). Dalam penerapannya pada industri manufaktur, robot kolaboratif mendukung *user* (manusia) dalam melakukan pekerjaan seperti menangani bahan material atau mengeksekusi pekerjaan yang berulang dengan keandalan yang tinggi. Lebih lanjut interaksi langsung di antara *user* dan robot telah menggunakan sensor dan program yang dapat menjamin keamanan dalam penggunaan robot. Sehingga hal ini dapat menjadi strategi yang bagus bagi para pelaku industri manufaktur untuk dapat mengurangi risiko kerja *user* dan secara luas dapat meningkatkan efisiensi dan produktivitas [1]. Pada beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan robot kolaboratif di antaranya adalah penelitian yang dilakukan Akkaladevi dkk. [2] yaitu menggunakan robot UR (*Universal Robot*) 10 untuk membantu dalam melakukan proses *assembly* sebuah *steam cooker* yang dimana robot mengambil sebuah komponen kemudian memasangkannya pada komponen yang lain. Penelitian yang dilakukan Tsamis dkk. [3] yaitu menggunakan UR 10 untuk pekerjaan *pick & place*, dimana untuk menukar komponen-komponen dari sebuah *workstation* ke *workstation* yang lain. Penelitian yang dilakukan Lotsaris dkk. [4] yaitu menggunakan COBOT untuk membantu dalam proses *assembly* suspensi depan dari kendaraan umum, dengan memindahkan dan

mengangkat komponen yang berat. Penelitian yang dilakukan Vogel dkk. [5] yaitu menggunakan KUKA iiwa LBR 14 untuk membantu *user* untuk memasang sekrup pada pelat dalam perakitan komponen. Pada penelitian yang dilakukan Paletta dkk. [6] yaitu menggunakan KUKA iiwa LBR 7 pada masalah mainan, dimana robot membantu *user* dalam pekerjaan *pick & place* dengan tujuan akhirnya adalah menyusun sebuah puzzle tangram pada mainan tersebut. Penelitian yang dilakukan Sanchez-Matilla dkk. [7] yaitu menggunakan KUKA iiwa LBR 7 dan UR5 pada proses penukaran barang, dimana *user* memberikan sebuah cup dengan berbagai jenis variasi cup kepada robot. Selanjutnya robot tersebut mengambil dan meneruskan cup tersebut pada titik lokasi pengantaran. Pada penelitian-penelitian tersebut semuanya menggunakan *robot manipulator* yang dijalankan dengan metode pengenalan objek melalui *sensing* yaitu dengan *computer vision* yang dinilai cocok untuk berjalannya konsep kolaborasi antara robot dan manusia.

Berdasarkan pada penelitian-penelitian sebelumnya, robot kolaboratif yang digunakan merupakan robot khusus yang didesain untuk menjalankan kolaborasi. Kemudian penulis mempertimbangkan terkait hal tersebut untuk dapat merancang robot kolaboratif yang memiliki potensi untuk dapat digunakan pada berbagai jenis *robot manipulator*. Selain itu juga, penulis mempertimbangkan pada kemudahan dalam pengaturan dan penggunaan bagi *user* agar dapat diimplementasikan pada proses manufaktur. Adapun penulis mengambil suatu pekerjaan yaitu proses *material handling* yang merupakan proses yang paling umum ada pada industri manufaktur sebagai gambaran proses untuk berjalannya kolaborasi antara robot dan manusia dimana nantinya robot akan bertugas untuk mengambil objek di suatu tempat secara acak di dalam ruang kerja dan memberikan objek tersebut kepada *user* yang juga masih dalam satu ruang kerja yang sama. Konsep *material handling* dalam hal ini dimaksudkan adalah memungkinkan robot untuk dapat melakukan interaksi secara langsung dengan *user* yaitu dalam proses mendistribusikan material dan produk dalam sistem manufaktur [8]. Pada penelitian ini, penulis menggunakan prototipe robot kolaboratif yang dirancang sendiri dengan konsep gerak sederhana yang dapat menggambarkan gerak sesungguhnya pada jenis *robot manipulator*. Sehingga penulis memastikan bahwa konsep yang dijalankan pada prototipe robot kolaboratif dapat dengan mudah juga dijalankan pada jenis *robot manipulator*.

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa untuk dapat menjalankan kolaborasi, robot perlu menerapkan metode *computer vision*. Untuk dapat menjalankan *computer vision* pada rancangan robot kolaboratif, sebuah kamera perlu diintegrasikan pada *robot manipulator*. Kamera tersebut dapat dipasangkan pada bagian *end-effector* robot atau dipasangkan terpisah dari robot yang akan terintegrasi secara langsung pada robot. Sehingga apabila robot memperoleh informasi dari kamera terkait sebuah objek, maka robot akan melakukan pemahaman secara mandiri untuk dapat mengeksekusi objek tersebut. Seperti yang dilakukan pada penelitian Rakshit dkk. [9] menggunakan kamera dalam menentukan lokasi objek, memilih objek, dan mengestimasi konfigurasi *gripper* pada robot dalam jangkauan robot. Penelitian Rosenberger dkk. [10] menggunakan kamera untuk mengestimasi posisi dari objek yang diambil berdasarkan kedalaman kamera yang kemudian memberikan informasi kepada robot untuk dapat merencanakan dan mengeksekusi gerakan pengambilan target dengan menghindari tabrakan dari lingkungan sekitar objek. Penelitian Andersen dkk. [11] menggunakan kamera untuk melakukan deteksi pada objek (pintu mobil) dengan menggunakan metode deteksi objek yang kemudian informasi tersebut akan menjadi masukan pada robot untuk dapat melakukan estimasi posisi dan pose dari komponen yang kemudian menampilkan proyeksi gambar komponen pada permukaan komponen tersebut dengan informasi titik awal tepi-tepi komponen yang digunakan sebagai instruksi pekerja. Penelitian Park dkk. [12] menggunakan kamera untuk melakukan deteksi objek yang melibatkan kemampuan robot dengan spesifik dapat mengambil objek dalam berbagai kondisi. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, pada penelitian ini robot juga dirancang dengan menambahkan sebuah kamera sebagai media visualisasi robot untuk dapat secara mandiri melakukan proses pengambilan objek dan dalam memberikannya robot akan menunggu perintah dari *user* dengan mengenali gerak isyarat tangan *user* yang diproses melalui kamera yang sama dengan yang digunakan untuk mendeteksi objek sebelumnya. Gerak isyarat tangan tersebut dilakukan untuk memastikan kesiapan *user* dalam menerima objek tersebut. Selain itu, objek yang diberikan tersebut merupakan objek dengan bentuk yang beragam. Sehingga dapat menggambarkan konsep sesungguhnya yang terjadi apabila robot kolaboratif tersebut digunakan di dalam proses *material handling*.

Pertimbangan untuk memastikan keamanan *user* dalam menjalankan robot kolaboratif juga menjadi suatu hal yang diutamakan. Hal ini dikarenakan pada pengaruh massa robot dan beban angkutnya beserta kecepatan robot yang apabila mengenai tubuh manusia akan memiliki dampak yang serius [13]. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis juga akan menambahkan sistem keamanan (*safety*) pada prototipe kolaboratif untuk memastikan keamanan dalam penggunaan robot. Adapun salah satu strategi yang dapat dilakukan dalam memastikan keamanan manusia adalah keamanan yang selalu aktif secara terus menerus untuk mendeteksi dengan segera tabrakan yang terjadi antara robot dan manusia dengan menghentikan operasi dengan aman terkendali [14]. Pada penelitian-penelitian sebelumnya yang menerapkan strategi tersebut terkait sistem keamanan dalam penggunaan robot adalah seperti yang dilakukan oleh Sun dkk. [15] menggunakan metode *force feedback* dalam kontrol robot untuk sistem keamanan penggunaan robot saat berinteraksi dengan manusia. Konsep *force feedback* memungkinkan robot untuk dapat membandingkan besar gaya yang diterima robot pada kondisi normal dalam kerja robot dan kondisi sesudah terdeteksi gaya eksternal yang berasal dari manusia. Besar gaya tersebut diperoleh dari sensor gaya yang terdapat pada aktuator robot. Kemudian perbedaan besar gaya ini yang dipertimbangkan dalam kontrol robot sebagai sistem keamanan penggunaan robot. Pada penelitian yang dilakukan Pang dkk. [16] menggunakan *flexible tactile sensor array* yang dipasangkan pada bagian luar tubuh robot untuk mendeteksi gaya yang diterima robot pada saat terjadinya tabrakan. Sehingga apabila terdeteksi gaya yang berlebih pada sensor tersebut, maka

robot akan mengaktifkan sistem keamanan dan sekaligus dapat mengurangi efek dari benturan yang terjadi, karena memiliki bahan yang *soft*. Berbeda halnya pada penelitian yang dilakukan Chen dkk. [17], Dianatfar dkk. [18], dan Hietanen dkk. [19], menerapkan konsep *Augmented Reality* (AR) dengan menambahkan kamera pada ruang kerja dan AR glasses pada *user* yang dapat memberikan notifikasi pada *user* sesegera mungkin apabila terdeteksi ketidaksesuaian pada pekerjaan yang dilakukan antara robot dan manusia. Sementara itu, pada penelitian Vogel dkk. [20], menerapkan konsep proyeksi cahaya sebagai media untuk mendeteksi ruang kerja robot dimana beberapa kamera dipasangkan di sekitar ruang kerja untuk mendeteksi proyeksi cahaya tersebut dan sebuah proyektor sebagai penghasil cahaya tersebut. Apabila terjadinya pelanggaran terhadap batasan ruang kerja yang diproyeksikan tersebut maka sistem keamanan diaktifkan. Berdasarkan pada penelitian-penelitian tersebut, sistem keamanan yang digunakan melibatkan perhitungan matematika yang rumit yaitu pertimbangan terhadap dinamika robot, penambahan sensor di luar robot dan peralatan-peralatan pendukung lainnya. Oleh karena itu, penulis mengadaptasi konsep dari penelitian-penelitian tersebut dalam penerapan sistem keamanan robot namun dengan menghindari perhitungan matematika yang rumit dan penggunaan terlalu banyak peralatan tambahan. Adapun konsep yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan melakukan modifikasi terhadap aktuator yang digunakan agar dapat memberikan *output* selayaknya sebuah sensor. *Output* yang dihasilkan tersebut adalah berupa informasi sudut. Sehingga nantinya apabila terjadi suatu kondisi yang menyebabkan perbedaan sudut antara *input* dari program dan *output* dari aktuator yang digunakan, maka secara otomatis robot akan dihentikan.

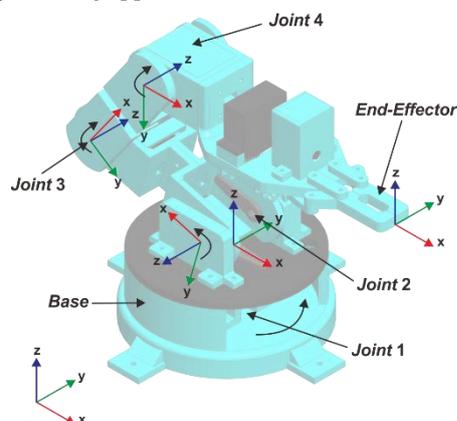
Berdasarkan uraian pada paragraf-paragraf sebelumnya, penulis dapat menyimpulkan kontribusi yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah: 1) Memberikan rancangan robot kolaboratif dengan kemampuan robot untuk menjalankan proses *material handling* yang dapat secara mandiri untuk melakukan proses pengambilan objek dengan posisi acak pada ruang kerja dan kemudian memberikan objek tersebut kepada *user* untuk menggambarkan konsep kolaborasi antara robot dan manusia; 2) Bentuk dan posisi orientasi objek yang diberikan dalam proses *material handling* adalah beragam yang membuat konsep ini fleksibel untuk digunakan; 3) Pada rancangan robot kolaboratif diberikan sistem keamanan (*safety*) apabila secara tidak sengaja terjadi tabrakan saat robot bergerak yaitu dengan memodifikasi aktuator yang digunakan agar dapat menghasilkan *output* seperti layaknya sebuah sensor; dan 4) Memberikan pertimbangan-pertimbangan dalam merancang robot kolaboratif yang dapat menjadi bahan evaluasi untuk mendapatkan rancangan robot kolaboratif yang efektif untuk digunakan berdasarkan kondisi yang ada.

Dalam penelitian ini robot kolaboratif dirancang pada sebuah prototipe *robot manipulator* 4 DOF (*Degree of Freedom*) dengan aktuator yang digunakan pada robot adalah berupa motor servo yang dipasangkan di setiap *joint* robot dan *end-effector* robot diberikan sebuah *gripper* yang digunakan untuk mengambil dan meletakkan objek. Kerangka robot dibuat dengan menggunakan 3D printer dengan material PLA (*PolyLactic Acid*). Untuk pusat kendali gerak robot adalah mikrokontroler Arduino Nano yang sebelumnya sudah dimasukkan pemrograman dari Arduino IDE dengan isi modul Firmata yang dapat diakses pada Python. Kamera yang digunakan dalam sistem robot adalah ESP32-CAM yang akan diprogram dengan OpenCV dan Python sebagai fungsi dalam mendeteksi objek dan mengeksekusi gerakan yang dilakukan robot. Sementara itu, untuk proses pengenalan objek menggunakan algoritma dari YOLOv8.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Rancangan Robot Kolaboratif

Robot kolaboratif pada penelitian ini dirancang pada *robot manipulator* yang dapat bergerak berputar dan memanjang dengan fungsi menjepit dan memindahkan benda. Pada setiap sendi-sendi dari robot terdapat sudut yang dapat dihitung dengan menggunakan model kinematika. Penentuan sudut bertujuan agar *end-effector* dari robot yaitu berupa *gripper* dapat mencapai posisi *end-point* yang diinginkan. Pada bagian *end-effector* robot selain disematkan *gripper* juga diberikan sebuah kamera kecil yaitu ESP32-CAM yang dipasangkan sejajar dengan *gripper* dan diletakkan di dalam sebuah *case* yang berfungsi untuk melakukan deteksi terhadap objek, serta memberikan perintah kepada robot untuk mengambil objek dengan menggunakan *gripper*.



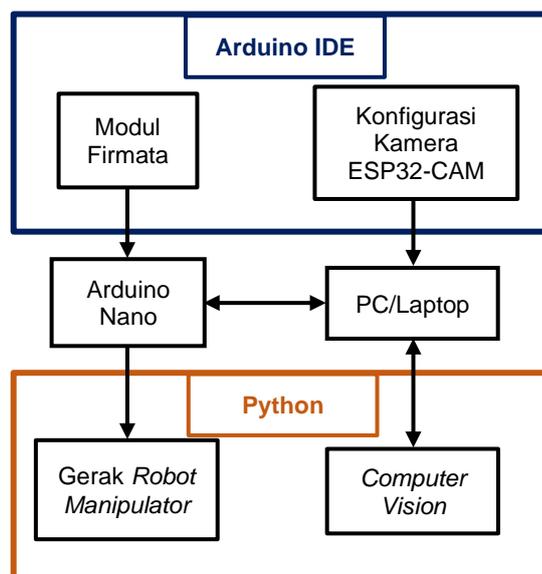
Gambar 1. Desain, Arah Gerak *Joint* dan *Frame* Robot Kolaboratif

Prototipe robot kolaboratif dirancang memiliki 4 DOF (dapat dilihat pada Gambar 1). Jumlah DOF tersebut menggambarkan jumlah sendi (*joint*) yang dimiliki oleh robot. Adapun semua *joint* robot pada penelitian ini merupakan *revolute joint*. Pada Gambar 1 dapat dilihat arah gerak setiap sendi beserta *frame* robot kolaboratif. Arah gerak sendi ini didefinisikan berdasarkan arah putar motor servo dimana arah panah menunjukkan pertambahan sudut untuk motor servo. Sementara pada *frame* robot didefinisikan berdasarkan posisi *world frame*, *joint 1*, *joint 2*, *joint 3*, *joint 4*, dan *end-effector*. Pada setiap *frame joint* robot mendefinisikan posisi motor servo dipasangkan.

2.2 Konfigurasi Elektronika dan Software

Rancangan perangkat elektronika robot kolaboratif pada penelitian ini menggunakan mikrokontroler Arduino Nano sebagai pusat kendali, motor servo MG996R dan DS3225 sebagai penggerak dari robot, *power supply* sebagai sumber catu daya, Adaptor *Step Down* XL4015 sebagai penurun tegangan dari *power supply* terhadap motor servo, konektor sebagai terminal penghubung arus listrik, ESP32-CAM sebagai kamera, dan sebuah PC/laptop sebagai *interface*. Kabel sinyal motor servo dihubungkan dengan pin digital Arduino Nano. Sedangkan kabel positif dan negatif dihubungkan pada konektor. Adapun kabel tambahan hasil modifikasi untuk sistem keamanan robot dihubungkan dengan pin analog Arduino Nano. Adapun PC/laptop yang digunakan adalah Asus X550VX dengan spesifikasi Intel Core i7 6700HQ Processor, RAM DDR4 8GB, Grafis Nvidia GeForce GTX 950M, dan SSD 256GB.

Rancangan perangkat lunak (*software*) dalam penelitian ini disusun dalam dua bahasa pemrograman yaitu C dan Python. Bahasa C digunakan untuk menyediakan hubungan antara Arduino dan Python pada program gerak robot yaitu dengan modul Firmata dan konfigurasi kamera ESP32-CAM yang dimasukkan melalui Arduino IDE. Sementara itu, Python digunakan untuk menjalankan *computer vision* yang di dalamnya memerlukan *library* OpenCV untuk dapat mengakses ESP32-CAM dan menjalankan hubungan dengan Arduino yang kemudian memberikan perintah pada Arduino untuk menjalankan robot berdasarkan deteksi objek dari algoritma YOLOv8 yang dimasukkan melalui Visual Studio Code. Adapun untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada diagram perancangan *software* pada Gambar 2.

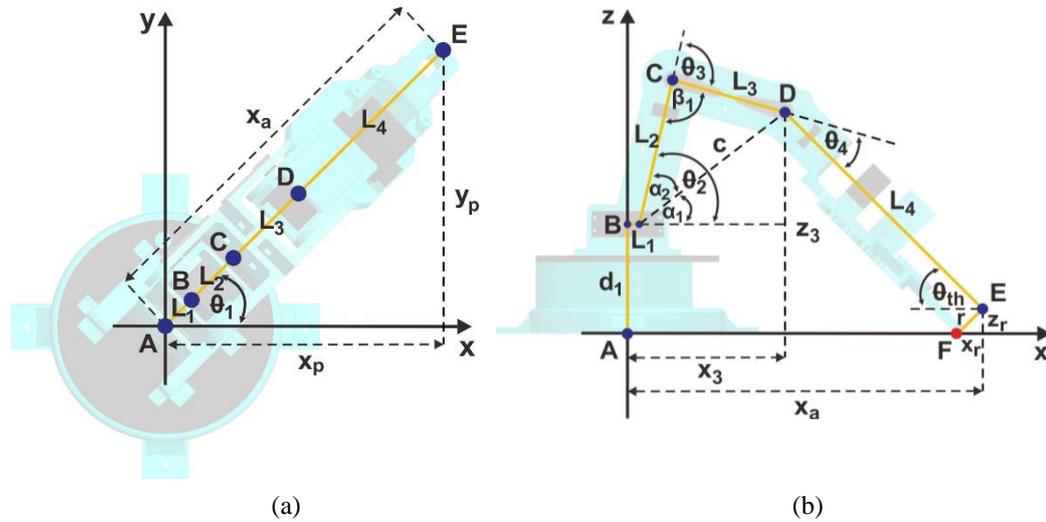


Gambar 2. Diagram Rangkaian Software

2.3 Perhitungan Posisi dan Gerak Robot

Pada pergerakan robot dalam kolaborasi robot dan manusia pada penelitian ini terbagi menjadi tiga kondisi yaitu kondisi deteksi objek, mengambil objek, dan mengantarkan objek. Kondisi pertama dimana robot melakukan deteksi objek, posisi robot berada pada kondisi diam di suatu posisi yang sudah ditentukan dengan kondisi kemiringan *end-effector* adalah 60° , serta dengan ketinggian kamera terhadap bidang kerja robot adalah 17 cm. Kondisi kedua yaitu setelah objek terdeteksi pada *frame* kamera, robot akan bergerak mengambil objek berdasarkan informasi deteksi objek berupa letak *centroid* titik *grasp* objek. Letak *centroid* ini mendefinisikan posisi objek terhadap posisi robot. Sehingga pada kondisi ini perhitungan kinematika robot yang digunakan adalah invers kinematik. Sebagai catatan bahwa kondisi pengambilan objek pada penelitian ini didefinisikan dengan asumsi bahwa posisi pengambilan objek pada sumbu z adalah 0. Sedangkan untuk kondisi ketiga yaitu kondisi robot mengantarkan objek kepada *user*. Pada kondisi ini hanya melibatkan suatu titik tertentu yang telah didefinisikan. Adapun perhitungan invers kinematik yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan metode pendekatan geometri dimana perhitungan besar sudut setiap *joint* dilakukan dengan perhitungan menggunakan konsep trigonometri seperti yang dilakukan pada penelitian Cahyono dkk. [21]. Dalam penelitian tersebut untuk menghitung besar setiap sudut *joint* robot dilakukan dengan melihat pada dua sudut pandang

terhadap robot yaitu pada bidang XY (tampak atas) dan bidang XZ (tampak depan). Untuk lebih jelasnya terkait perhitungan invers kinematik tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perhitungan Invers Kinematik: (a) Bidang XY; (b) Bidang XZ

Pada Gambar 3(a) dapat diketahui persamaan dalam menghitung besar sudut *joint 1* (θ_1) dilihat pada sudut pandang tampak atas yaitu pada bidang XY dengan x_p dan y_p sebagai koordinat *end-effector* robot adalah sebagai berikut.

$$\tan\theta_1 = \frac{y_p}{x_p} \tag{1}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y_p}{x_p}\right) \tag{2}$$

$$x_a = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \tag{3}$$

Pada Gambar 3(b) dapat diketahui persamaan dalam menghitung besar sudut *joint 2* (θ_2), *joint 3* (θ_3), dan *joint 4* (θ_4) yang dilihat pada sudut pandang tampak depan yaitu pada bidang XZ. Adapun hubungan antara kedua sudut pandang ini adalah pada koordinat x yang digunakan yaitu x_a . x_a adalah koordinat pada sumbu x untuk robot pada bidang XZ. x_a akan bernilai sama dengan x_p (dari Gambar 3(a)) apabila pada bidang XY, y_p berada di titik 0 atau dengan kata lain besar sudut *joint 1* adalah 0. Sehingga dalam menggunakan metode pendekatan geometri ini harus dilakukan terlebih dahulu perhitungan pada bidang XY baru kemudian pada bidang XZ.

Adapun untuk dapat menghitung setiap sudut *joint* robot pada penelitian ini menggunakan konsep seperti yang dilakukan pada buku Asada [22]. Hal pertama yang perlu dilakukan adalah dengan menentukan besar sudut kemiringan *grripper* (θ_{th}). Pada penelitian ini menggunakan besar sudut kemiringan yaitu 45° . Sehingga nantinya dari sudut kemiringan ini dapat diketahui posisi *joint 3* robot (x_3 dan z_3). Kemudian dari posisi tersebut menggunakan konsep aturan cosinus dapat diperoleh sudut *joint 2* dan *joint 3*. Sementara itu untuk *joint 4* diperoleh dengan mempertimbangkan pada sudut *joint 2*, *joint 3*, dan sudut kemiringan *grripper*. Namun sebelum itu, perlu diketahui bahwa kondisi posisi *grripper* robot pada penelitian ini bergeser dari posisi garis lurus lengan robot. Posisi robot yang diinginkan saat mengambil objek adalah pada titik F (x_F dan z_F). Sedangkan dalam penerapan rumus ini posisi *end-effector* robot berada pada titik E. Sehingga perlu dilakukan penyesuaian posisi objek terhadap posisi robot pada penelitian ini dengan persamaan yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$x_r = r \cos \theta_{th} \tag{4}$$

$$z_r = \sqrt{r^2 - x_r^2} \tag{5}$$

Besar nilai x_r dan z_r adalah nilai pergeseran posisi yang perlu dilakukan untuk dapat menyesuaikan dengan posisi *grripper* robot. Sementara itu r adalah pergeseran titik *end-effector* robot berdasarkan rumus (titik E) terhadap titik *end-effector* robot pada penelitian ini (titik F) yaitu sebesar 0.028 m. Sehingga penyesuaian posisi ini dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.

$$x_F = x_a + x_r \tag{6}$$

$$z_F = z + z_r \tag{7}$$

Kemudian dengan menggunakan posisi yang baru ini, dapat ditentukan posisi *joint 3* robot dengan menggunakan persamaan berikut.

$$x_3 = x_F - L_4 \cos \theta_{th} \quad (8)$$

$$z_3 = z_F + L_4 \sin \theta_{th} \quad (9)$$

Sehingga dapat dituliskan persamaan untuk besar sudut *joint* 2, *joint* 3, dan *joint* 4 adalah sebagai berikut.

$$c = \sqrt{(x_3 - L_1)^2 + (z_3 - d_1)^2} \quad (10)$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - c^2}{2 L_2 L_3} \right) \quad (11)$$

$$\theta_3 = 180 - \beta_1 \quad (12)$$

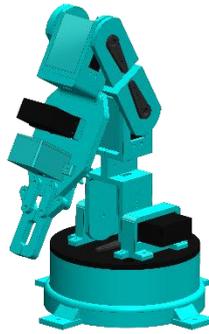
$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{(z_3 - d_1)}{(x_3 - L_1)} \right) \quad (13)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 + c^2 - L_3^2}{2 L_2 c} \right) \quad (14)$$

$$\theta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (15)$$

$$\theta_4 = \theta_2 - \theta_3 + \theta_{th} \quad (16)$$

Posisi robot yang diberikan pada penelitian ini ketika diposisikan untuk mendeteksi objek adalah ditunjukkan pada Gambar 4. Posisi ini diposisikan pada sudut *joint* masing-masing adalah : 1) $\theta_1 = 90^\circ$; 2) $\theta_2 = 90^\circ$; 3) $\theta_3 = 30^\circ$; dan 4) $\theta_4 = 120^\circ$. Posisi *joint* robot ini memperhatikan pada arah putar motor servo terhadap arah gerak robot yang diinginkan. Sebagai catatan pada penelitian ini untuk dapat memosisikan sudut *joint* robot agar dapat berlaku pada persamaan invers kinematik sebelumnya maka diperlukannya kondisi inisialisasi robot. Definisi kondisi inisialisasi pada penelitian ini adalah kondisi dimana lengan robot diposisikan pada posisi sejajar sumbu x yang dipasangkan pada sudut *joint* robot masing-masing adalah: 1) $\theta_1 = 98^\circ$; 2) $\theta_2 = 0^\circ$; 3) $\theta_3 = 0^\circ$; dan 4) $\theta_4 = 150^\circ$.



Gambar 4. Posisi Awal Robot

2.4 Deteksi Objek

Deteksi objek pada penelitian ini menggunakan konsep *computer vision* dengan bantuan *library* OpenCV dan algoritma YOLOv8 yang diterapkan ke dalam bahasa pemrograman Python. Objek yang akan dideteksi adalah komponen-komponen prototipe *belt tightener* yang terdiri dari Pully, Frame, Base, Shaft, dan Screw. *Library* OpenCV digunakan dalam deteksi objek untuk mengakses kamera ESP32-CAM dan kemudian mengimplementasikan algoritma YOLOv8 yang digunakan untuk memproses dataset objek agar dapat memberikan informasi untuk proses deteksi objek. Dataset objek adalah kumpulan-kumpulan informasi yang diperlukan dari objek yang akan dideteksi. Proses pengambilan dataset dilakukan dengan mengambil gambar objek dengan memosisikan objek pada alas ukur dengan berbagai macam kemungkinan posisi agar dapat mengurangi kemungkinan kesalahan dalam deteksi objek. Alas ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa kotak-kotak dengan ukuran 1x1 cm yang dicetak di kertas A4. Adapun total gambar yang diambil secara keseluruhan pada dataset objek penelitian ini adalah berjumlah 530 gambar dengan ukuran panjang = 640 pixel dan lebar = 480 pixel.

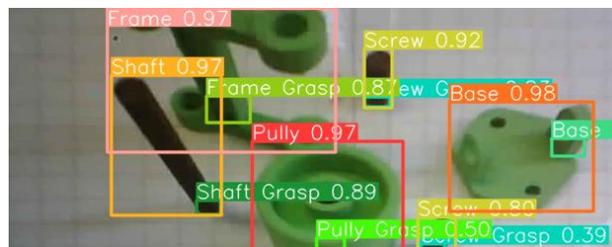
Pada kondisi posisi awal robot, *end-effector* robot diposisikan dalam keadaan tidak sejajar dengan bidang kerja robot. Sehingga pada dataset objek perlu dilakukan penyesuaian dengan posisi alas ukur agar nantinya diperoleh suatu persamaan yang dapat menghubungkan kondisi objek di dalam *frame* gambar dan kondisi sesungguhnya. Pada penelitian yang dilakukan Zeng dkk. [23] dijelaskan bahwa perlu dilakukan perubahan posisi *frame* gambar ke posisi yang sejajar dengan bidang kerja robot dimana objek akan diletakkan agar memudahkan dalam mendefinisikan posisi objek. Dalam penelitian ini melakukan proses yang dinamakan *warping* untuk dapat memosisikan seperti hal tersebut. *Warping* adalah proses mengubah perspektif gambar dimana untuk menyesuaikan posisi *frame* agar terlihat seakan-akan posisi kamera berada sejajar dengan bidang kerja (dapat dilihat pada Gambar 5). Akan tetapi dalam proses *warping* pada penelitian ini menjadikan ukuran gambar akan berkurang karena terdapat proses *cropping* untuk tidak memasukkan ujung *gripper* robot. Sebagai catatan bahwa perlu diperhatikan pada saat melakukan *warping*, peletakan titik-titik yang akan membentuk *frame* yang baru diposisikan menyesuaikan garis pada alas ukur dan untuk dapat menentukan ukuran akhir *frame* gambar adalah dengan mengambil selisih pixel gambar yang paling besar untuk masing-masing bidang *frame* gambar.



Gambar 5. Proses *Warping Frame* Kamera : (a) Sebelum *Warping*; (b) Sesudah *Warping*

Dataset objek yang telah melalui proses *warping* kemudian perlu dilakukan anotasi terlebih dahulu. Anotasi adalah proses yang dilakukan untuk memberikan label pada objek di dalam *frame* gambar yang pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan LabelImg. Anotasi tersebut dilakukan dengan mendefinisikan posisi objek sebagai sebuah kotak yang berada pada bagian sekitar objek yang akan dideteksi dan pada posisi titik *grasp* objek. Kotak pada bagian sekitar objek akan mendefinisikan posisi secara keseluruhan dari objek. Sedangkan kotak pada posisi titik *grasp* objek akan berfokus pada posisi dimana robot harus mengambil objek tersebut. Namun nantinya yang akan digunakan robot untuk mendefinisikan posisi pengambilan objek adalah berdasarkan pada posisi titik *grasp* objek seperti yang dilakukan pada penelitian Zhang dkk. [24]. Posisi titik *grasp* objek ini ditentukan dengan mempertimbangkan pada kemampuan *gripper* dalam menjepit objek dan posisi peletakan objek pada alas ukur. Sehingga dalam hal ini alas ukur memiliki peranan penting dalam menentukan titik *grasp* objek. Kemudian juga perlu ketelitian dalam melihat posisi titik *grasp* objek pada alas ukur agar nantinya tidak terjadi kesalahan robot dalam mendefinisikan posisi objek. Setelah proses anotasi ini dilakukan, dataset gambar yang telah diambil sebelumnya beserta dengan data label gambar digabung dan dimasukkan ke dalam suatu folder untuk kemudian dilakukan proses *training* dengan menggunakan YOLOv8.

Proses *training* dilakukan pada Google Colaboratory dengan membagi dataset gambar dan label gambar masing-masing ke dalam tiga bagian yaitu *train*, *test*, dan *valid* dengan porsi masing-masing adalah *train* = 70%; *test* = 10%; dan *valid* = 20% seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. [25]. Adapun hasil *training* dataset objek yang diperoleh dari algoritma YOLOv8 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil *Training* Dataset Objek

Hasil *training* dataset objek adalah informasi posisi objek dalam *frame* yang terdiri dari posisi titik-titik pembentuk kotak-kotak yang sebelumnya didefinisikan dengan proses anotasi beserta kode nama kelas. Untuk proses deteksi objek oleh robot pada penelitian ini adalah memerlukan posisi titik tengah kotak dari posisi titik *grasp* objek. Sehingga untuk dapat memperoleh titik tengah dari kotak tersebut adalah dengan menjumlahkan posisi titik ujung pada kotak di dalam bidang yang sama dan setelah itu dibagi 2.

Adapun untuk dapat mendefinisikan hubungan posisi objek di dalam *frame* kamera terhadap posisi robot, maka perlu dilakukan perhitungan dalam bentuk persamaan matematika. Sebelumnya diketahui bahwa posisi titik *grasp* objek ditentukan dengan mempertimbangkan posisi objek terhadap alas ukur. Sehingga dalam hal ini untuk mendefinisikan posisi *frame* kamera dilakukan secara langsung terhadap alas ukur yaitu dengan cara kamera robot diatur dalam kondisi yang sama dengan dataset objek yaitu dilakukan *warping*. Kemudian posisikan titik tengah *frame* kamera pada suatu titik dimana garis horizontal dari *frame* kamera yang membentuk titik tengah *frame* kamera sejajar dengan garis horizontal pada alas ukur. Begitu pula sebaliknya untuk garis vertikal masing-masing. Sehingga akan menghasilkan suatu titik yang menunjuk pada suatu posisi di alas ukur. Posisi ini kemudian yang akan menjadi acuan posisi yang menghubungkan *frame* kamera robot dan posisi robot. Berdasarkan hal tersebut, dalam penelitian ini posisi titik tengah *frame* kamera adalah berada pada titik (dalam satuan meter) $x = 0.25$ dan $y = -0.005$ dalam posisi robot. Nilai negatif pada sumbu y adalah hanya sebagai tanda bahwa posisi titik berada pada bagian sebelah kiri dari garis tengah posisi robot. Sedangkan nilai positif pada sumbu y mendefinisikan posisi objek berada pada bagian sebelah kanan dari garis tengah posisi robot. Sebagai

catatan bahwa dalam penelitian ini, definisi posisi x_{frame} adalah posisi sumbu y pada robot. Sedangkan definisi posisi y_{frame} adalah posisi sumbu x pada robot.

Selanjutnya dimulai dari titik tengah $frame$ kamera yang telah disesuaikan terhadap posisi alas ukur sebelumnya, posisikan sebuah titik masing-masing untuk garis horizontal dan vertikal dari titik tengah $frame$ kamera yang dibuat dengan menggunakan program dari OpenCV yaitu *circle*. Fungsi titik-titik ini nantinya digunakan untuk mendefinisikan persamaan yang menghubungkan setiap posisi pada $frame$ kamera terhadap posisi robot. Definisi yang digunakan untuk membentuk persamaan tersebut adalah dengan memosisikan titik-titik yang telah dibuat sebelumnya pada jarak sekitar 1 cm berdasarkan ukuran pada alas ukur terhadap titik tengah $frame$ kamera dan catat pergeseran setiap 1 cm tersebut menyebabkan berapa perubahan pixel yang terjadi di dalam $frame$ kamera. Proses ini dilakukan terus menerus dengan menggeser secara bertahap sampai titik yang dibuat keluar dari $frame$ kamera. Kemudian temukan rata-rata perubahan pixel yang terjadi tersebut. Dalam penelitian ini, diperoleh rata-rata perubahan pixel untuk garis horizontal adalah 35 pixel. Sedangkan rata-rata perubahan pixel untuk garis vertikal adalah 24 pixel. Sehingga berdasarkan hal tersebut dapat dituliskan persamaan matematika yang mendefinisikan hubungan posisi objek dalam $frame$ dan posisi robot dengan mempertimbangkan posisi titik *grasp* objek (x_{medium} & y_{medium}) terhadap titik tengah $frame$ kamera (x_{cam} & y_{cam}) adalah sebagai berikut.

a. $y_{medium} < y_{cam}$

$$x_{pos} = 0.25 + (((y_{cam} - y_{medium}) / 24) / 100) \quad (17)$$

b. $y_{medium} > y_{cam}$

$$x_{pos} = 0.25 - (((y_{medium} - y_{cam}) / 24) / 100) \quad (18)$$

c. $x_{medium} < x_{cam}$

$$y_{pos} = -0.005 - (((x_{cam} - x_{medium}) / 35) / 100) \quad (19)$$

d. $x_{medium} > x_{cam}$

$$y_{pos} = (((x_{medium} - x_{cam}) / 35) / 100) - 0.005 \quad (20)$$

Posisi objek dalam posisi robot didefinisikan dengan x_{pos} dan y_{pos} . Adapun untuk nilai titik tengah $frame$ kamera adalah 314 pixel untuk x_{frame} dan 123 pixel y_{frame} . Nilai 100 digunakan untuk mengonversikan nilai centimeter dari perubahan pergeseran pixel sebelumnya ke dalam satuan meter.

2.5 Konsep Kolaborasi Robot dan Manusia

Untuk dapat berjalannya konsep kolaborasi robot dan manusia, perlu dilakukan definisi terlebih dahulu terhadap ruang kerja antara robot dan manusia. Pada penelitian ini posisi manusia (*user*) berada di samping robot. Sedangkan objek yang akan diambil oleh robot berada di depan robot. Adapun definisi ruang kerja pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Ruang Kerja Robot dan Manusia

Pada Gambar 7 dapat dilihat pada penelitian ini, posisi robot berada di atas meja dan tepat di depan *user* dimana nantinya proses *material handling* akan dilakukan pada ruang kerja di antara keduanya. Untuk memulai konsep kolaborasi, objek diletakkan di depan robot yang merupakan gambaran apabila diterapkan pada industri sesungguhnya

objek ini berasal dari *workstation* yang lain atau dari pekerja yang lain. Sehingga peletakan objek tersebut tidak terkait dengan *user*. Selanjutnya, apabila objek terdeteksi pada kamera robot, robot akan bergerak mengambil objek tersebut dan meneruskannya ke posisi *user*. Namun setelah berada pada posisi *user*, robot tidak akan langsung memberikan objek. Akan tetapi, robot akan menunggu perintah dari *user* terlebih dahulu untuk memberikan objek. Perintah yang diberikan oleh *user* kepada robot untuk memberikan objek adalah dengan menggunakan gerak isyarat tangan yang nantinya setelah menerima perintah tersebut robot akan memberikan objek tersebut kepada *user* pada titik yang telah ditentukan. Adapun tahapan-tahapan tersebut dapat dilihat secara lengkap pada Gambar 8.

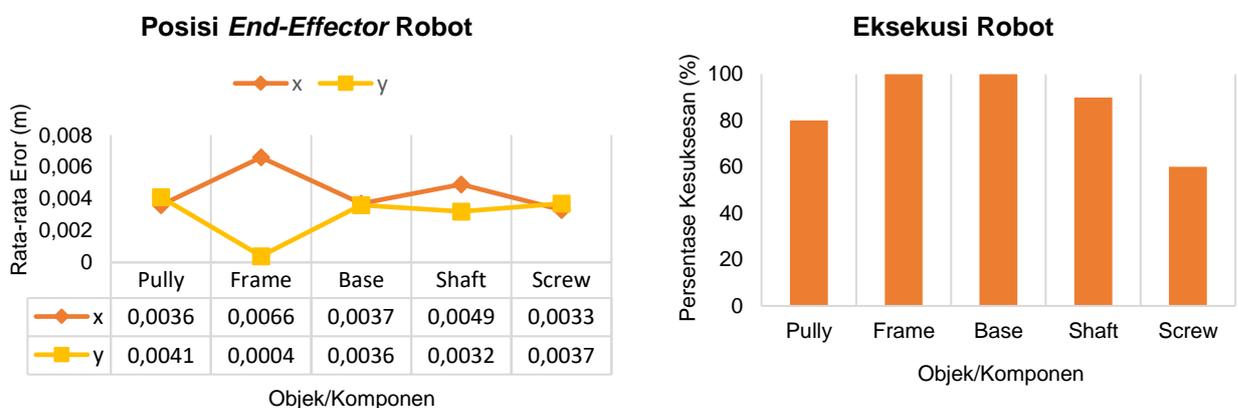


Gambar 8. Tahapan Kolaborasi Robot dan Manusia

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Robot dalam Mengambil Objek

Pengujian robot dalam mengambil objek dilakukan dengan alas ukur. Hal ini bertujuan untuk memvalidasi persamaan sebelumnya yang mendefinisikan posisi objek dalam *frame* kamera terhadap posisi objek dalam posisi robot dan menguji kemampuan robot dalam memprediksi posisi pengambilan objek. Pengujian ini dilakukan sebanyak 10 kali terhadap kondisi objek yang diposisikan pada posisi acak di dalam *frame* kamera robot dan dituliskan dengan persentase kesuksesan prediksi pengambilan objek dan pengambilan objek sesungguhnya oleh robot dengan mempertimbangkan terhadap titik-titik yang telah ditentukan (dalam satuan meter) yaitu: 1) $x = 0.25, y = -0.005$; 2) $x = 0.22, y = -0.005$; 3) $x = 0.27, y = -0.005$; 4) $x = 0.25, y = -0.02$; 5) $x = 0.25, y = 0.02$; 6) $x = 0.23, y = -0.05$; 7) $x = 0.24, y = 0.05$; 8) $x = 0.26, y = -0.06$; 9) $x = 0.27, y = 0.05$; dan 10) $x = 0.27, y = -0.04$. Selanjutnya untuk dapat mengetahui akurasi robot dalam mendeteksi posisi pengambilan objek, dilakukan dengan menggabungkan persamaan invers kinematik pada persamaan (1) s/d (16) dan persamaan posisi objek pada persamaan (17) s/d (20). Informasi terkait titik tengah dari posisi titik *grasp* objek digunakan sebagai posisi di dalam *frame* kamera yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan posisi objek untuk mendapatkan posisi objek dalam posisi robot. Adapun posisi objek tersebut dimasukkan ke dalam persamaan invers kinematik untuk dapat memperoleh besar sudut setiap *joint* robot yang akan diimplementasikan ke dalam gerak robot mengambil objek. Adapun hasil pengujian robot dalam mengambil objek dapat dilihat pada grafik Gambar 9.



Gambar 9. Hasil Pengujian Robot dalam Mengambil Objek

Pada grafik Gambar 9 dapat dilihat bahwa diperoleh hasil pengujian robot dalam mengambil objek yaitu dalam hasil prediksi dan eksekusi robot. Hasil prediksi diperoleh dari posisi yang dihasilkan oleh perhitungan pada program robot yang dituliskan untuk bidang x dan y. Kemudian perhitungan program robot tersebut dibandingkan dengan posisi yang telah ditentukan sebelumnya. Hasil dari perbandingan keduanya adalah berupa error yang dituliskan untuk bidang x dan y. Untuk memperoleh nilai error gerak robot dalam mengambil objek maka dilakukan perhitungan rata-rata error pada setiap komponen. Selanjutnya dari nilai rata-rata error setiap komponen dirata-ratakan kembali untuk menemukan error secara keseluruhan dari gerak robot dalam mengimplementasikan konsep pada penelitian ini. Adapun untuk eksekusi robot dalam mengambil objek dipertimbangkan berdasarkan keberhasilan robot untuk mencapai posisi objek dan mengangkutnya.

Berdasarkan pada grafik Gambar 9 diketahui bahwa nilai error yang dihasilkan oleh setiap objek berbeda-beda dan menghasilkan error rata-rata keseluruhan adalah sekitar 0.0044 untuk sumbu x dan 0.0037 untuk sumbu y. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi penempatan titik tengah *frame* terhadap alas ukur, kondisi pada saat melakukan anotasi objek, persamaan dalam mendefinisikan posisi *frame* kamera terhadap posisi robot, dan akurasi deteksi objek. Kondisi penempatan titik tengah *frame* pada alas ukur menyangkut pada *repeatability* robot yang dalam hal ini robot yang digunakan pada penelitian ini memiliki *repeatability* yang sangat kurang karena kondisi aktuator yang digunakan. Sementara itu, pada penelitian ini untuk dapat menjalankan konsep yang diajukan memerlukan kondisi pada saat robot akan mengambil objek yang sama dengan dataset yang digunakan. Adapun jika dipertimbangkan terhadap kondisi saat melakukan anotasi objek, hal ini berkaitan dengan pengaruh perspektif kamera yang mengharuskan untuk menjaga konsistensi dalam meletakkan posisi titik *grasp* objek. Pada persamaan dalam mendefinisikan posisi *frame* kamera terhadap posisi robot adalah berkaitan dengan kemungkinan perubahan yang tidak menentu setiap pergeseran 1 cm pada bidang kerja terhadap bidang *frame* kamera sebagai akibat posisi kamera yang bergeser dari kondisi saat mendefinisikan posisi *frame* terhadap posisi robot. Sedangkan jika dipertimbangkan dengan akurasi deteksi objek oleh algoritma YOLO, hal ini terkait dengan kurangnya informasi yang dapat diterima oleh algoritma YOLO untuk dapat menyimpulkan posisi objek sebenarnya. Sehingga hal-hal tersebut menjadi pertimbangan yang sangat penting untuk dapat mengurangi nilai error yang terjadi. Sedangkan untuk eksekusi robot dihasilkan persentase kesuksesan robot dalam mengambil objek adalah sebesar 86%. Hal ini menunjukkan bahwa robot memiliki kemampuan yang baik dalam menerapkan konsep yang digunakan pada penelitian ini.

Adapun hasil pengujian tersebut apabila dibandingkan pada penelitian terdahulu yang dilakukan Rakshit dkk. [9] yang memiliki persentase kesuksesan robot yaitu 97.8%, penelitian yang dilakukan Zhang dkk. [24] dengan persentase kesuksesan 92.5%, serta pada penelitian yang dilakukan Mousavian dkk. [26] dengan persentase kesuksesan 88%, pada penelitian yang dilakukan penulis memiliki persentase yang mendekati penelitian-penelitian tersebut. Perbedaan dalam penggunaan jenis kamera dan robot yang digunakan menjadi indikator-indikator yang menyebabkan perbedaan persentase yang dihasilkan tersebut. Adapun penggunaan jenis kamera pada penelitian-penelitian tersebut yang menggunakan RGB-D *camera* menjadikan parameter kedalaman dimasukkan pada pertimbangan deteksi objek dalam proses pengambilan objek. Sementara itu, pada penelitian yang dilakukan penulis yang hanya menggunakan RGB *camera* tidak dapat memperoleh parameter tersebut. Berdasarkan pada robot yang digunakan, hal ini tentunya adalah berkaitan pada tingkat kepresisian robot.

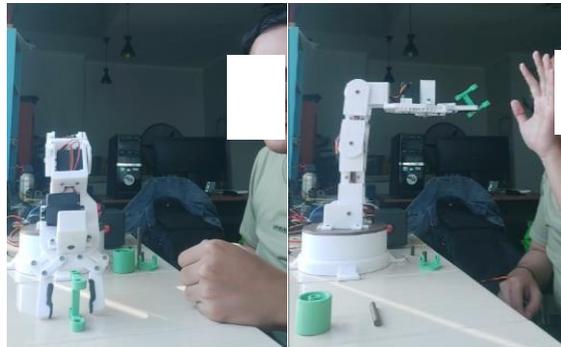
3.2 Pengujian Kolaborasi Robot dan Manusia

Pengujian kolaborasi robot dan manusia dilakukan dengan pengujian terhadap tingkat keberhasilan robot dan keamanan dalam penggunaan robot. Tingkat keberhasilan robot adalah berkaitan dengan bagaimana proses robot dalam menjalankan kolaborasi dari awal sampai akhir terhadap kondisi pengambilan objek yang didefinisikan dengan posisi objek secara acak dan tanpa alas ukur yang dilakukan dengan pengujian sebanyak 10 kali dengan indikator yang diuji adalah kesuksesan robot dalam bentuk persentase. Adapun dari 10 kali pengujian tersebut nantinya akan dilakukan 5 kali pengujian dengan meletakkan objek satu per satu dimana objek diletakkan hanya setelah robot berada pada posisi mendeteksi objek. Sedangkan 5 kali pengujian yang lain dilakukan dengan meletakkan objek secara terus menerus dimana tidak peduli apakah robot masih berjalan untuk mengantarkan objek ataupun sedang mengambil objek, objek yang lain langsung diletakkan pada bidang kerja.

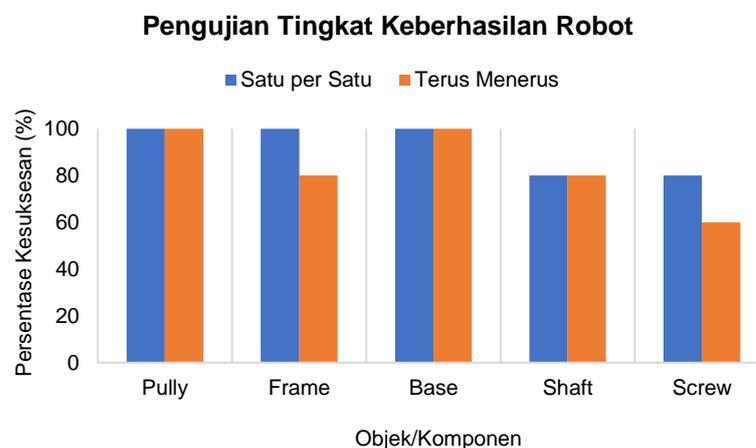
Sementara itu, keamanan dalam penggunaan robot adalah berkaitan dengan bagaimana respons yang terjadi pada robot apabila pada saat menjalankan kolaborasi, *user* secara tidak sengaja menghalangi gerak robot yang menyebabkan terjadinya tabrakan. Untuk melakukan pengujian terhadap keamanan penggunaan robot sebelumnya perlu dilakukan modifikasi terhadap motor servo yang digunakan. Hal ini dikarenakan untuk kondisi prototipe robot yang digunakan tidak memungkinkan untuk dipasangkan sensor tambahan yang dapat digunakan untuk memberikan informasi ketidaksesuaian yang terjadi pada gerak robot dan aktuator yang digunakan karena tidak memiliki fitur yang dapat memberikan informasi terkait kondisi aktuator. Pada umumnya yang sering digunakan untuk sistem keamanan pada robot kolaboratif adalah dengan sensor torsi menyatu pada aktuator yang digunakan seperti pada penelitian Al-Yacoub dkk. [27] dan Roveda dkk. [28]. Namun karena dalam penelitian ini menggunakan sebuah prototipe robot dengan ukuran kecil dan torsi yang dimiliki oleh aktuator yang tidak besar maka sistem keamanan hanya diasumsikan berdasarkan kondisi yang menyebabkan ketidaksesuaian posisi sudut pada aktuator akibat adanya tabrakan. Sehingga apabila robot yang dirancang dengan ukuran yang besar dan torsi aktuator yang besar, tidak dianjurkan mengikuti konsep pada penelitian ini.

3.2.1 Tingkat Keberhasilan Robot

Pada pengujian kolaborasi robot dan manusia terhadap tingkat keberhasilan robot dimulai dari kondisi robot saat mendeteksi objek sampai dengan robot memberikan objek tersebut kepada *user* pada kondisi posisi objek acak dan tanpa alas ukur seperti yang terlihat pada Gambar 10. Adapun hasil pengujian tingkat keberhasilan robot tersebut dapat dilihat pada grafik Gambar 11.



Gambar 10. Pengujian Tingkat Keberhasilan Robot



Gambar 11. Hasil Pengujian Tingkat Keberhasilan Robot

Berdasarkan pada grafik Gambar 11 diketahui bahwa dalam eksekusi robot untuk menjalankan kolaborasi menghasilkan persentase kesuksesan robot dalam mengambil objek adalah sebesar 92% untuk peletakan objek secara satu per satu dan 84% untuk peletakan objek secara terus menerus. Kondisi ini memiliki pengaruh yang sama dengan permasalahan pada kondisi robot saat mengambil objek sebelumnya karena apabila robot setelah melalui proses pengambilan objek dan berhasil maka juga akan berhasil untuk menjalankan kolaborasi pada penelitian ini. Sehingga dengan memastikan bahwa robot mampu dengan tepat dalam mengambil objek maka kolaborasi dapat dijalankan dengan baik. Namun perlu diperhatikan juga bahwa untuk memastikan pada saat robot siap untuk menerima instruksi, objek tidak menutupi kamera yang digunakan agar robot dapat menerima instruksi dari gerak isyarat tangan yang diberikan.

Apabila dibandingkan dengan penerapan kolaborasi robot dan manusia pada penelitian-penelitian terdahulu yaitu seperti pada penelitian yang dilakukan Akkaladevi dkk. [2], Christen dkk. [29], dan Mousavian dkk. [26] menggunakan metode *reinforcement learning* serta penelitian yang dilakukan Tsamis dkk. [3] menambahkan AR *Glasses* sebagai media komunikasi robot dengan manusia menjadikan proses perencanaan konsep kolaborasi lebih kompleks. Penelitian yang dilakukan Vogel dkk. [5] menggunakan metode proyeksi dengan sebuah proyektor serta Sanchez-Matilla dkk. [7] menggunakan dua buah RGB *camera* yang menjadikan proses perencanaan kolaborasi memerlukan peralatan tambahan selain sebuah kamera. Sehingga konsep kolaborasi pada penelitian ini dapat dikatakan konsep paling sederhana yang dapat diterapkan yaitu tanpa memerlukan banyak proses yang kompleks, serta tanpa menggunakan berbagai peralatan tambahan selain sebuah kamera.

3.2.2 Keamanan dalam Penggunaan Robot

Pengujian keamanan dalam penggunaan robot didefinisikan sebagai pengujian robot pada saat menjalankan kolaborasi dengan memberikan gangguan yaitu menahan gerak dari aktuator robot terhadap asumsi dampak yang diterima oleh *user* apabila dalam hal ini tabrakan yang terjadi merupakan suatu unsur ketidaksengajaan (dapat dilihat pada Gambar

12). Hasil pengujian yang diperoleh pada sistem keamanan robot yang diterapkan pada penelitian ini pada saat berjalannya kolaborasi adalah cukup baik untuk dapat menanggulangi apabila terjadinya tabrakan antara robot dan *user*. Pada pengujian yang dilakukan, menahan gerak dari aktuator membuat kondisi sesungguhnya menjadi diam. Sementara itu, *input* program akan terus berjalan. Sehingga kondisi tersebut menyebabkan terjadinya perbedaan besar sudut yang kemudian memberikan perintah kepada robot untuk menghentikan program robot.



Gambar 12. Pengujian Keamanan Penggunaan Robot

Adapun apabila membandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu yaitu seperti pada penelitian Sun dkk. [15] yang menggunakan pertimbangan terhadap perhitungan dinamika robot. Penelitian tersebut dapat lebih detail menampilkan pengaruh yang diberikan dari kondisi tabrakan yang terjadi dalam perhitungan matematika. Akan tetapi kondisi tersebut kemudian akan menjadi rumit pada berbagai kondisi setiap robot yang berbeda-beda. Penelitian Pang dkk. [16] menggunakan sensor yang dipasangkan pada bagian luar tubuh robot. Konsep tersebut dapat dikatakan efektif untuk mengurangi adanya perhitungan yang terkait dinamika robot dan sekaligus dapat mengurangi dampak secara fisik akibat benturan. Namun seperti tidak mungkin untuk dapat memasang sensor menyelimuti seluruh bagian robot, mengingat robot bergerak dinamis yang dikhawatirkan sensor tersebut dapat mengganggu gerak robot. Penelitian Vogel dkk. [20] menggunakan proyektor dan beberapa kamera yang digunakan untuk menghasilkan proyeksi cahaya dan mendeteksi cahaya tersebut sebagai media pendefinisian ruang kerja yang aman. Kondisi tersebut secara langsung mudah untuk dilihat oleh *user* apabila *user* bekerja melewati garis batas kerja yang telah ditentukan dan tidak melibatkan perhitungan yang rumit. Akan tetapi proses pengaturan akan menjadi sulit apabila kondisi ruangan tidak dapat memenuhi kondisi yang diharuskan untuk berjalannya konsep tersebut. Penelitian Chen dkk. [17], Dianatfar dkk. [18], dan Hietanen dkk. [19] menggunakan AR Glasses untuk menyediakan tampilan secara virtual terkait dengan sistem keamanan yang diberikan. Adapun penggunaan AR Glasses tersebut tentunya dapat memudahkan komunikasi dengan robot dalam bentuk instruksi visual secara langsung kepada *user*. Sehingga bahkan sebelum terjadinya tabrakan sistem dapat memberikan notifikasi kepada *user* sebagai bentuk peringatan. Namun dengan kemampuan-kemampuan tersebut menyebabkan proses pengaturan akan menjadi sulit dan lebih lama. Oleh karena itu, pada penelitian ini memberikan alternatif yang lebih mudah untuk diimplementasikan yaitu tanpa perhitungan yang rumit dan penambahan peralatan lainnya, serta pengaturan yang lebih mudah.

3.3 Evaluasi Kerja

Berdasarkan uraian pengujian-pengujian sebelumnya diperoleh bahwa prototipe robot kolaboratif sukses untuk dapat menjalankan kolaborasi dengan manusia yang diterapkan pada penelitian ini untuk proses *material handling* namun dengan beberapa catatan sebagai bahan pertimbangan dan evaluasi. Sebelumnya pada bagian 1 telah disebutkan bahwa pada penelitian ini berfokus pada bagaimana memberikan suatu rancangan robot kolaboratif yang dapat diterapkan pada berbagai jenis *robot manipulator* dengan kemudahan dalam hal pengaturan dan penggunaan pada konsep kolaborasi robot dan manusia. Rancangan yang diberikan dibuat dengan sederhana bukan hanya dari robot yang digunakan, akan tetapi juga dari komponen-komponen pendukung yang digunakan seperti kamera, posisi deteksi, dan lain sebagainya. Hal ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran bahwa pada kondisi tersebut tentunya pada jenis *robot manipulator* dapat menerapkan konsep yang sama. Sehingga berdasarkan pada hasil yang diperoleh sebelumnya, dapat dipertimbangkan hal-hal berikut yaitu apabila dilihat dari sisi robot yang digunakan akan dipengaruhi oleh kepresisian robot dalam mengambil objek dan kondisi *repeatability*. Sedangkan dilihat dari sisi penggunaan kamera pada penelitian ini yang hanya menggunakan kamera RGB biasa menyebabkan kondisi yang memungkinkan untuk posisi objek yang didefinisikan adalah hanya pada sumbu x dan y. Sedangkan untuk sumbu z adalah bernilai tetap. Hal ini dikarenakan penyesuaian yang dilakukan dengan metode *warping* hanya berlaku untuk bidang kerja itu sendiri. Sedangkan untuk objek akan tetap terpengaruh oleh perspektif kamera yang menyebabkan posisi objek pada sumbu z akan sulit didefinisikan. Sementara itu, dilihat dari kondisi awal saat mendeteksi objek, pada penelitian ini hanya digunakan satu kondisi, yang apabila kondisi deteksi objek lebih dari satu maka konsep ini tidak dapat digunakan karena nantinya akan berpengaruh pada algoritma deteksi objek yang kemungkinan dapat menyebabkan kondisi deteksi yang tidak tepat untuk pengambilan objek.

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengujian robot kolaboratif pada penelitian ini, robot memiliki eror yang disebabkan oleh kepresisian robot yang digunakan, kondisi penempatan titik tengah *frame* terhadap alas ukur, kondisi pada saat melakukan anotasi objek, persamaan dalam mendefinisikan posisi *frame* kamera terhadap posisi robot, dan akurasi deteksi objek seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Sebagai bahan evaluasi untuk mengatasi permasalahan kepresisian robot dan kondisi penempatan titik tengah *frame* adalah dengan menggunakan robot yang memiliki kepresisian yang tinggi atau menggunakan aktuator yang lebih bagus sehingga pada saat robot mengambil objek lebih akurat dan pada saat robot kembali pada posisi mendeteksi objek tidak terjadi pergeseran pada *frame* kamera dari kondisi saat mendefinisikan posisi *frame* terhadap posisi robot. Sedangkan untuk mengatasi permasalahan kondisi anotasi objek adalah dengan membuat dataset objek yang sebelumnya sudah ditentukan posisi peletakan objek yang nantinya akan diletakkan titik *grasp* objek terhadap alas ukur sehingga pada saat melakukan anotasi dapat dengan tepat meletakkan titik *grasp* objek pada titik yang telah ditentukan pada posisi peletakan tersebut. Adapun pada persamaan dalam mendefinisikan posisi *frame* kamera terhadap posisi robot yang disebabkan karena tidak konsistennya perubahan yang terjadi pada pergeseran titik di dalam *frame*, maka persamaan seperti yang dilakukan pada penelitian ini tidak dapat digunakan. Sebagai pengganti, untuk membuat persamaan yang mendefinisikan posisi *frame* dapat menggunakan konsep *machine learning* seperti *decision tree* atau *linear regression*. Sementara itu, pada masalah akurasi deteksi objek dapat diatasi dengan memberikan informasi yang lebih spesifik terkait posisi pengambilan objek yang memiliki ciri khas tertentu agar mempermudah algoritma deteksi objek untuk menyimpulkan posisi objek.

Adapun terkait pertimbangan terhadap keamanan dalam penggunaan robot, konsep yang diterapkan pada penelitian ini dapat digunakan dengan catatan bahwa robot yang digunakan tidak memiliki ukuran yang besar dan torsi yang dimiliki oleh aktuator robot tidak besar. Sehingga tidak menimbulkan risiko yang besar terhadap *user* pada saat berkolaborasi dengan robot. Namun sebagai pengganti apabila digunakan pada robot dengan ukuran yang besar atau memiliki torsi aktuator yang besar yaitu dapat dengan mengganti indikator yang dipertimbangkan yaitu yang sebelumnya dari perbedaan sudut *input* dan *output* menjadi perubahan besar torsi antara perhitungan perencanaan dan kenyataan yang terjadi. Sehingga kondisi tersebut juga menghasilkan kondisi yang dapat didefinisikan oleh robot sebagai perintah untuk menghentikan program.

4. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah rancangan robot kolaboratif yang diterapkan pada proses *material handling* pada penelitian ini memiliki kemampuan robot untuk dapat secara mandiri melakukan proses menggenggam komponen dengan posisi acak pada ruang kerja yang diterapkan dengan konsep kolaborasi, sehingga menghasilkan persentase keberhasilan robot dalam menggenggam objek sebesar 92% untuk peletakan objek satu per satu dan 84% untuk peletakan objek secara terus menerus. Sementara itu, keamanan dalam penggunaan robot pada penelitian ini menghasilkan sistem yang cukup baik untuk dapat mengatasi jika terjadi tabrakan antara robot dengan pengguna. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penelitian kami dapat dikatakan sebagai konsep yang paling sederhana yang dapat diaplikasikan, yaitu tanpa memerlukan banyak proses yang rumit, perhitungan yang rumit, dan penggunaan berbagai peralatan tambahan selain sebuah kamera. Oleh karena itu, penelitian kami dapat memastikan kemudahan pengaturan dan penggunaan untuk *user*.

Daftar Pustaka

- [1] P. Segura, O. Lobato-Calleros, A. Ramírez-Serrano, dan I. Soria, "Human-robot collaborative systems: Structural components for current manufacturing applications," *Adv. Ind. Manuf. Eng.*, vol. 3, hlm. 100060, Nov 2021, doi: 10.1016/j.aime.2021.100060.
- [2] S. C. Akkaladevi, M. Plasch, A. Pichler, dan M. Ikeda, "Towards Reinforcement based Learning of an Assembly Process for Human Robot Collaboration," *Procedia Manuf.*, vol. 38, hlm. 1491–1498, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.138.
- [3] G. Tsamis dkk., "Intuitive and Safe Interaction in Multi-User Human Robot Collaboration Environments through Augmented Reality Displays," dalam *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, Agu 2021, hlm. 520–526. doi: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515474.
- [4] K. Lotsaris dkk., "Augmented Reality (AR) based framework for supporting human workers in flexible manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 96, hlm. 301–306, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.091.
- [5] C. Vogel, C. Walter, dan N. Elkmann, "Safeguarding and Supporting Future Human-robot Cooperative Manufacturing Processes by a Projection- and Camera-based Technology," *Procedia Manuf.*, vol. 11, hlm. 39–46, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.127.

- [6] L. Paletta dkk., “Gaze-based Human Factors Measurements for the Evaluation of Intuitive Human-Robot Collaboration in Real-time,” dalam *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain: IEEE, Sep 2019, hlm. 1528–1531. doi: 10.1109/ETFA.2019.8869270.
- [7] R. Sanchez-Matilla dkk., “Benchmark for Human-to-Robot Handovers of Unseen Containers With Unknown Filling,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, hlm. 1642–1649, Apr 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2969200.
- [8] N. Horňáková, L. Jurík, H. Hrablík Chovanová, D. Cagaňová, dan D. Babčanová, “AHP method application in selection of appropriate material handling equipment in selected industrial enterprise,” *Wirel. Netw.*, vol. 27, no. 3, hlm. 1683–1691, Apr 2021, doi: 10.1007/s11276-019-02050-2.
- [9] A. Rakshit, S. Pramanick, A. Bagchi, dan S. Bhattacharyya, “Autonomous grasping of 3-D objects by a vision-actuated robot arm using Brain–Computer Interface,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 84, hlm. 104765, Jul 2023, doi: 10.1016/j.bspc.2023.104765.
- [10] P. Rosenberger dkk., “Object-Independent Human-to-Robot Handovers Using Real Time Robotic Vision,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 6, no. 1, hlm. 17–23, Jan 2021, doi: 10.1109/LRA.2020.3026970.
- [11] R. S. Andersen, O. Madsen, T. B. Moeslund, dan H. B. Amor, “Projecting robot intentions into human environments,” dalam *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, New York, NY, USA: IEEE, Agu 2016, hlm. 294–301. doi: 10.1109/ROMAN.2016.7745145.
- [12] D. Park, Y. Seo, D. Shin, J. Choi, dan S. Y. Chun, “A Single Multi-Task Deep Neural Network with Post-Processing for Object Detection with Reasoning and Robotic Grasp Detection.” arXiv, 16 September 2019. Diakses: 25 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/1909.07050>
- [13] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, dan G. Hirzinger, “Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing”.
- [14] G. Michalos, S. Makris, P. Tsarouchi, T. Guasch, D. Kontovrakis, dan G. Chryssolouris, “Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces,” *Procedia CIRP*, vol. 37, hlm. 248–253, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.014.
- [15] Y. Sun, M. Van, S. McIlvanna, S. McLoone, dan D. Ceglarek, “Adaptive Admittance Control for Safety-Critical Physical Human Robot Collaboration.” arXiv, 9 Agustus 2022. Diakses: 25 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/2208.05061>
- [16] G. Pang, J. Deng, F. Wang, J. Zhang, Z. Pang, dan G. Yang, “Development of Flexible Robot Skin for Safe and Natural Human–Robot Collaboration,” *Micromachines*, vol. 9, no. 11, hlm. 576, Nov 2018, doi: 10.3390/mi9110576.
- [17] J. Chen, Y. Fu, W. Lu, dan Y. Pan, “Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health,” *J. Environ. Manage.*, vol. 348, hlm. 119341, Des 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119341.
- [18] M. Dianatfar, J. Latokartano, dan M. Lanz, “Concept for Virtual Safety Training System for Human-Robot Collaboration,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, hlm. 54–60, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.009.
- [19] A. Hietanen, R.-J. Halme, J. Latokartano, R. Pieters, M. Lanz, dan J.-K. Kamarainen, “Depth-sensor–projector safety model for human-robot collaboration”.
- [20] C. Vogel, C. Walter, dan N. Elkmann, “A projection-based sensor system for safe physical human-robot collaboration,” dalam *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan: IEEE, Nov 2013, hlm. 5359–5364. doi: 10.1109/IROS.2013.6697132.
- [21] G. R. Cahyono, Nurmahaludin, M. F. Setiawan, Y. Rizal, dan J. Riadi, “Comparison of 4 DOF Arm Robot for Trajectory Planning with 3rd and 5th Polynomial Orders,” dalam *2022 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Malang, Indonesia: IEEE, Agu 2022, hlm. 281–286. doi: 10.1109/EECCIS54468.2022.9902924.
- [22] H. H. Asada, “Introduction to Robotics”, 2.12 Lecture Notes, 2005.
- [23] A. Zeng, S. Song, S. Welker, J. Lee, A. Rodriguez, dan T. Funkhouser, “Learning Synergies between Pushing and Grasping with Self-supervised Deep Reinforcement Learning.” arXiv, 30 September 2018. Diakses: 25 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/1803.09956>

- [24] H. Zhang, X. Lan, S. Bai, X. Zhou, Z. Tian, dan N. Zheng, "ROI-based Robotic Grasp Detection for Object Overlapping Scenes." arXiv, 13 Maret 2019. Diakses: 25 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/1808.10313>
- [25] Z. Wang, Y. Liu, S. Duan, dan H. Pan, "An efficient detection of non-standard miner behavior using improved YOLOv8," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 112, hlm. 109021, Des 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.109021.
- [26] A. Mousavian, C. Eppner, dan D. Fox, "6-DOF GraspNet: Variational Grasp Generation for Object Manipulation." arXiv, 16 Agustus 2019. Diakses: 25 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/1905.10520>
- [27] A. Al-Yacoub, Y. C. Zhao, W. Eaton, Y. M. Goh, dan N. Lohse, "Improving human robot collaboration through Force/Torque based learning for object manipulation," *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 69, hlm. 102111, Jun 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102111.
- [28] L. Roveda, L. Mantovani, M. Maccarini, F. Braghin, dan D. Piga, "Optimal physical human-robot collaborative controller with user-centric tuning," *Control Eng. Pract.*, vol. 139, hlm. 105621, Okt 2023, doi: 10.1016/j.conengprac.2023.105621.
- [29] S. Christen, W. Yang, C. Pérez-D'Arpino, O. Hilliges, D. Fox, dan Y.-W. Chao, "Learning Human-to-Robot Handovers from Point Clouds." arXiv, 30 Maret 2023. Diakses: 25 Februari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://arxiv.org/abs/2303.17592>