

# Sistem Penentuan Lokasi Objek Target Untuk Manipulator Lengan Robot Berbasis Sensor Penglihatan Biaya Rendah

<sup>1</sup>Justin S. Budiman, <sup>1</sup>Radifsya L. Desvabrahma, <sup>1</sup>Idham H. Ayega, & <sup>1</sup>Tua A. Tamba\*)

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

\*)Penulis korespondensi: ttamba@unpar.ac.id

## Abstrak

Pengembangan manipulator lengan robot cerdas yang fleksibel dan otonom serta dapat berinteraksi dengan lingkungan ruang kerjanya merupakan tantangan mendasar dalam studi dan penelitian robotika. Agar dapat melakukan tugasnya dengan baik, suatu manipulator lengan robot memerlukan sinyal masukan berupa informasi persepsional terkait lingkungan dan bidang kerjanya yang diperoleh dengan menggunakan berbagai jenis sensor. Sinyal masukan tersebut selanjutnya digunakan dalam skema sistem kontrol umpan balik untuk menghasilkan sinyal kontrol yang dapat memastikan robot bergerak secara tepat dan sesuai dengan tujuan operasionalnya. Makalah ini memaparkan metode deteksi objek target dan desain sistem kontrol umpan balik berbasis sensor penglihatan (kamera) biaya rendah. Proses deteksi dan kontrol ini ditujukan untuk menggerakkan *end-effector* dari suatu purwarupa lengan robot dari posisi awal ke posisi akhir referensi tertentu. Deteksi objek dilakukan dengan menggunakan kamera *Pixy2 Cmcum5* yang dilengkapi dengan modul khusus pengolahan citra yang memungkinkannya untuk mendeteksi pola tertentu pada objek target. Dengan menggunakan analisis dan desain berbasis metode kinematika balik (*inverse kinematics*), informasi posisi awal objek target yang diperoleh kamera digunakan sebagai umpan balik untuk mengontrol pergerakan *end-effector* menuju posisi referensi yang diinginkan. Hasil eksperimen metode deteksi dan desain pengontrol dipaparkan pada makalah ini untuk mengilustrasikan keefektifan metode yang dikembangkan.

**Kata Kunci:** *manipulator lengan robot; end-effector; localization; kinematika; sensor kamera*

## 1 Pendahuluan

Manipulator lengan robot merupakan sistem elektro-mekanik yang dirancang untuk melakukan pergerakan menyerupai gerakan lengan manusia. Manipulator ini secara umum terdiri dari beberapa *link* yang satu sama lain terhubung oleh engsel atau *joint* sebagai aktuator gerak translasi dan/atau rotasi [1]. Berbagai aplikasi manipulator lengan robot telah banyak dijumpai di berbagai jenis industri yang pengoperasiannya melibatkan rangkaian proses sekuensial dan/atau berulang untuk peningkatan efisiensi dan performansi produksi. Pada era Industri 4.0 saat ini, penggunaan manipulator lengan robot sebagai salah satu komponen sistem otomasi industri menjadi aspek teknologi yang semakin gencar untuk dikembangkan lebih lanjut [2].

Robot cerdas dan fleksibel yang mampu berinteraksi secara aktif dan mandiri dengan lingkungan kerjanya merupakan objektif mendasar pada penelitian dan desain robotika. Karakteristik objektif desain tersebut didasarkan pada visi untuk menggunakan robot sebagai alat bantu di berbagai bidang aplikasi yang mencakup sistem manufaktur otomatis, penanganan bencana, otomasi fasilitas perumahan, dll. Salah satu tantangan utama dalam mewujudkan visi tersebut adalah sulitnya merancang sistem “persepsi” dan “kognisi” otonom buatan yang akan memberikan robot kemampuan untuk memahami lingkungan kerja, membuat keputusan, dan melakukan aksi yang tepat dan sesuai dengan tujuan operasionalnya. Saat ini, desain sistem persepsi berbasis sensor visual yang bebas kontak dengan biaya rendah seperti kamera dipandang sebagai salah satu solusi potensial dalam pengembangan teknologi robotika.

Agar dapat melakukan tugasnya dengan baik, robot memerlukan sinyal masukan (*input*) berisi informasi terkait lingkungan dan bidang kerjanya. Sinyal masukan tersebut selanjutnya digunakan dalam sistem kontrol umpan balik untuk memastikan robot dapat bergerak secara tepat dan sesuai dengan tujuan operasionalnya. Pada robot dengan sistem persepsi visual, sinyal masukan yang dimaksud merupakan data gambar (*image*) objek target yang ditangkap oleh suatu kamera yang diletakkan misalnya pada *end-effector* lengan robot. Data gambar objek tersebut kemudian di proses menjadi data koordinat posisi dan orientasi (*pose*) objek relatif terhadap pose kamera. Dalam hal ini, sinyal kontrol umpan balik kemudian digunakan untuk meminimumkan perbedaan antara pose aktual *end-effector* dengan pose referensi yang diinginkan.

Hingga kini terdapat berbagai penelitian dan literatur terkait implementasi sensor kamera untuk penentuan lokasi dan pengontrolan manipulator robot [2-10]. Sebagai contoh, [2] menggunakan sensor kamera untuk menentukan perubahan posisi tiga dimensi lengan robot fleksibel ketika melakukan gerak peregangan dan pemampatan. Pada [3] dikembangkan metode *forward kinematics* pada suatu manipulator lengan robot yang dilengkapi kamera untuk meminimumkan sudut aktual dan referensi dari robot. Pada [4] dan [5], metode pengenalan dan *tracking* objek gambar oleh lengan robot yang dilengkapi sensor kamera dirancang untuk pengontrolan posisi dan orientasi lengan robot. Selain itu, [6] juga mengembangkan metode penempatan

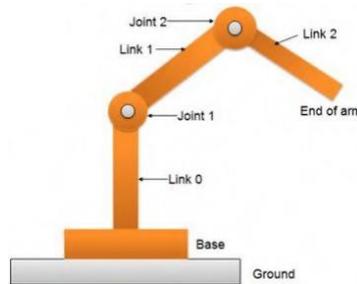
posisi sensor kamera yang efektif pada manipulator lengan robot untuk mengontrol robot dalam melakukan fungsi mengambil dan meletakkan (*pick and place*) objek target tertentu. Metode komputasi untuk penentuan posisi dan pengontrolan lengan robot berbasis sensor kamera telah dikembangkan pada berbagai bahasa pemrograman [7-10].

Makalah ini memaparkan metode deteksi dan desain sistem kontrol umpan balik berbasis sensor visual (kamera) biaya rendah. Proses deteksi dan kontrol ini ditujukan untuk menggerakkan *end-effector* suatu purwarupa lengan robot dari pose awal ke pose akhir referensi tertentu. Deteksi objek dilakukan dengan menggunakan kamera *Pixy2 CmuCam5* yang dilengkapi dengan modul khusus pengolahan citra yang memungkinkannya untuk mendeteksi fitur/pola tertentu pada objek target. Dengan menggunakan analisis dan desain berbasis metode *inverse kinematics*, informasi pose awal objek target yang diperoleh kamera kemudian diumpankanbalikkan ke pengontrol untuk menggerakkan *end-effector* menuju pose referensi yang diinginkan. Hasil eksperimen implementasi metode deteksi dan desain pengontrol dipaparkan untuk mengilustrasikan keefektifan metode kontrol berbasis sensor visual yang diajukan.

## 2 Metode

### 2.1 Komponen Lengan Robot

Manipulator lengan robot merupakan jenis robot yang paling banyak digunakan di industri. Lengan robot merupakan lengan elektromekanik yang dapat diprogram untuk melakukan fungsi menyerupai lengan manusia. Gambar 1 mengilustrasikan lengan robot dengan tiga komponen utama yaitu: *link*, *joint*, dan *end-effector* [1]. *Link* merupakan benda tegar dengan fungsi menyerupai lengan manusia. *Joint* adalah komponen mekanis penghubung antara dua *link*. Terdapat dua jenis *joint* yang sering digunakan pada lengan robot, yaitu *revolute joint* yang memungkinkan gerak rotasi dari *link* terhubung, dan *prismatic joint* yang memungkinkan gerak translasi pada *link* terhubung. *End-effector* adalah bagian ujung lengan robot yang dapat berupa *gripper*, *welding torch*, atau *material removal tools* sesuai dengan fungsi lengan robot [8-11].



Gambar 1 Komponen *link*, *joint*, dan *end-effector* pada lengan robot

### 2.2 Kinematika Lengan Robot

Analisis kinematika manipulator lengan robot secara umum terdiri dari dua jenis, yaitu analisis *forward kinematics* (FK) dan *inverse kinematics* (IK).

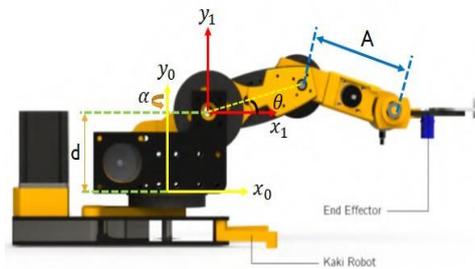
#### 2.2.1 Analisis FK

Analisis FK berkaitan dengan penentuan pose dari *end-effector* robot terhadap kerangka koordinat *joint* tertentu berdasarkan nilai orientasi rotasi sudut ( $\theta$ ) dan/atau *offset* ( $d$ ) translasi dari setiap *link* dan *joint* pada robot yang ditinjau [1].

Salah satu metode sistematis yang dapat digunakan untuk analisis FK adalah metode aturan dan tabel *Denavit-Hartenberg* (DH). Pada aturan DH, pose antar titik yang berbeda pada robot dapat dinyatakan satu sama lain dengan menggunakan matriks transformasi *homogeneous*. Matriks transformasi *homogeneous* tersebut ditentukan berdasarkan empat parameter DH di setiap *link* ke  $i$  pada robot, yaitu panjang *link* ( $a_i$ ), *link twist* ( $\alpha_i$ ), *joint offset* ( $d_i$ ), dan *joint angle* ( $\theta_i$ ) (lihat Gambar 2). Berdasarkan parameter DH tersebut, matriks transformasi *homogeneous*  ${}^{i-1}H_i$  antara *joint* ( $i - 1$ ) dan *joint* ( $i$ ) pada lengan robot dapat ditentukan sebagai berikut [1] :

$${}^{i-1}H_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i & {}^{i-1}T_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

di mana  ${}^{i-1}R_i$  dan  ${}^{i-1}T_i$  masing-masing menyatakan matriks rotasi dan translasi antara joint ( $i$ ) terhadap joint ( $i - 1$ ),  $s_{\theta_i} = \sin(\theta_i)$  dan  $c_{\theta_i} = \cos(\theta_i)$ . Dalam hal ini, matriks  ${}^{i-1}H_i$  di (1) pada dasarnya menentukan hubungan antara pose setiap titik pada *link* ( $i$ ) dan ( $i - 1$ ) berdasarkan nilai parameter DH dari *joint* yang menghubungkannya.



Gambar 2 Ilustrasi parameter DH.

### 2.2.2 Analisis IK

Analisis IK merupakan kebalikan analisis FK yang berkaitan dengan penentuan konfigurasi sudut rotasi ( $\theta$ ) dan/atau *offset* ( $d$ ) translasi dari tiap *joint* pada lengan robot berdasarkan informasi pose dari *end-effector* yang diberikan. Terdapat dua jenis metode yang umum digunakan pada analisis IK, yaitu metode analitik dan numerik. Analisis IK dengan metode analitik terdiri dari metode geometri dan aljabar yang keduanya berkaitan dengan penentuan solusi beberapa persamaan non-linier. Metode numerik dilakukan dengan komputasi numerik, misalnya penggunaan matriks Jacobian iteratif, untuk meninjau relasi antara perubahan *pose* inkremental *end-effector* dan perubahan parameter DH pada lengan robot. Salah satu tantangan yang umum dijumpai pada analisis IK adalah kemungkinan adanya beberapa solusi akibat sifat non-linier persamaan aljabar/geometri yang diperoleh dari model kinematika robot. Dalam hal ini, penentuan solusi analisis IK perlu meninjau beberapa batasan kondisi (*constraints*) gerak yang ditinjau [1].

### 2.3 Sensor Kamera Untuk Visual Servoing

*Visual servoing* merupakan metode kontrol berbasis informasi umpan balik dalam bentuk data visual yang diperoleh dengan sensor kamera [12]. *Visual servoing* telah banyak digunakan di aplikasi pengontrolan manipulator lengan robot, di mana gambar visual yang diperoleh kamera digunakan sebagai informasi umpan balik terkait pose dari *end-effector* dan kondisi ruang kerja robot. *Visual servoing* umumnya dilakukan dengan salah satu dari tiga pendekatan, yaitu (i) berbasis data visual ruang dua 2D (*image-based visual servoing*, IBVS), (ii) berbasis data visual ruang 3D (*position-based visual servoing*, PBVS), dan (iii) kombinasi IBVS dan PBVS atau disebut  $2\frac{1}{2}$  D *visual* [13].

Salah satu tantangan dalam penerapan teknik *visual servoing* adalah penentuan jenis kamera yang digunakan berdasarkan kriteria biaya, fitur, performansi, serta tujuan penggunaan yang diinginkan. Pada penelitian ini, kamera yang digunakan dipilih dari beberapa kandidat kamera dengan harga dan biaya operasional rendah seperti ditunjukkan di Tabel 1. Penelitian ini memilih menggunakan modul sensor Pixy2 karena memiliki fitur laju transfer data (*transfer rate*) yang tinggi dan fleksibel penggunaannya karena dapat dioperasikan pada beberapa bahasa pemrograman [14].

Tabel 1 Ringkasan perbandingan beberapa sensor kamera

Modul	OV7670	ESP32-CAM	OpenMV H7	Pixy2
Dimensi (mm)	64 x 48	40,5 x 27 x 4,5	45 x 36 x 29	38 x 42 x 15
Ukuran lensa	1/6 inci	1/4 inci	2,8 mm	2,8 mm
<i>Transfer rate</i>	30 FPS	30 FPS	75-150 FPS	60 FPS
<i>Program Interface</i>	Arduino	Arduinio	Python	Arduino, Python, C/C++, Raspberry

Pixy2 merupakan edisi kedua dari modul sensor visual Pixy yang diproduksi *Charmed Labs* [14]. Modul sensor visual Pixy2 ditunjukkan pada Gambar 3 dan memiliki tiga fitur utama yang dapat digunakan pada aplikasi desain dan pengontrolan robot, yaitu:

- *line tracking for line following*: adalah fitur untuk deteksi garis, perpotongan, dan *barcode* (misalnya untuk aplikasi robot *line following*)
- *color-connected component*: adalah fitur untuk melakukan penjejakan (*tracking*) referensi tertentu pada robot berbasis deteksi warna
- *video*: adalah fitur untuk menghasilkan rekaman video gerak objek atau robot.

Pada penelitian ini, penjejakan posisi *end-effector* pada suatu purwarupa lengan robot berbasis kamera Pixy2 dilakukan dengan menggunakan fitur *color-connected component*. Fitur tersebut secara khusus mendeteksi warna yang ada pada bidang target menggunakan algoritme *color filtering* yang mendeteksi dua parameter utama pada suatu gambar, yaitu (i) *hue* sebagai parameter identitas warna, dan (ii) saturasi yang menggambarkan tingkat ketajaman warna pada gambar [15].

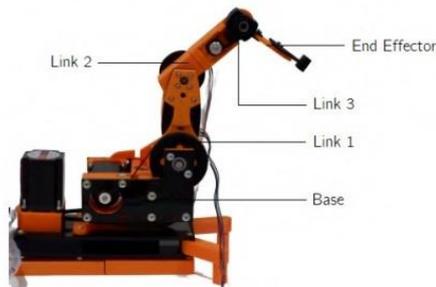


Gambar 3 Tampilan modul sensor kamera Pixy2.

### 3 Perancangan Alat dan Analisis

#### 3.1 Deskripsi Manipulator Robot

Gambar 4 menunjukkan purwarupa manipulator lengan robot yang ditinjau pada penelitian ini yang dikembangkan pada penelitian sebelumnya [16]. Robot ini memiliki tiga *link* dengan empat derajat kebebasan. Setiap *link* pada robot ini merupakan jenis *rotational*. Untuk tujuan pengontrolan, robot dilengkapi dengan satu mikrokontroler *Arduino Mega 2560* yang berfungsi sebagai sistem akuisisi data untuk (i) mengirimkan sinyal dari komputer ke platform robot, (ii) menerima data sensor pada robot, dan (iii) mengeksekusi sinyal kontrol yang digunakan. Parameter dan tabel DH untuk robot ini telah ditentukan di [16] dan ditunjukkan di Tabel 2. Pada tabel ini, parameter  $\alpha_i$  adalah *link twist*,  $a_i$  adalah *link length*,  $d_i$  adalah *joint offset*, dan  $\theta_i$  adalah *joint angle* [1, 17].



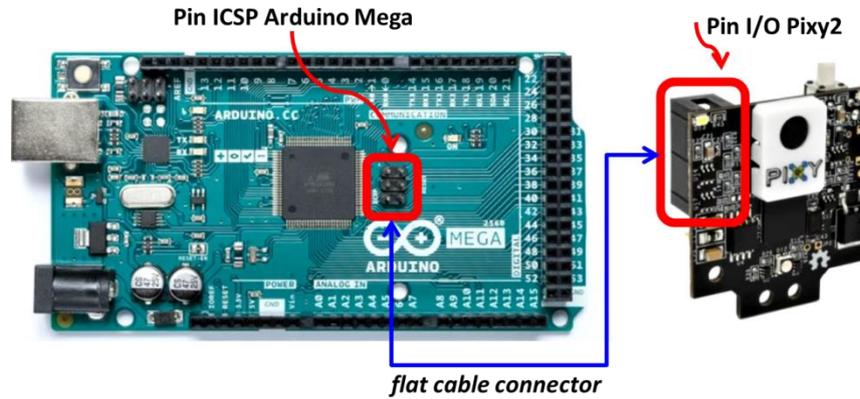
Gambar 4 Tampilan modul sensor kamera Pixy2.

Tabel 2 Tabel parameter DH manipulator robot di Gambar 4

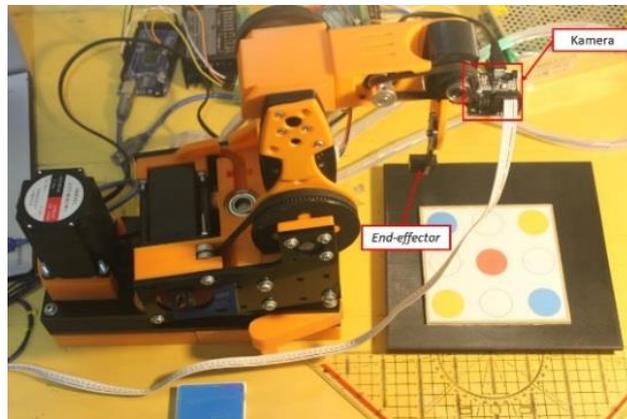
<i>link i</i>	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
$i = 1$	$\alpha_1$	$l_1$	0	$\theta_1$
$i = 2$	0	$l_1$	0	$\theta_2$
$i = 3$	0	$l_1$	0	$\theta_3$

Objektif penelitian ini adalah untuk melakukan analisis IK dan mengembangkan sistem penentuan posisi *end-effector* pada lengan robot menggunakan umpan balik informasi dari sensor kamera Pixy2. Penelitian ini difokuskan pada analisis gerak lengan robot di dua dimensi. Gambar 5 menunjukkan rangkain elektrik koneksi kamera Pixy2 dengan modul pengontrol pada lengan robot, di mana pin *input/output* kamera Pixy2 terhubung dengan pin ICSP pada mikrokontroler Arduino MEGA 2560

menggunakan konektor kabel datar/flat (lihat juga posisi kamera di Gambar 6). Pada tahap pengujian, manipulator robot diuji untuk mendeteksi posisi objek gambar dengan warna identifikasi tertentu yang terletak di suatu bidang datar seperti diilustrasikan pada Gambar 6.



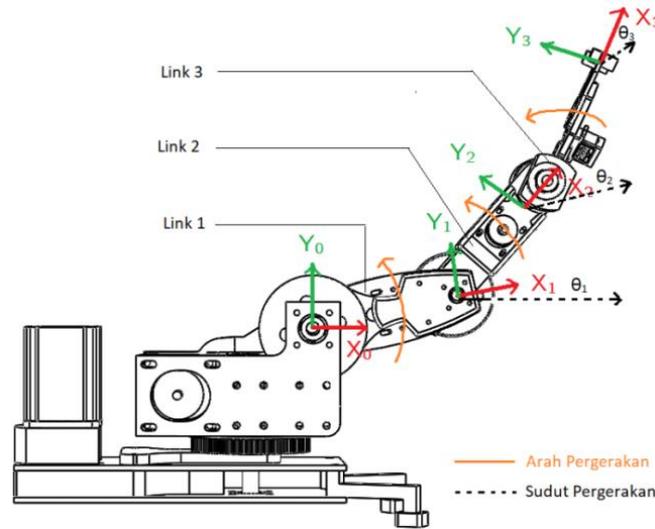
Gambar 5 Tampilan modul sensor kamera Pixy2.



Gambar 6 Tampilan modul sensor kamera Pixy2.

### 3.2 Analisis IK

Analisis IK pada purwarupa lengan robot dilakukan dengan metode analitik berdasarkan skematika di Gambar 7 [1, 16-18]. Analisis dibatasi di gerak dua dimensi pada kerangka koordinat global  $(X_0, Y_0)$ . Di Gambar 7,  $\theta_i$  menyatakan sudut orientasi *link* ke- $i$  untuk  $i = 1,2,3$ , sedangkan  $(x_3, y_3)$  adalah koordinat posisi *end-effector* di koordinat global. Dalam hal ini, analisis IK diformulasikan sebagai berikut: agar *end-effector* robot berada di koordinat  $(x_3, y_3)$  yang diinginkan, tentukan nilai sudut orientasi setiap *link*  $\theta_i$  ( $i = 1,2,3$ ) yang sesuai.



Gambar 7 Konfigurasi robot yang digunakan pada analisis IK.

Berdasarkan geometri robot pada Gambar 7, solusi problem IK dengan metode analitik dapat digunakan dan ditentukan sebagai berikut [17-19]:

- (i) Definisikan variabel sudut  $\Phi$  sebagai total sudut orientasi setiap *link* pada lengan robot sebagai berikut:

$$\Phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \tag{2}$$

- (ii) Tentukan koordinat proyeksi  $(x_2, y_2)$  dari pusat koordinat lokal *link* 2  $(X_2, Y_2)$  terhadap pusat koordinat global  $(X_0, Y_0)$  sebagai berikut:

$$x_2 = x_3 - l_3 \cos \Phi \tag{3}$$

$$y_2 = y_3 - l_3 \sin \Phi \tag{4}$$

di mana  $l_i$  menyatakan panjang *link* ke  $i$  pada lengan robot.

- (iii) Berdasarkan (2)-(4) dan dengan menggunakan operasi aljabar, maka nilai sudut orientasi  $\theta_i$  untuk setiap *link* relatif terhadap sumbu koordinat global  $(X_0, Y_0)$  dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{x_2^2 + y_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right) \tag{5}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[ \frac{(l_1 + l_2 \cos \theta_2)y_2 - l_2 \sin \theta_2 x_2}{(l_1 + l_2 \cos \theta_2)x_2 - l_2 \sin \theta_2 y_2} \right] \tag{6}$$

$$\theta_3 = \Phi - \theta_1 - \theta_2 \tag{7}$$

Berdasarkan analisis IK dengan metode analitik pada (2)-(7), maka sudut orientasi  $\theta_i$  untuk setiap *link* pada purwarupa lengan robot dapat ditentukan untuk memastikan *end-effector* berada pada koordinat  $(x_3, y_3)$  tertentu yang diinginkan. Pada makalah ini, solusi analisis IK pada (2)-(7) kemudian diintegrasikan dengan modul kamera pendeteksi objek Pixy2 yang memberi informasi umpan balik terkait posisi objek target untuk mengontrol gerakan robot dan memastikan *end-effector* pada robot berada pada posisi awal dan akhir yang diinginkan.

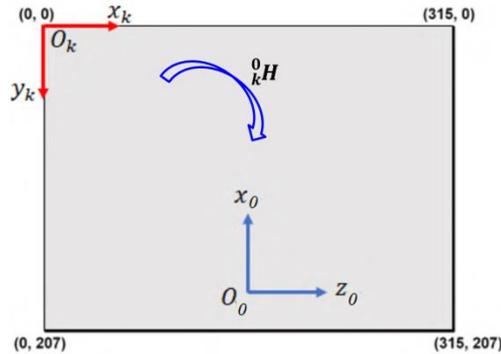
### 3.3 Hasil dan Analisis

#### 3.3.1 Kalibrasi Posisi Kamera

Kamera Pixy2 dipasang pada robot dengan skema konfigurasi *eye-in-hand* sehingga berada/menempel pada badan robot (lihat Gambar 6). Deteksi objek oleh kamera Pixy2 dilakukan berdasarkan deteksi warna referensi tertentu yang ada pada objek target, sehingga diperlukan proses pelatihan (*training*) awal untuk mengenalkan atau mengidentifikasi warna referensi objek ke kamera. Proses *learning* pada kamera Pixy2 dilakukan menggunakan perangkat lunak *PixyMon* dengan metode *color-connected*

components yang memperkenalkan satu pilihan (*signature*) warna dari tujuh pilihan kriteria warna sebagai target deteksi bagi kamera. Salah satu faktor penting yang mempengaruhi proses *training* dan kualitas deteksi kamera adalah tingkat pencahayaan karena Pixy2 hanya menggunakan parameter *hue* dan saturasi.

Pada proses deteksi, kamera menggunakan kerangka koordinat lokal yang berbeda dengan koordinat robot seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Pada bidang kerja, kerangka koordinat kamera dinyatakan sebagai  $(O_k, x_k, y_k)$  dan kerangka koordinat robot adalah  $(O_0, x_0, y_0)$ . Posisi objek yang dideteksi kamera dapat dinyatakan pada kerangka koordinat global robot dengan menggunakan matriks transformasi *homogeneous* (1) yang mencakup komponen matriks rotasi dan matriks translasi.



Gambar 8 Transformasi kerangka koordinat kamera ke koordinat robot.

**3.3.1.1 Komponen Rotasi pada Matriks Transformasi Homogeneous**

Dengan menerapkan kaidah tangan kanan pada kerangka koordinat di Gambar 8, ditentukan bahwa sumbu  $z_k$  positif mengarah ke dalam bidang halaman dan sumbu  $y_k$  keluar bidang halaman. Maka,  $(O_w, x_w, y_w)$  dapat diperoleh dari frame kamera  $(O_k, x_k, y_k)$  dengan dua kali rotasi yaitu rotasi  $90^\circ$  terhadap sumbu  $z_w$ , dilanjutkan dengan rotasi  $90^\circ$  terhadap sumbu  $y_w$ . Sehingga, matriks rotasi  ${}^w_k R$  antara kerangka koordinat kamera dan robot dapat dituliskan sebagai berikut:

$${}^0_k R = R_{z_0} R_{y_0} = \begin{bmatrix} c_{90^\circ} & -s_{90^\circ} & 0 \\ s_{90^\circ} & c_{90^\circ} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{90^\circ} & 0 & s_{90^\circ} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{90^\circ} & 0 & c_{90^\circ} \end{bmatrix} \tag{8}$$

**3.3.1.2 Komponen Translasi pada Matriks Transformasi Homogeneous**

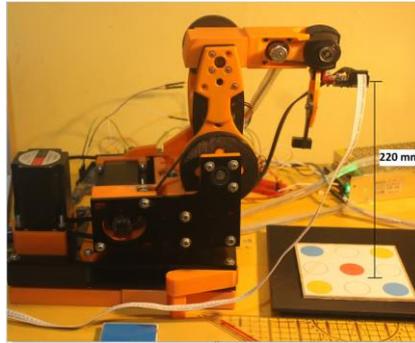
Selain perbedaan orientasi, terdapat jarak linier antara pusat koordinat  $(O_k, x_k, y_k)$  dan  $(O_0, x_0, y_0)$ . Jarak translasi antar pusat koordinat tersebut dapat ditentukan dengan meninjau karakteristik gambar tangkapan kamera serta kalibrasi jarak antara kamera dan objek target. Pada kamera Pixy2, gambar yang diperoleh memiliki dimensi  $(315 \times 207)$  pixel. Penentuan jarak dari kamera ke bidang target dilakukan melalui percobaan dengan meletakkan kamera pada ketinggian 220 mm dari permukaan bidang target yang memiliki dimensi  $(250 \times 162)$  mm<sup>2</sup> yang sudah diberi warna identifikasi, seperti ditunjukkan di Gambar 9. Perangkat lunak PixyMon pada kamera Pixy2 kemudian digunakan untuk menentukan titik tengah bidang target yang diperoleh berada di titik  $\pm 158$  pixel. Dengan meninjau (i) geometri gambar tangkapan kamera, (ii) titik tengah bidang yang dideteksi kamera, (iii) dimensi aktual bidang target, serta (iv) jarak aktual antara kamera dan bidang target, maka jarak antara pusat koordinat  $(O_k, x_k, y_k)$  dan  $(O_w, x_w, y_w)$  dapat ditentukan dengan analisis geometri. Dalam hal ini, vektor jarak atau translasi  ${}^w_k T$  antara kedua kerangka koordinat diperoleh sebagai berikut:

$${}^0_k T = [125/315 \quad 162/207 \quad 0]^T \tag{9}$$

Berdasarkan matriks rotasi  ${}^0_k R$  dan vektor translasi  ${}^0_k T$  yang diperoleh pada (9)-(10), matriks transformasi *homogeneous*  ${}^0_k H$  yang menghubungkan kerangka koordinat kamera dan kerangka koordinat lengan robot dapat ditentukan sebagai berikut [19-20]:

$${}^0_k H = \begin{bmatrix} {}^0_k R & {}^0_k T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

Dengan mengalikan persamaan (10) ke koordinat yang dihasilkan kamera Pixy2, maka posisi aktual objek terhadap koordinat global dapat ditentukan.



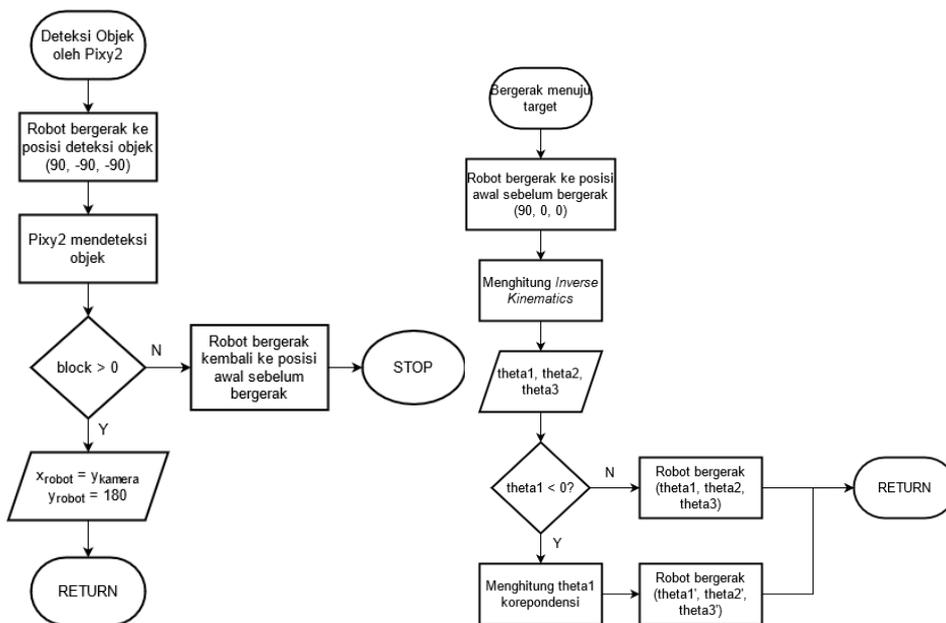
Gambar 9 Ilustrasi posisi kamera pada robot dan bidang target deteksi.

### 3.3.2 Algoritme Deteksi dan Kontrol Robot

Gambar 10 menunjukkan diagram alir algoritme deteksi objek (kiri) dan kontrol robot berbasis analisis IK (kanan) yang dikembangkan pada penelitian ini.

Pada Gambar 10 (kiri), langkah pertama saat algoritme deteksi dijalankan adalah aktivasi pergerakan lengan robot menuju posisi pembacaan objek dimana orientasi masing-masing joint adalah sebesar ( $90^\circ$ ;  $-90^\circ$ ;  $-90^\circ$ ). Kemudian, kamera akan mendeteksi objek target berdasarkan warna yang telah ditentukan yang dalam hal ini adalah warna merah. Dari hasil deteksi tersebut, modul *PixyMon* pada kamera Pixy2 akan menentukan koordinat lokal objek relatif terhadap kerangka koordinat kamera. Nilai koordinat lokal target terhadap kamera tersebut kemudian dikonversi ke koordinat global robot dengan menggunakan matriks transformasi *homogeneous* pada persamaan (10). Nilai *ouput* dari algoritme deteksi ini adalah koordinat aktual target relatif terhadap kerangka koordinat global pada manipulator lengan robot.

Nilai koordinat target pada kerangka koordinat global robot yang diperoleh tersebut kemudian dijadikan input bagi algoritme kontrol robot berbasis analisis IK sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir pada Gambar 10 (kanan). Dalam hal ini, besar sudut rotasi yang diinginkan untuk memastikan *end-effector* robot dapat mencapai koordinat objek target dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (5)-(7). Nilai masing-masing sudut rotasi yang diperoleh tersebut kemudian akan menjadi referensi bagi *micro controller* pada robot untuk mengaktifkan motor pada setiap lengan robot agar mencapai sudut rotasi yang diinginkan pada setiap *joint*. Proses deteksi objek dan kontrol yang sama juga diterapkan untuk menggerakkan robot menuju posisi akhir.



Gambar 10 Diagram alir usulan algoritme deteksi objek (kiri) dan kontrol robot (kanan).

## 4 Pengujian Deteksi Objek dan Kontrol Robot

Pengujian teknik deteksi objek berbasis kamera dan kontrol manipulator lengan robot yang dikembangkan pada penelitian ini dilakukan melalui masing-masing tiga (3) percobaan pada dua kasus target posisi *end-effector* yang diinginkan. Di setiap percobaan, deteksi dilakukan pada objek target berbentuk lingkaran berwarna di bidang target yang ditranslasikan di arah sumbu  $X_0$ .

Percobaan pada **Kasus I** dilakukan sebanyak tiga (3) kali dan meninjau gerak *end-effector* menuju posisi dengan jarak 130 mm dari titik pusat objek berwarna pada bidang target. Dengan menggunakan metode analisis IK, diperoleh nilai  $\theta_1 = 20,61^\circ$ ;  $\theta_2 = 107,73^\circ$ ;  $\theta_3 = -98,33^\circ$  untuk nilai sudut orientasi setiap *link* pada robot. Percobaan **Kasus II** juga dilakukan sebanyak tiga (3) kali dan dilakukan untuk memastikan *end-effector* berjarak 220 mm dari titik pusat objek berwarna pada target. Nilai orientasi robot pada percobaan ini adalah  $\theta_1 = 8,45^\circ$ ;  $\theta_2 = 73,23^\circ$ ;  $\theta_3 = -51,67^\circ$ . Hasil analisis IK di setiap percobaan kemudian digunakan sebagai referensi bagi mikrokontroler untuk mengontrol setiap *link* pada lengan robot bergerak membentuk sudut orientasi yang diperoleh sambil menjaga jarak referensi menggunakan kamera (lihat Gambar 9). Pada penelitian ini, kontrol gerak rotasi setiap *link* pada robot dilakukan menggunakan pengontrol *proportional-integral-derivative* (PID) [1,17].

Setelah robot bergerak membentuk orientasi yang diperoleh, validasi posisi akhir yang dicapai robot dilakukan secara manual dengan mengukur jarak antara *end effector* dan target menggunakan mistar/penggaris (lihat ilustrasi garis merah di Gambar 9). Tabel 3 menunjukkan hasil yang diperoleh dari masing-masing tiga percobaan untuk dua kasus tinjauan. Tabel ini menunjukkan bahwa nilai kesalahan atau eror posisi/pengukuran akhir untuk **Kasus I** berada pada rentang 1 mm - 3 mm atau 0,007% - 0,023%, sedangkan eror posisi/pengukuran akhir untuk **Kasus II** berada pada rentang 1 mm - 4 mm atau 0,0045% - 0,018%. Hasil yang ini mengindikasikan keefektifan metode deteksi berbasis kamera yang diusulkan untuk menentukan posisi dari objek target pada purwarupa lengan robot yang ditinjau.

Tabel 3 Ringkasan rata-rata kesalahan pengukuran

Percobaan ke-	Kasus I (130 mm)	Error (%)	Kasus II (220 mm)	Error (%)
1	131	0,0077	224	0,018
2	133	0,023	221	0,0045
3	131	0,0077	222	0,0090
Rata-rata error		1,67	2,67	

## 5 Kesimpulan

Makalah ini telah memaparkan metode penentuan dan deteksi posisi *end-effector* pada purwarupa manipulator lengan robot dengan menggunakan sensor kamera berbiaya rendah. Proses deteksi ditujukan untuk memperoleh koordinat *end-effector* serta objek target yang kemudian dapat digunakan untuk menggerakkan *end-effector* robot dari posisi awal menuju posisi akhir tertentu. Berdasarkan hasil percobaan, diperoleh bahwa nilai kesalahan atau *error* posisi/pengukuran akhir yang dicapai relatif sangat kecil pada rentang 0,0045% - 0,023%. Hasil ini mengindikasikan keefektifan metode deteksi objek target, penentuan posisi relatif antara *end-effector* robot terhadap objek target, serta kontrol umpan balik berbasis sensor kamera berbiaya rendah yang diusulkan pada makalah ini. Pada penelitian selanjutnya, pengembangan teknik deteksi serta penentuan lokasi objek yang lebih robas terhadap kondisi pencahayaan ruang kerja robot akan dikembangkan lebih lanjut.

## 6 Referensi

- [1] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics & Control* (3rd ed.). New York: Pearson Education, 2009.
- [2] R. Goel & P. Gupta. *Robotics & Industry 4.0 - A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development*, p. 157. Springer: Switzerland, 2020.
- [3] M. Klingensmith, S. S. Sirinivasa, & M. Kaess, "Articulated Robot Motion for Simultaneous Localization and Mapping (ARM-SLAM)," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 1156, 2016.
- [4] A. Collet, D. Berenson, S. S. Srinivasa, & D. Ferguson, "Object Recognition and Full Pose Registration From A Single Image for Robotic Manipulation," *Proc. International Conference on Robotic and Automation*, pp. 48, 2009.

- [5] S. Saxena & S. G. Neogi, "A Framework for Insight Finder by Object Detection Mechanism," *Proc. International Conference on Reliability, Infocom Technologies & Optimization*, vol. 6, no. 1, pp. 417, 2020.
- [6] C. L. Shih & Y. Lee, "A Simple Robotic Eye-In-Hand Camera Positioning And Alignment Control Method Based On Parallelogram Feature," *Robotics*, vol. 7, no. 2, pp. 31, 2018.
- [7] L. Joseph, *Learning Robotics using Python: Design, Simulate, Program & Prototype of an Autonomous Mobile Robot using ROS, OpenCV, PCL, and Python*. Birmingham: Packt Publishing Limited, 2020.
- [8] Wiliam, B. Kartadinata, & L. Wijayanti, "Pengendalian Lengan Robot untuk Proses Pemindahan Barang," *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 21, no. 1, pp. 69, 2019.
- [9] M. H. Barri, A. Ryandika, A. Cesario, & A. Widyotriatmo, "Desain dan Kontrol Posisi dari Arm Manipulator Robot Sebagai Alat Rehabilitasi Pasien Pasca Stroke," *Jurnal Otomasi, Kontrol, dan Instrumentasi*, vol. 9, no. 2, pp.81, 2017.
- [10] B. Utomo, N. Y. D. Setyaningsih, & M. Iqbal, "Kendali Robot Lengan 4 DOF Berbasis Arduino Uno & Sensor MPU-6050," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 11, no. 1, pp. 89, 2020.
- [11] C. Urrea, J. Cortes, & J. Pascal, "Design, Construction And Control Of A SCARA Manipulator With Six Degrees of Freedom," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 3964, 2016.
- [12] E. Malis, "Survey of Vision-Based Robot Control," *European Naval Ship Design Short Course*, vol. 41, pp. 46, Brest, France, 2002.
- [13] D. Kragic & H.I. Chirstensen, "Survey on Visual Servoing for Manipulation," *Computational Vision & Active Perception Laboratory Fiskartorpsv*, vol. 15 no. 1, pp. 1, 2002.
- [14] Charmed Labs. <https://charmedlabs.com/default/> [Diakses: 1 Mei 2021].
- [15] D. Rosmala, M. I. Ichwan, & R. W. Indarko, "Implementasi Algoritma Color Filtering pada Aplikasi Gitar Virtual," *Prosiding Semnas Telekomunikasi dan Informatika*, 2016.
- [16] I. H. Ayega, "Studi & Implementasi Teknik Pemodelan dan Pengontrolan Lengan Robot Tiga Derajat Kebebasan." *Tugas Akhir Sarjana*, Teknik Elektro Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, 2020.
- [17] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB* (2nd ed.). Springer International, 2017.
- [18] A. Ghosal, "Kinematics of Serial Manipulators". *Research Notes*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 2015.
- [19] A. Al-Ibadi, S. Nefti-Meziani, S. Davis, & T. Theodoridis, "Novel Design and Position Control Strategy Of A Soft Robot Arm," *Robotics*, vol. 7, no. 4, pp. 72, 2018.
- [20] S. Chakraborty, S. Mukherjee, T. Nag, B. Biswas, B. Garang, & A. Nayak, "A Low Cost Autonomous Multi-Purpose Vehicle For Advanced Robotics," *Proc. IEEE Annual Conference on Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication*, vol. 11, no. 1, pp. 1067, 2018.