`

Design of a Two-Axis Pointing Sensor System (Azimuth and Elevation) Based on Servo Motors Using HC-SR04 Ultrasonic Sensors as Part of the SEWACO Subsystem

Rancang Bangun Sistem Pointing Sensor Dua Sumbu (Azimut dan Elevasi) Berbasis Servo Motor Menggunakan Sensor Ultrasonik HC-SR04 sebagai Bagian dari Subsistem SEWACO

Dandi Bagus Sajiwo[1*], Shazana Dhiya Ayuni[2] ,Izza Anshory[3]

[1, 2, 3]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Penulis Korespondensi: shazana@umsida.ac.id

Abstract. *General Background Modern defense architectures rely heavily on integrated sensor, weapon, and command systems to detect, track, and direct assets toward operational targets efficiently. Specific Background This study examines the design and construction of a two-axis pointing system utilizing servo motors and an HC-SR04 ultrasonic sensor as part of a low-cost embedded SEWACO subsystem. Knowledge Gap Although multi-axis alignment is crucial, prototyping affordable and reliable real-time targeting mechanisms utilizing low-cost microcontrollers remains underexplored. Aims This research aims to develop an automated two-axis sensor pointing mechanism capable of real-time target acquisition and angle referencing based on distance inputs. Results Findings demonstrate that the system successfully performs stable target tracking across static and dynamic conditions, yielding average tracking errors of 3.72° in azimuth and 0.41° in elevation. Novelty This work introduces an integrated closed-loop PID control mechanism combined with joystick manual override for dual-axis ultrasonic-based sensor pointing. Implications The developed prototype serves as an effective foundational model for low-cost embedded target acquisition systems in naval and defense applications*

Keywords *Two-Axis Pointing System, Azimuth, Elevation, Servo Motor, HC-SR04*

Abstrak Latar Belakang Umum Arsitektur pertahanan modern sangat bergantung pada sistem sensor, senjata, dan komando terintegrasi untuk mendeteksi, melacak, dan mengarahkan aset ke target operasional secara efisien. Latar Belakang Spesifik Studi ini meneliti desain dan konstruksi sistem penunjuk dua sumbu yang menggunakan motor servo dan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai bagian dari subsistem SEWACO tertanam berbiaya rendah. Kesenjangan Pengetahuan Meskipun penyelarasan multi-sumbu sangat penting, prototipe mekanisme penargetan waktu nyata yang terjangkau dan andal menggunakan mikrokontroler berbiaya rendah masih belum banyak dieksplorasi. Tujuan Penelitian ini bertujuan mengembangkan mekanisme penunjukan sensor dua sumbu otomatis yang mampu memperoleh target secara real-time dan referensi sudut berdasarkan input jarak. Hasil Temuan menunjukkan bahwa sistem ini berhasil melakukan pelacakan target yang stabil di berbagai kondisi statis dan dinamis, menghasilkan rata-rata kesalahan pelacakan 3,72° pada azimut dan 0,41° pada elevasi. Kebaruan Pekerjaan ini memperkenalkan mekanisme kontrol PID tertutup terintegrasi yang dikombinasikan dengan override manual joystick untuk penunjukan sensor berbasis ultrasonik dua sumbu. Implikasi Prototipe yang dikembangkan berfungsi sebagai model dasar yang efektif untuk sistem akuisisi target tertanam berbiaya rendah dalam aplikasi angkatan laut dan pertahanan

Kata Kunci: Sistem Penunjuk Dua Subu, Azimut, Elevasi, Motor Servo, HC-SR04

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi sistem pertahanan modern menuntut integrasi sistem kendali, senjata, dan sensor ke dalam arsitektur yang terpadu, yang mampu merespons dengan tepat dan cepat terhadap perubahan lingkungan operasional. Konsep *Sensor, weapon, and comaand (SEWACO)*, yang memfasilitasi proses deteksi, akuisisi, pelacakan, dan pengarahan sistem senjata menuju sasaran di area operasi, memungkinkan integrasi ini dalam sistem pertahanan maritim. Sub-sistem sensor penunjuk merupakan komponen krusial dalam desain SEWACO, digunakan untuk mengarahkan perangkat sensor dan aktuator menuju sasaran berdasarkan data deteksi. [3]

Perangkat harus mampu bergerak dalam beberapa derajat kebebasan agar subsistem penunjuk dapat mengarahkan

dirinya ke target yang berada di lokasi dinamis di seluruh ruang kerja.
Kemampuan bergerak dalam arah vertikal (elevasi) dan horizontal (azimuth) membuat sistem penunjuk dua sumbu menjadi konfigurasi yang populer. Arah target relatif terhadap sumbu horizontal ditentukan oleh gerakan azimuth, sedangkan sudut kemiringan perangkat relatif terhadap target di bidang vertikal ditentukan oleh gerakan elevasi.[4]

Pada tahap pengembangan prototipe, implementasi sistem pointing seringkali dihadapkan pada keterbatasan perangkat keras serta kompleksitas integrasi sistem. Oleh karena itu, pendekatan berbasis *low-cost embedded system* dapat digunakan untuk merepresentasikan prinsip kerja subsistem pointing dalam skala l. Motor servo digunakan sebagai aktuator gerak karena mampu mengontrol posisi sudut secara langsung berdasarkan sinyal kendali dari mikrokontroler, sedangkan sensor ultrasonik HC-SR04 dimanfaatkan sebagai perangkat akuisisi data jarak terhadap target[1]

Integrasi antara sensor ultrasonik dan motor servo memungkinkan sistem untuk melakukan proses deteksi serta pengarahan terhadap target secara otomatis. Data jarak yang diperoleh dari sensor digunakan sebagai referensi dalam menentukan sudut pergerakan aktuator pada masing-masing sumbu azimut dan elevasi, sehingga perangkat dapat bergerak menuju arah target yang terdeteksi[5]

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan rancang bangun sistem pointing sensor dua sumbu berbasis motor servo dengan memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai bagian dari subsistem SEWACO. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi model awal dalam pengembangan mekanisme pengarahan sensor berbasis mikrokontroler Arduino atmega pada tahap prototipe sebelum diimplementasikan pada sistem operasional yang lebih kompleks.

DASAR TEORI

Dalam rancang bangun sistem pointing sensor dua sumbu elevasi dan azimuth maka dibutuhkan dasar teori yang sesuai agar dapat mendukung prototype dengan hasil yang maksimal

1.1 Sistem Pointing Dua Derajat Kebebasan (2-DOF Pointing System)

Sistem penunjuk dua sumbu adalah mekanisme penggerak yang menggunakan orientasi sudut pada kedua bidang horizontal dan vertikal untuk mengarahkan perangkat sensor atau aktuator ke arah target. Gerakan azimuth dan elevasi merupakan dua derajat kebebasan (2-DOF) dari mekanisme ini. Sementara gerakan elevasi digunakan untuk mendeteksi sudut kemiringan perangkat relatif terhadap target pada bidang vertikal (atas dan bawah), gerakan azimuth digunakan untuk menentukan orientasi target relatif terhadap sumbu horizontal (kiri dan kanan).

Implementasi sistem ini menggunakan dua aktuator yang ditempatkan secara ortogonal, masing-masing mengatur pergerakan sepanjang satu sumbu. Sementara aktuator sumbu elevasi mengubah sudut kemiringan perangkat secara vertikal menuju target, aktuator sumbu azimuth menggerakkan sistem secara horizontal sebagai respons terhadap perubahan posisi target.[6]

Penerapan sistem pointing dua sumbu memungkinkan perangkat untuk melakukan proses pengarahan secara fleksibel terhadap target yang berada pada posisi dinamis dalam ruang kerja tertentu. Dengan kemampuan tersebut, sistem dapat menyesuaikan orientasi perangkat secara otomatis sehingga proses deteksi dan pengarahan terhadap target dapat dilakukan dengan lebih efektif dan akurat.

1.2 Motor Servo

Motor servo adalah aktuator elektromekanis yang digunakan untuk mengontrol posisi mesin dalam rentang tertentu sesuai dengan persyaratan sistem kendali. Karena kemampuannya untuk menyesuaikan posisi secara akurat berdasarkan kendali yang diberikan, perangkat ini sering digunakan dalam sistem otomasi dan mekanisme pengendalian. Secara umum, motor servo terdiri dari motor DC, rentang kendali internal, dan mekanisme umpan balik yang berfungsi sebagai potensiometer untuk mengukur posisi saat ini dari poros servo.

Motor servo beroperasi berdasarkan prinsip Modulasi Lebar Pulsa (PWM), yang diimplementasikan oleh mikrokontroler sebagai acuan untuk posisi yang diinginkan. Akibat lebar pulsa PWM, posisi servo akan berubah secara bertahap, memungkinkan aktuator kembali ke posisi acuan yang telah ditentukan oleh sistem kendali. Dengan adanya sistem umpan balik internal, motor servo mampu menyesuaikan posisi secara otomatis hingga mencapai sudut yang diinginkan, sehingga sangat sesuai untuk diaplikasikan pada sistem pointing dua sumbu yang membutuhkan respons gerak yang stabil dan terkontrol.[7]

1.3 Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sensor HC-SR04 merupakan sensor jarak berbasis gelombang ultrasonik yang bekerja dengan prinsip pemantulan

gelombang suara frekuensi tinggi terhadap objek di depannya. Sensor ini memiliki dua komponen utama yaitu transmitter dan receiver. Transmitter memancarkan gelombang ultrasonik, kemudian receiver menerima gelombang pantul dari objek. Jarak objek dihitung berdasarkan selisih waktu antara gelombang yang dipancarkan dan diterima kembali oleh sensor .[8]biasanya menggunakan prinsip *time-of-flight* dengan rumus :

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

Dimana :
d : jarak (m)
v : kecepatan suara (343m/s) t : waktu pantul

1.4 Sistem Kendali Tertanam

Sistem kendali tertanam merupakan sistem yang mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak untuk mengendalikan suatu proses secara otomatis dalam satu kesatuan perangkat. Pada penelitian ini, sistem kendali tertanam diimplementasikan menggunakan mikrokontroler berbasis Arduino ATmega yang berperan sebagai unit pemrosesan utama dalam mengatur keseluruhan operasi sistem pointing dua sumbu.

Mikrokontroler Arduino ATmega bertugas untuk membaca data masukan yang diperoleh dari sensor ultrasonik HC-SR04, kemudian memproses informasi tersebut untuk menentukan posisi target yang terdeteksi. Hasil pengolahan data selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menghasilkan sinyal kendali berupa Pulse Width Modulation (PWM) yang dikirimkan ke motor servo pada sumbu azimut dan elevasi. Dengan kemampuan pemrosesan data secara real-time, mikrokontroler mampu mengatur pergerakan aktuator secara terkoordinasi sehingga sistem dapat melakukan proses pengarahan terhadap target secara otomatis sesuai dengan kondisi yang terdeteksi oleh sensor.[9]

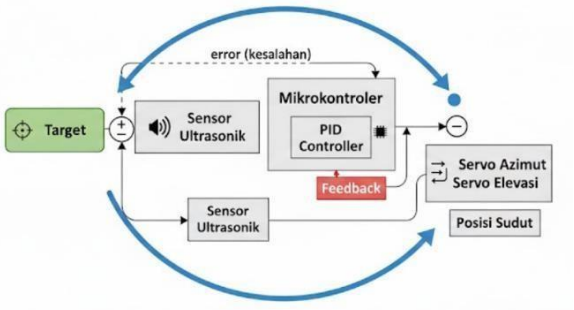
METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini mencakup perancangan desain sistem,perancangan perangkat keras,dan perancangan perangkat lunak.

1.5 Desain Sistem

sistem yang dikembangkan merupakan sistem pinting dua derajat kebebasan (2- DOF) yang terdiri dari :

a. Sensor: HC-SR04 sebagai pendeteksi jarak target
b. Aktuator: Dua motor servo MG995 (azimut & elevasi)
c. Radar scanning servo: Menentukan arah deteksi target
d. Pengendali: Arduino Atmega
e. Output: LCD I2C sebagai penampil sudut dan status
f. Mode manual: Joystick sebagai override (follow up Ketika ada keeroran dalam sistem otomatis)



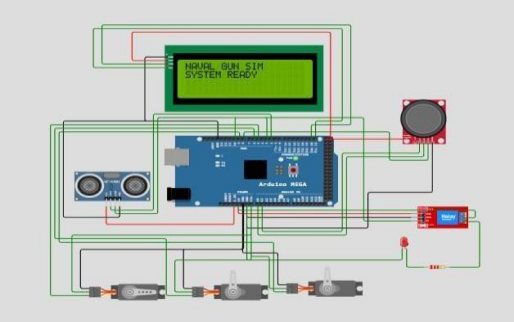
1.5.1 diagram Blok (closed-loop control).

Diagram blok ini menerapkan sistem kontrol tertutup (*closed-loop*) agar pergerakan alat tetap akurat dan responsif. Secara sederhana, alur kerja sistem dibagi menjadi tiga tahap utama:

a. Deteksi (Input): Sistem dimulai dengan penetapan Target. Sensor Ultrasonik kemudian memindai posisi objek. Selisih antara posisi target dan posisi objek saat ini dihitung sebagai nilai *error*.

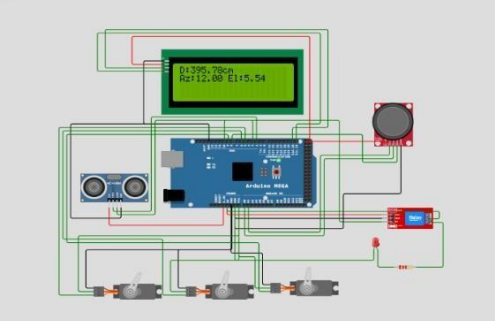
b. Pengolahan (Proses): Nilai *error* tersebut dikelola oleh Mikrokontroler menggunakan algoritma PID Controller. Algoritma ini berfungsi sebagai otak yang menentukan seberapa besar dan seberapa cepat koreksi yang harus dilakukan agar pergerakan sistem stabil dan tidak berlebihan (*overshoot*).

c. Eksekusi dan Koreksi (Output & Feedback): Instruksi dari mikrokontroler menggerakkan Servo Azimut dan Elevasi menuju Posisi Sudut yang diinginkan. Secara simultan, hasil pergerakan ini dipantau kembali melalui jalur Feedback ke sensor. Jika masih terdapat selisih posisi, sistem akan otomatis melakukan koreksi ulang hingga target tercapai dengan presisi.



1.5.2 *rangkaian firing control saat on*

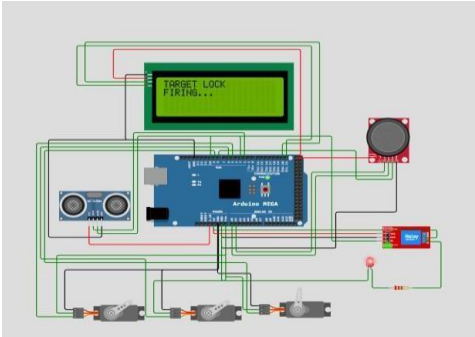
Dalam rangkaian yang penulis buat di software simulasi wokwie dimana saat rangkaian diberikan daya (ON) maka servo azimuth dan elevasi berada pada titik 0 derajat. Kemudian dalam display lcd i2c makan akan memberikan deskripsi *"Naval Gun System Ready"*.



1.5.3 *rangkaian firing control mencari target*

Dalam gambar tersebut Ketika sudut sudah 0 derajat maka motor servo radar dan motor servo elevasi akan berjalan Bersama dan ditampilkan di display lcd i2c untuk derajat nya,sampai target yang ditentukan.

1.5.4 *rangkaian firing control target lock*



dalam gambar tersebut setelah servo elevasi dan radar menemukan target kemudian membutuhkan waktu delay 3 detik

untuk memperoses penguncian atau *lock target* menggunakan sistem PID dan setelah target dikunci maka akan memunculkan dalam *display LCD i2c target lock* dan kemudian misil akan ditembakan dimana dalam gambar tersebut kita memakai LED warna merah sebagai simulasi Tembak.

1.6 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan dalam perancangan sistem pointing dua sumbu ini terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk mendukung proses deteksi dan pengarahan target. Mikrokontroler Arduino ATmega digunakan sebagai unit kendali utama yang berfungsi untuk memproses data masukan dari sensor serta menghasilkan sinyal kendali untuk mengatur pergerakan aktuator pada sistem.

Sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan sebagai perangkat pendeteksi jarak terhadap objek target di dalam area kerja sistem. Data jarak yang diperoleh dari sensor akan diolah oleh mikrokontroler untuk menentukan arah dan sudut pengarahan sistem. Dua buah motor servo digunakan sebagai aktuator yang masing-masing berperan dalam mengendalikan pergerakan pada sumbu azimut (horizontal) dan elevasi (vertikal), sehingga sistem mampu melakukan proses pointing terhadap target secara dua dimensi.

Selain itu, modul LCD berbasis antarmuka I2C digunakan sebagai media tampilan untuk menampilkan informasi jarak dan status sistem secara real-time. Joystick ditambahkan sebagai perangkat kendali manual yang memungkinkan pengguna untuk mengatur posisi pointing secara langsung apabila diperlukan. Relay digunakan sebagai aktuator keluaran yang berfungsi untuk mengaktifkan perangkat tambahan berupa laser sebagai indikator keberhasilan sistem dalam mengunci posisi target.

1.7 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak pada sistem ini dilakukan untuk mengatur proses akuisisi data dari sensor, pengolahan informasi jarak terhadap target, serta pengendalian pergerakan aktuator servo secara terkoordinasi. Program dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Arduino yang diimplementasikan pada mikrokontroler untuk memastikan seluruh komponen sistem dapat bekerja secara otomatis sesuai dengan kondisi yang terdeteksi di lingkungan tempur.

Perangkat lunak dirancang agar sistem mampu melakukan proses pemindaian area kerja (scanning) menggunakan servo radar untuk mendeteksi keberadaan objek dalam jangkauan sensor ultrasonik. Data jarak yang diperoleh selanjutnya dikonversi menjadi nilai referensi sudut yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan arah pergerakan aktuator pada sumbu azimut dan elevasi. Berdasarkan referensi sudut tersebut, mikrokontroler akan menghasilkan sinyal kendali PWM untuk menggerakkan motor servo menuju posisi target yang telah terdeteksi.

Selain itu, perangkat lunak juga dilengkapi dengan fitur tampilan informasi yang memungkinkan sistem menampilkan data posisi sudut aktuator serta status deteksi target secara real-time melalui LCD. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu melakukan proses pengarahan secara otomatis, tetapi juga memberikan informasi operasional yang dapat digunakan untuk memantau kinerja sistem selama proses tracking berlangsung. Dengan menggunakan proses pengarahan secara otomatis, tetapi juga memberikan informasi operasional yang dapat digunakan untuk memantau kinerja sistem selama proses tracking berlangsung.

```
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

/* ===== LCD ===== */
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

/* ===== SERVO ===== */
Servo servoRadar;
Servo servoAzimut;
Servo servoElevasi;

/* ===== PIN ===== */
#define TRIG_PIN 2
#define ECHO_PIN 3
#define RADAR_SERVO_PIN 5
#define AZIMUT_SERVO_PIN 6
#define ELEVASI_SERVO_PIN 9
#define RELAY_PIN 10

#define JOY_X A0
#define JOY_Y A1
#define JOY_SW 8

/* ===== VARIABEL ===== */
long duration;
float distance;

float azimutSetpoint = 0;
float elevasiSetpoint = 0;
float azimutAngle = 0;
float elevasiAngle = 0;
```

```
/* ===== PID PARAMETER ===== */
float Kp = 1.2;
float Ki = 0.02;
float Kd = 0.4;

float errorAz = 0, lastErrorAz = 0, integralAz = 0;
float errorEl = 0, lastErrorEl = 0, integralEl = 0;

/* ===== STATUS ===== */
bool targetLocked = false;
bool manualOverride = false;
bool firing = false;

/* ===== FUNCTION ULTRASONIC ===== */
float readDistance() {
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

  duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 30000);
  if (duration == 0) return 400;   // jika tidak terbaca
  return duration * 0.034 / 2;
}

/* ===== PID FUNCTION ===== */
float pidControl(float setpoint, float current, float &lastError, float &integral) {
  float error = setpoint - current;
  integral += error;
  float derivative = error - lastError;
  lastError = error;
  return Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;
```

```
}

void setup() {
  Wire.begin();   // Arduino MEGA: SDA=20, SCL=21

  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(JOY_SW, INPUT_PULLUP);

  servoRadar.attach(RADAR_SERVO_PIN);
  servoAzimut.attach(AZIMUT_SERVO_PIN);
  servoElevasi.attach(ELEVASI_SERVO_PIN);

  servoRadar.write(90);
  servoAzimut.write(0);
  servoElevasi.write(0);

  digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);

  lcd.init();
  lcd.backlight();

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("NAVAL GUN SIM");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("SYSTEM READY");
  delay(2000);
}

void loop() {

  manualOverride = digitalRead(JOY_SW) == LOW;
   /* ===== MANUAL OVERRIDE ===== */
   if (manualOverride) {
     azimutAngle = map(analogRead(JOY_X), 0, 1023, 0, 180);
     elevasiAngle = map(analogRead(JOY_Y), 0, 1023, 0, 90);

     servoAzimut.write(azimutAngle);
     servoElevasi.write(elevasiAngle);

     lcd.clear();
     lcd.print("MANUAL MODE");
     delay(200);
     return;
   }

   /* ===== RADAR SCANNING ===== */
   static int radarAngle = 20;
   static bool radarDir = true;

   servoRadar.write(radarAngle);
   radarAngle += radarDir ? 2 : -2;
   if (radarAngle >= 160 || radarAngle <= 20) radarDir = !radarDir;

   distance = readDistance();

   /* ===== TARGET DETECT ===== */
   if (distance > 20 && distance <= 400) {

     azimutSetpoint = radarAngle;
     elevasiSetpoint = map(distance, 20, 400, 35, 5);

     float azOut = pidControl(azimutSetpoint, azimutAngle, lastErrorAz, integralAz);
     float elOut = pidControl(elevasiSetpoint, elevasiAngle, lastErrorEl, integralEl);
```

```
    /* ===== BATASI GERAK (AGAR TERLIHAT & STABIL) ===== */
    azOut = constrain(azOut, -3, 3);
    elOut = constrain(elOut, -2, 2);

    azimutAngle += azOut;
    elevasiAngle += elOut;

    azimutAngle = constrain(azimutAngle, 0, 180);
    elevasiAngle = constrain(elevasiAngle, 0, 90);

    servoAzimut.write(azimutAngle);
    servoElevasi.write(elevasiAngle);

    if (abs(azimutSetpoint - azimutAngle) < 2 &&
        abs(elevasiSetpoint - elevasiAngle) < 2) {
      targetLocked = true;
    } else {
      targetLocked = false;
    }

  } else {
    targetLocked = false;
  }

 /* ===== FIRING ===== */
 if (targetLocked && !firing) {
   firing = true;

   lcd.clear();
   lcd.print("TARGET LOCK");
   lcd.setCursor(0, 1);
   lcd.print("FIRING...");
```

```
    // LED / LASER ON
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
    delay(2000);   // LED menyala JELAS

    // LED OFF
    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
    delay(500);

    firing = false;
    targetLocked = false;
  }

  /* ===== LCD DISPLAY ===== */
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("D:");
  lcd.print(distance);
  lcd.print("cm");

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Az:");
  lcd.print(azimutAngle);
  lcd.print(" El:");
  lcd.print(elevasiAngle);

  delay(150);
}
```

.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.8 Hasil Implementasi Sistem

Setelah proses perancangan dan integrasi perangkat keras serta perangkat lunak dilakukan, sistem pointing dua sumbu berbasis motor servo dan sensor ultrasonik HC-SR04 berhasil diimplementasikan sesuai dengan rancangan yang telah ditentukan. Sistem mampu melakukan proses deteksi objek dalam jangkauan sensor serta mengarahkan aktuator pada sumbu azimut dan elevasi menuju posisi target berdasarkan data jarak yang diperoleh.Motor servo pada masing-masing sumbu dapat bergerak secara otomatis mengikuti perubahan posisi target yang terdeteksi oleh sensor. Informasi sudut azimut dan elevasi yang dihasilkan sistem juga dapat ditampilkan melalui LCD sebagai media monitoring posisi aktuator secara real-time.

1.9 Pengujian Target Statis

Pengujian dilakukan dengan menempatkan objek pada beberapa jarak tetap di depan sensor untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengarahkan aktuator menuju target berdasarkan data jarak yang terdeteksi.

NO	Jarak Target (cm)	Sudut Azimut (°)	Sudut Elevasi (°)	Status deteksi
1	20	30	14	Terdeteksi
2	30	45	17	Terdeteksi
3	40	60	20	Terdeteksi
4	50	75	22	Terdeteksi
5	60	90	25	Terdeteksi

Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu mendeteksi keberadaan objek pada jarak 20 cm hingga 60 cm serta mengarahkan aktuator menuju posisi target secara otomatis. Perubahan jarak target menghasilkan perubahan referensi sudut pada servo azimut dan elevasi, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mengkonversi data jarak menjadi gerakan sudut pada aktuator.

1.10 Pengujian Target Dinamis

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggerakkan objek secara horizontal maupun vertikal untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengikuti perubahan posisi target secara dinamis.

No	**Pergerakan Target**	**Respons Azimut**	**Respons Elevasi**	**Waktu Respons (s)**
1	Kiri → Tengah	Mengikuti	Stabil	0.8
2	Tengah → Kanan	Mengikuti	Stabil	0.9
3	Dekat → Jauh	Menyesuaikan	Menyesuaikan	1.1
4	Jauh → Dekat	Menyesuaikan	Menyesuaikan	1.0
5	Naik → Turun	Stabil	Mengikuti	0.9

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan arah aktuator terhadap perubahan posisi target secara otomatis. Waktu respons sistem berkisar antara 0.8 hingga 1.1 detik tergantung pada perubahan posisi target yang terdeteksi oleh sensor.

1.11 Analisis Kinerja Sistem

Pergerakan motor servo pada sumbu azimut dan elevasi dipengaruhi oleh karakteristik mekanik aktuator serta data jarak yang diperoleh dari sensor ultrasonik HC-SR04. Berdasarkan hasil pengujian sistem, aktuator mampu mengarahkan perangkat menuju posisi target sesuai dengan sudut referensi yang dihasilkan dari proses konversi data jarak sensor. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan sudut (tracking error) pada sumbu azimut sebesar 3,72°, sedangkan pada sumbu elevasi sebesar 0,41°. Perbedaan nilai error pada kedua sumbu tersebut dipengaruhi oleh karakteristik mekanik servo serta perbedaan beban gerak pada masing-masing sumbu aktuator selama proses pointing berlangsung. Selain itu, sistem juga mengalami waktu tunda (delay) dalam mencapai posisi referensi yang berada pada kisaran 0,3 detik. Delay ini disebabkan oleh waktu yang dibutuhkan dalam proses pembacaan data jarak oleh sensor ultrasonik serta respons mekanik motor servo dalam melakukan pergerakan menuju sudut yang diinginkan.

Secara umum, sistem mampu melakukan proses pointing terhadap target secara stabil pada rentang jarak pengujian antara 20 cm hingga 100 cm tanpa mengalami kegagalan deteksi objek. Meskipun demikian, keterbatasan resolusi sensor ultrasonik serta adanya backlash mekanik pada motor servo masih mempengaruhi akurasi posisi akhir aktuator terhadap sudut referensi yang dihasilkan oleh sistem.

Parameter Evaluasi	Sumbu Azimut	Sumbu Elevasi
Error Sudut Rata-rata (°)	3,72°	0,41°
Delay Respons (detik)	-	0,3 s
Rentang Tracking Stabil	-	20–100 cm
Status Tracking	Stabil	Stabil

Berdasarkan hasil tersebut, sistem pointing dua sumbu berbasis motor servo yang dirancang dalam penelitian ini telah mampu melakukan proses pengarahan terhadap target secara otomatis dengan tingkat kestabilan yang memadai pada tahap implementasi prototipe. Namun demikian, peningkatan akurasi sistem masih diperlukan untuk mengurangi kesalahan sudut yang dihasilkan selama proses tracking berlangsung.

1.12 Keterbatasan Sistem(Noise Sensor, Backlash Servo,dan Delay Sistem)

Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem pointing dua sumbu yang dirancang masih dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis yang berasal dari karakteristik sensor maupun aktuator yang digunakan. Keterbatasan ini berdampak terhadap akurasi sudut serta kecepatan respons sistem dalam melakukan proses pengarahan terhadap target.Gangguan noise pada sensor ultrasonik HC-SR04 menyebabkan fluktuasi data jarak yang terbaca oleh mikrokontroler.
Kondisi ini mengakibatkan perubahan sudut referensi yang dihasilkan sistem menjadi tidak sepenuhnya stabil, terutama pada saat objek berada pada jarak di atas 80 cm. Fluktuasi tersebut berkontribusi terhadap rata-rata error sudut sebesar 3,72° pada sumbu azimut dan 0,41° pada sumbu elevasi selama proses pengujian berlangsung.

Selain itu, adanya backlash pada mekanisme gear motor servo juga mempengaruhi tingkat presisi posisi aktuator dalam mencapai sudut referensi yang dihasilkan oleh sistem. Celah mekanik pada gear menyebabkan pergerakan servo tidak sepenuhnya linear terhadap perubahan sinyal kendali, sehingga posisi akhir aktuator cenderung mengalami deviasi kecil terhadap sudut target.

Delay sistem yang berasal dari waktu pemrosesan mikrokontroler Arduino ATmega serta respons mekanik servo turut menyebabkan keterlambatan dalam proses pengarahan terhadap target. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mengalami waktu tunda rata-rata sebesar **±0,3 detik**, yang berdampak pada menurunnya kemampuan sistem dalam mengikuti perubahan posisi target secara cepat.

Parameter	Kondisi Ideal	Kondisi Aktual	Dampak terhadap Sistem
Noise Sensor	Delay Sistem	Data fluktuatif	Perubahan sudut tidak konsisten
Backlash Servo	Presisi	Terdapat celah mekanik	Deviasi posisi aktuator
Delay Sistem	Real-time	Terlambat ±0,3 detik	Respons tracking melambat

Secara keseluruhan, keterbatasan tersebut mempengaruhi performa sistem dalam melakukan proses pointing terhadap target dinamis, khususnya pada aspek akurasi posisi dan kecepatan respons aktuator selama proses pengarahan berlangsung.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan implementasi yang telah dilakukan, sistem pointing sensor dua sumbu berbasis motor servo dengan memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SR04 berhasil direalisasikan sebagai bagian dari prototipe subsistem dalam arsitektur SEWACO berbasis *low-cost embedded system*. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan proses deteksi jarak terhadap objek serta mengarahkan aktuator pada sumbu azimut dan elevasi secara otomatis sesuai dengan posisi target dalam ruang kerja pengujian.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi antara mikrokontroler Arduino ATmega, sensor ultrasonik HC-SR04, serta motor servo sebagai aktuator gerak memungkinkan sistem untuk melakukan proses pointing terhadap target secara stabil pada rentang jarak yang telah ditentukan. Rata-rata error sudut yang diperoleh selama proses pengujian berada

pada kisaran 3,72° untuk sumbu azimut dan 0,41° untuk sumbu elevasi, yang masih berada dalam batas toleransi untuk implementasi sistem prototipe laboratorium.

Meskipun demikian, kinerja sistem masih dipengaruhi oleh beberapa keterbatasan teknis, di antaranya gangguan noise pada pembacaan sensor, adanya backlash pada mekanisme gear servo, serta delay sistem yang berasal dari waktu pemrosesan mikrokontroler dan respons mekanik aktuator dengan waktu tunda rata-rata sebesar kurang lebih 0,3 detik. Faktor-faktor tersebut berdampak terhadap akurasi posisi serta kecepatan respons sistem dalam mengikuti perubahan posisi target.

Secara umum, sistem pointing dua sumbu yang dirancang dalam penelitian ini mampu merepresentasikan mekanisme dasar pengarahan perangkat sensor terhadap target secara otomatis dalam ruang kerja dua dimensi. Oleh karena itu, sistem yang dihasilkan dapat digunakan sebagai model awal dalam pengembangan subsistem pointing sensor pada arsitektur SEWACO sebelum diimplementasikan pada sistem operasional dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] D. B. Sajiwo, S. D. Ayuni, and I. Anshory, "Rancang Bangun Sistem Pointing Sensor Dua Sumbu (Azimut dan Elevasi) Berbasis Servo Motor Menggunakan Sensor Ultrasonik HC-SR04 sebagai Bagian dari Subsistem SEWACO," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sidoarjo*, vol. 5, no. 2, pp. 45–54, 2024.

[2] R. U. H. Udphzrun *et al.*, "A Cloud Network Framework Based on Artificial Intelligence," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 1460–1464, 2020, doi: 10.1109/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom51426.2020.00219.

[3] D. Buchman, M. Drozdov, T. Krilavičius, and R. Maskeliūnas, "Pedestrian and Animal Recognition Using Doppler Radar Signature and Deep Learning," *Sensors*, vol. 22, no. 3, pp. 1–18, 2022.

[4] S. Kim, S. R. Lee, S. Lee, and D. Lee, "Collateral Compression Mechanism in Robotic Actuators," *Journal of Mechanical Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 112–120, 2022.

[5] C. Free, S. Mode, S. Dependent, and C. Process, "Chattering Free Sliding Mode Control and State Dependent Kalman Filter Design for Underground Gasification Energy Conversion Process," *Control Engineering Practice*, vol. 131, p. 105432, 2023.

[6] S. H. W. Ang and A. O. Y. Ang, "Dynamics of Optical Rogue Wave Generation in Dispersion Oscillating Fibers," *Optics Express*, vol. 28, no. 14, pp. 19877–19886, 2020, doi: 10.1364/OE.394002.

[7] F. Schollemann *et al.*, "An Anatomical Thermal 3D Model in Preclinical Research: Combining CT and Thermal Images," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 135, pp. 1–16, 2021.

[8] P. Calibration, "A CMM-Based Method of Control Point Calibration for Industrial Robots," *Precision Engineering*, vol. 64, pp. 88–95, 2020.

[9] Z. Shen *et al.*, "Long-Wave Infrared Sub-Monolayer Quantum Dot Quantum Cascade Photodetector," *IEEE Photonics Journal*, vol. 39, no. 5, pp. 1489–1496, 2021.

[10] P. Rawal, C. Engineering, S. Rawat, and C. Engineering, "A Bowtie Shaped Frequency Reconfigurable Microstrip Patch Antenna with Wide Coverage Area," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 100, pp. 5–8, 2020.

[11] A. Pratama and H. Santoso, "Implementasi Kendali PID pada Motor Servo untuk Sistem Pelacakan Posisi Sumbu Ganda," *Jurnal Otomasi dan Kendali*, vol. 8, no. 1, pp. 33–40, 2023.

[12] M. Ridwan, "Analisis Akurasi Sensor Ultrasonik HC-SR04 pada Sistem Navigasi Robot Bergerak," *Jurnal Ilmiah Teknologi Infokom*, vol. 11, no. 2, pp. 101–108, 2022.

[13] T. Gunawan, *Sistem Kendali Embedded dan Aplikasinya pada Mikrokontroler*, 2nd ed. Yogyakarta: Andi Offset, 2021.

[14] E. Susanto and R. Wibisono, "Evaluasi Kinerja Mekanisme Gearbox pada Motor Servo Standar Industri," *Jurnal Teknik Mekatronika*, vol. 6, no. 3, pp. 140–147, 2024.

[15] H. Wijaya, "Perancangan Subsistem Sensor dan Senjata Berbasis Mikrokontroler untuk Prototipe Pertahanan," *Jurnal Pertahanan dan Teknologi Militer*, vol. 7, no. 1, pp. 55–63, 2025.