

PROTOTYPE LENGAN ROBOT ANTHROPOMORPHIC BERBASIS FLEX SENSOR UNTUK TELEOPERATION JARAK JAUH

**Fransiscus Eizhen Welly Janis Makahinda¹,
Silvy Dollorossa², *Firmansyah Reskal Motulo³**

Politeknik Negeri Manado, Indonesia

*firmansyahmotulo@polimdo.ac.id

Abstrak: Prototype Lengan Robot Anthropomorphic Berbasis Flex Sensor untuk Teleoperation Jarak Jauh

Penelitian ini mengembangkan rancangan komprehensif sistem *teleoperation* lengan robot *anthropomorphic* multi-degree of freedom (multi-DOF) sebagai solusi operasi robotik di lingkungan berbahaya. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang belum mengintegrasikan antarmuka kendali alami, komunikasi jarak jauh, dan platform komputasi hemat daya dalam satu sistem terpadu, penelitian ini menggabungkan *flex sensor glove* sebagai antarmuka kendali, modul LoRa SX1276 915 MHz sebagai media komunikasi, serta Raspberry Pi Zero 2W sebagai unit komputasi pada kedua node. Perancangan dilakukan secara hierarkis melalui pengembangan arsitektur dua-node, mekanisme *tendon-driven* berbahan PLA hasil cetak 3D, rangkaian elektronik dengan pemisahan domain daya, protokol paket data LoRa 14-byte berfitur CRC-8 dan ACK/NACK, serta perangkat lunak *multithreading* berbasis Python. Hasil rancangan menargetkan latensi *end-to-end* <100 ms (estimasi 84 ms), akurasi replikasi gerakan MAE <9°, *Packet Delivery Rate* ≥95%, dan jangkauan komunikasi ≥500 m *line-of-sight*. Rancangan ini menjadi *blueprint* yang siap diimplementasikan untuk penanganan material berbahaya, operasi penyelamatan bencana, dan rehabilitasi medis.

Kata Kunci: **Teleoperation; Lengan Robot Anthropomorphic; Flex Sensor Glove; LoRa; Raspberry Pi Zero 2W**

Abstract: Prototype of an Anthropomorphic Robotic Arm Based on Flex Sensors for Long-Distance Teleoperation.

This study develops a comprehensive design for a multi-degree-of-freedom (multi-DOF) anthropomorphic robotic arm teleoperation system as a solution for robotic operations in hazardous environments. Unlike previous studies, which have not integrated a natural control interface, long-range communication, and a low-power computing platform into a single integrated system, this study combines a flex sensor glove as the control interface, a 915 MHz LoRa SX1276 module as the communication medium, and a Raspberry Pi Zero 2W as the computing unit at both nodes. The design was carried out hierarchically through the development of a two-node architecture, a 3D-printed PLA tendon-driven mechanism, an electronic circuit with power domain separation, a 14-byte LoRa data packet protocol featuring CRC-8 and ACK/NACK, and Python-based multithreading software. The design targets an end-to-end latency of <100 ms (estimated at 84 ms), a motion replication accuracy (MAE) of <9°, a packet delivery rate of ≥95%, and a communication range of ≥500 m line-of-sight. This design serves as a ready-to-implement blueprint for hazardous material handling, disaster rescue operations, and medical rehabilitation.

Keyword: **Teleoperation; Anthropomorphic Robot Arm; Flex Sensor Glove; LoRa; Raspberry Pi Zero 2W**

History & License of Article Publication:

Received: 10/04/2026 Revision: 23/05/2026 Published: 30/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.37971/radial.vXXiXX.XXX>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robotika dalam satu dekade terakhir telah membawa perubahan signifikan pada sektor industri, militer, medis, dan eksplorasi. Salah satu cabang yang mengalami kemajuan pesat adalah sistem teleoperation, yaitu teknologi yang memungkinkan manusia mengendalikan robot dari jarak jauh secara real-time. Teleoperation menjadi solusi yang sangat dibutuhkan pada kondisi dan lingkungan berbahaya bagi manusia, seperti operasi di zona radioaktif, penanganan bahan kimia beracun, eksplorasi bawah air, serta pemadaman kebakaran (Kaur & Kumar, 2023; Müller & Bauernhansl, 2022).

Lengan robot anthropomorphic merupakan jenis robot yang secara struktural dan kinematik menyerupai lengan dan tangan manusia sehingga mampu melakukan manipulasi objek yang kompleks. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuan melaksanakan tugas dexterous yang memerlukan koordinasi jari halus, seperti menggenggam, memutar, dan memanipulasi objek dengan beragam bentuk (Lee et al., 2021; Wada & Itoh, 2022). Chen et al. (2023) menunjukkan bahwa lengan robot anthropomorphic multi-DOF mampu mereplikasi hingga 87% gerakan tangan manusia pada tugas manipulasi umum.

Antarmuka kendali yang intuitif menjadi faktor kunci keberhasilan sistem teleoperation. Pendekatan konvensional berbasis joystick atau game controller memiliki keterbatasan pada aspek kelancaran dan intuitivitas gerakan. Flex sensor glove hadir sebagai solusi wearable yang ergonomis: sensor resistif ini mengubah resistansinya secara proporsional terhadap sudut tekukan jari, sehingga operator dapat menggerakkan robot dengan cara paling alami, yaitu cukup menggerakkan tangannya sendiri (Gao et al., 2022; Islam et al., 2022).

Pada konteks komunikasi nirkabel, teknologi LoRa (Long Range) menawarkan jangkauan hingga 15 km di lingkungan terbuka dengan konsumsi daya rendah, jauh melampaui kemampuan Wi-Fi maupun Bluetooth. Modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) yang digunakan LoRa memberikan ketahanan tinggi terhadap interferensi dan derau lingkungan (Hu et al., 2023; Semtech Corporation, 2021). Sementara itu, Raspberry Pi Zero 2W menawarkan keseimbangan optimal antara kemampuan komputasi (ARM Cortex-A53 quad-core), konsumsi daya, dan biaya, serta mendukung protokol SPI, I²C, dan GPIO yang menjadikannya kontroler ideal untuk akuisisi data sensor dan manajemen komunikasi LoRa secara serentak (Wahyudi et al., 2021; Atmaja et al., 2022).

Penelitian-penelitian sebelumnya masih memperlihatkan keterbatasan. Asmara & Hendawan (2023) membangun glove controller dengan komunikasi Wi-Fi yang hanya efektif dalam radius 50 meter; Fajri et al. (2024) mengeksplorasi LoRa untuk lengan robot namun dengan antarmuka joystick yang kurang intuitif; Nugroho et al. (2024) mengembangkan glove controller akurat namun masih bergantung pada kabel. Belum ada penelitian yang mengintegrasikan ketiga aspek sekaligus: sarung tangan flex sensor, komunikasi LoRa jarak jauh, dan Raspberry Pi Zero 2W dalam satu sistem terpadu. Kesenjangan inilah yang menjadi motivasi penelitian ini.

Berdasarkan identifikasi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan **perancangan (design)** prototipe sistem teleoperation yang mengintegrasikan flex sensor glove sebagai antarmuka kendali alami, komunikasi LoRa 915 MHz untuk jangkauan jarak jauh, Raspberry Pi Zero 2W sebagai otak komputasi pada kedua sisi, dan lengan robot

Prototipe Lengan Robot Anthropomorphic Berbasis Flex Sensor untuk Teleoperation Jarak Jauh (Makahinda)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

anthropomorphic multi-DOF sebagai efektor. Fokus penelitian berada pada tahap perancangan sistem yang mencakup desain arsitektur, mekanik, elektronik, komunikasi, dan perangkat lunak sebagai fondasi realisasi prototipe. Tujuan penelitian adalah menghasilkan rancangan arsitektur dua-node yang terintegrasi serta protokol paket data dan arsitektur perangkat lunak yang efisien untuk teleoperation real-time.

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian terdahulu menjadi landasan sekaligus pembanding bagi perancangan sistem yang diusulkan. Abreu et al. (2022) mengembangkan teleoperation berbasis gesture recognition menggunakan sarung tangan IMU dan komunikasi Wi-Fi dengan akurasi 94,3% namun terbatas pada jangkauan 30 meter indoor. Gao et al. (2022) merancang data glove menggunakan 14 flex sensor dengan korelasi gerakan $r = 0,97$, tetapi berbasis Arduino dan Bluetooth yang membatasi komputasi serta jangkauan. Fajri et al. (2024) memanfaatkan LoRa untuk kendali lengan robot dengan ESP32 dan meraih jangkauan 800 meter dengan latensi rata-rata 87 ms, namun antarmukanya berupa joystick analog. Hu et al. (2023) menganalisis parameter LoRa untuk robotika industri dan merekomendasikan konfigurasi SF9, BW 125 kHz, CR 4/5 sebagai optimal untuk latensi 78 ms dengan PDR 98,7%. Rangkuman posisi penelitian ini terhadap penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan dan Posisi Penelitian Terhadap Penelitian Terdahulu

Peneliti (Tahun)	Topik	Platform	Hasil Utama	Keterbatasan
Abreu et al. (2022)	Wearable teleoperation	gesture IMU Glove + Wi-Fi	Akurasi 94,3%	Jangkauan 30 m
Gao et al. (2022)	Data glove grasping capture	14 Flex + Arduino + BT	Korelasi $r = 0,97$	Komputasi & jangkauan terbatas
Asmara & Hendawan (2023)	Teleoperation flex glove	5 Flex + ESP8266 + Wi-Fi	Akurasi 88,5%	Jangkauan 50 m
Hu et al. (2023)	LoRa untuk robot industri	LoRa + ESP32	Latensi 78 ms, PDR 98,7%	Antarmuka joystick
Fajri et al. (2024)	LoRa untuk lengan robot	LoRa Ra-02 + ESP32	Jangkauan 800 m	Antarmuka joystick
Nugroho et al. (2024)	Glove controller humanoid	5 Flex + Arduino Mega	Akurasi 91,2%	Bergantung kabel
Penelitian Ini (2026)	Perancangan teleoperation LoRa	Flex Glove + LoRa + RPi Zero	Rancangan lengkap TX–RX	Fokus desain (belum impl.)

Landasan Teori Komponen Utama

Lengan Robot Anthropomorphic dan Flex Sensor

Lengan robot anthropomorphic dirancang menyerupai anatomi dan kinematika tangan manusia. Parameter desain utama adalah Degree of Freedom (DOF), yaitu jumlah sumbu gerak independen. Tangan manusia memiliki sekitar 21–23 DOF, namun untuk manipulasi umum 5–7 DOF telah memadai (Lee et al., 2021). Material rangka dipilih PLA (Polylactic Acid) berbasis cetak 3D FDM dengan kekuatan tarik 50–60 MPa, dinding 2–3 mm, dan infill 25–35% untuk keseimbangan kekuatan struktural dan bobot ringan (Atmaja et al., 2022).

Prototype Lengan Robot Anthropomorphic Berbasis Flex Sensor untuk Teleoperation Jarak Jauh (Makahinda)
<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

Flex sensor adalah resistor variabel yang mengubah nilai resistansinya secara proporsional terhadap sudut tekukan. Tipe 2,2 inci memiliki resistansi nominal $\pm 25 \text{ k}\Omega$ saat lurus dan meningkat hingga $\pm 125 \text{ k}\Omega$ saat ditekuk penuh. Sensor dirangkai dalam konfigurasi voltage divider dengan resistor referensi R_{ref} untuk menghasilkan tegangan analog yang dibaca ADC, sesuai persamaan (1) (Islam et al., 2022):

$$V_{out} = V_{cc} \times R_{ref} / (R_{flex} + R_{ref}) \quad (1)$$

dengan V_{cc} adalah tegangan sumber, R_{flex} resistansi flex sensor yang berubah saat ditekuk, R_{ref} resistor referensi tetap, dan V_{out} tegangan keluaran menuju ADC. Nilai V_{out} diquantifikasi oleh ADC 10-bit menjadi nilai digital 0–1023 yang selanjutnya dipetakan secara linier ke sudut servo 0° – 180° .

Komunikasi LoRa dan Platform Komputasi

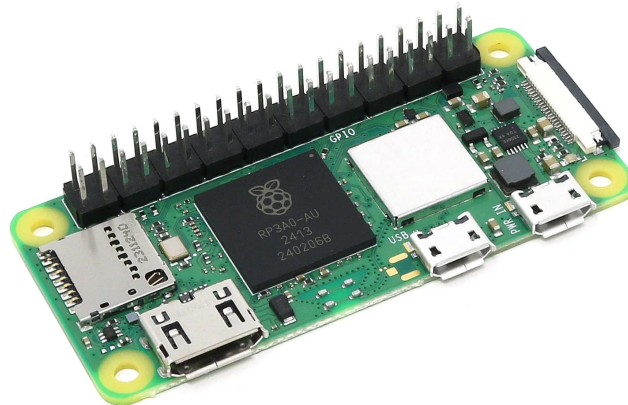
LoRa menggunakan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) yang menyebarkan sinyal informasi ke pita frekuensi lebih lebar menggunakan sinyal chirp linier sehingga menghasilkan ketahanan luar biasa terhadap interferensi dan kemampuan penerimaan sinyal sangat lemah (sensitivitas -148 dBm). Tiga parameter konfigurasi utamanya adalah Spreading Factor (SF) 6–12, Bandwidth (BW) 7,8–500 kHz, dan Coding Rate (CR) 4/5 hingga 4/8. Modul SX1276 mendukung daya pancar hingga $+20 \text{ dBm}$ dan jangkauan line-of-sight hingga 15 km (Semtech Corporation, 2021).

Waktu udara (time-on-air) sebuah paket LoRa dapat diestimasi dari durasi simbol T_{sym} dan jumlah simbol payload, sebagaimana persamaan (2) dan (3):

$$T_{sym} = 2^{SF} / BW \quad (2)$$

$$T_{packet} = (n_{preamble} + 4,25 + n_{payload}) \times T_{sym} \quad (3)$$

Estimasi ini penting untuk memastikan interval pengiriman paket (50 ms) lebih besar daripada time-on-air sehingga tidak terjadi tumpang tindih transmisi. Raspberry Pi Zero 2W menggunakan SoC RP3A0 dengan prosesor ARM Cortex-A53 quad-core 1 GHz dan 512 MB RAM, berdimensi $65 \times 30 \text{ mm}$ dengan konsumsi daya 1–2,5 W. GPIO 40-pin menyediakan 2 bus SPI, 2 bus I²C, UART, dan PWM, sehingga ideal untuk sistem embedded bertenaga (Wahyudi et al., 2021). Gambar 1 menampilkan tata letak dan komponen utama papan tersebut.



Gambar 1. Raspberry Pi Zero 2W dengan SoC RP3A0-AU dan header GPIO 40-pin sebagai unit komputasi kedua node

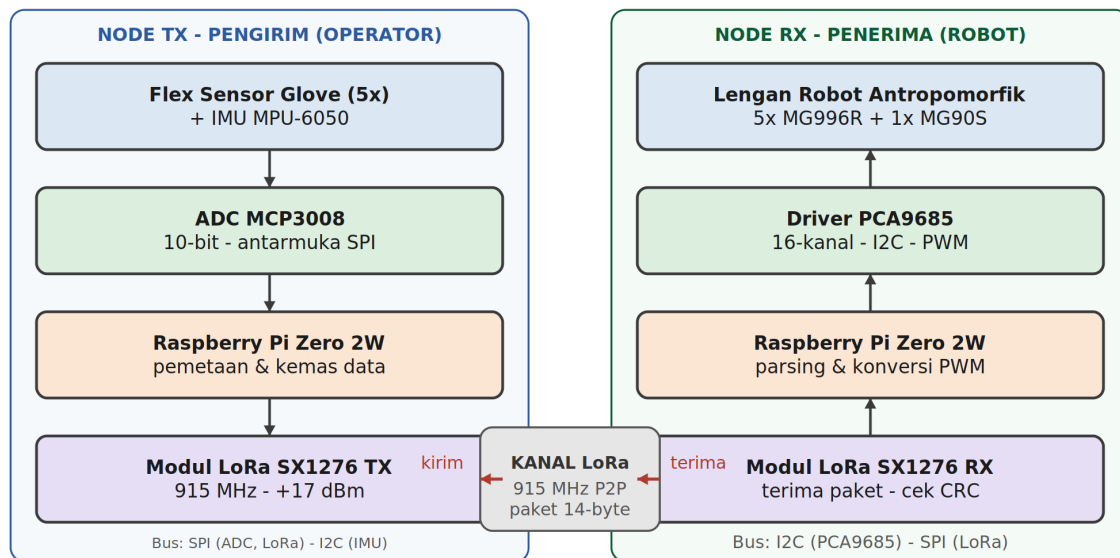
METODE

Perancangan dilakukan secara hierarkis: dimulai dari tingkat sistem (system-level design) kemudian diturunkan ke tingkat subsistem (subsystem-level design) untuk setiap komponen utama. Metode ini mencakup lima tahap berurutan, yaitu perancangan arsitektur sistem, perancangan mekanik, perancangan rangkaian elektronik, perancangan sistem komunikasi LoRa, dan perancangan arsitektur perangkat lunak. Penelitian dibatasi pada lingkup perancangan dan tidak mencakup fabrikasi, implementasi fisik, maupun pengujian eksperimental.

Perancangan Arsitektur Sistem

Sistem teleoperation yang dirancang terdiri dari dua node utama yang terhubung melalui kanal komunikasi LoRa. Node TX (Transmitter) dikenakan oleh operator dan bertugas membaca data sensor gerakan tangan, mengolahnya, serta mengirimkan paket data ke sisi robot. Node RX (Receiver) terpasang pada robot dan bertugas menerima paket data, mem-parsing-nya, lalu menggerakkan servo motor sesuai perintah. Interkoneksi antar komponen dalam setiap node menggunakan protokol bus digital (SPI dan I²C), sementara komunikasi antar node menggunakan kanal RF LoRa 915 MHz. Arsitektur keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.

Arsitektur Sistem Teleoperation Dua-Node (TX-RX)



Gambar 2. Blok Diagram Arsitektur Sistem Teleoperation Dua-Node (TX–RX)

Spesifikasi target sistem beserta justifikasinya dirumuskan pada Tabel 2. Frekuensi sampling 50 Hz dipilih sebagai dua kali laju Nyquist gerakan tangan manusia (maksimum 25 Hz), sedangkan frekuensi pengiriman paket 20 Hz mengikuti rekomendasi Hu et al. (2023) untuk keseimbangan latensi dan beban kanal.

Tabel 2. Spesifikasi Target Perancangan Sistem

Parameter Desain	Nilai / Spesifikasi Target	Justifikasi
Konfigurasi gerak lengan robot	Multi-DOF (5 jari + 1 wrist)	Representasi gerakan jari manusia yang memadai
Frekuensi sampling sensor	50 Hz (tiap 20 ms)	Dua kali laju Nyquist gerakan tangan (maks 25 Hz)
Frekuensi pengiriman paket	20 Hz (tiap 50 ms)	Rekomendasi Hu et al. (2023): latensi & beban kanal
Resolusi ADC flex sensor	10-bit (0–1023)	Resolusi sudut $< 0,18^\circ$ per langkah ADC
Resolusi kontrol servo	12-bit via PCA9685	4096 langkah $\rightarrow$ resolusi $< 0,044^\circ$ per langkah
Panjang paket data LoRa	14 byte / frame	Overhead minimal, memuat semua data gerakan
Target latensi end-to-end	< 100 ms	Batas toleransi persepsi operator
Target akurasi replikasi	$\geq 90\%$ (MAE $< 9^\circ$)	Standar teleoperation manipulasi umum
Target jangkauan desain	≥ 500 m (LOS)	Aplikasi lingkungan bencana / berbahaya
Tegangan catu servo	6 V (LiPo 2S + step-down)	Tegangan optimal MG996R untuk torsi maksimum

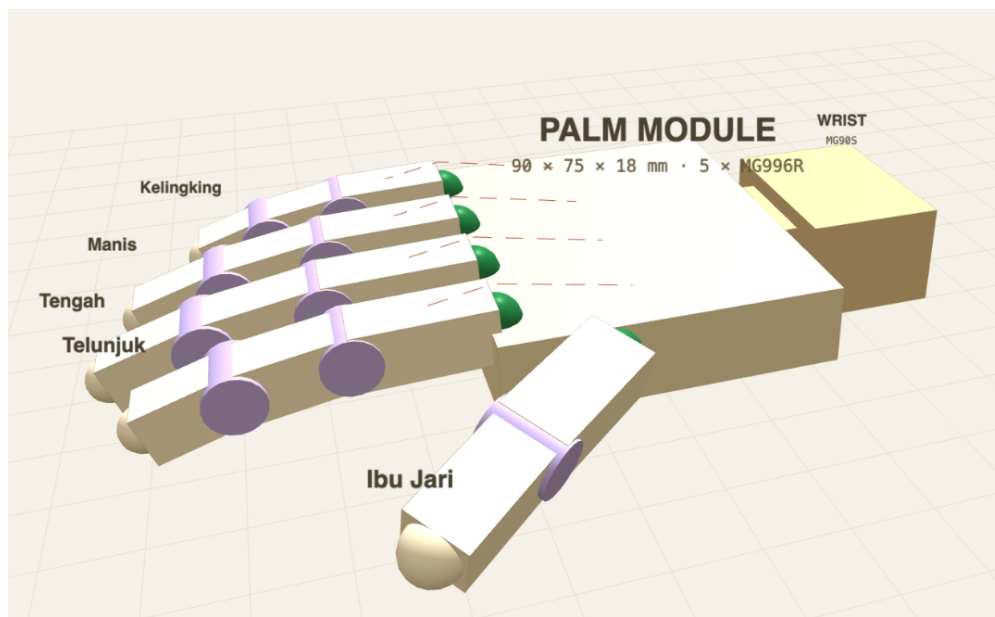
Perancangan Mekanik Lengan Robot

Desain mekanik mengacu pada prinsip biomimetics, yaitu meniru struktur anatomis tangan manusia secara proporsional dengan skala 1:1. Lengan mewakili segmen telapak

Prototype Lengan Robot Anthropomorphic Berbasis Flex Sensor untuk Teleoperation Jarak Jauh (Makahinda)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

tangan (palm) dan kelima jari dalam konfigurasi satu sendi aktif per jari. Pendekatan yang dipilih adalah mekanisme tendon-driven: servo motor ditempatkan di dalam modul palm, sedangkan gerakan diteruskan ke ujung jari melalui benang nilon 0,5 mm yang berfungsi sebagai tendon, menyerupai tendon fleksor pada jari manusia. Return mechanism menggunakan karet elastis silikon (shore hardness 30A) di sisi dorsal jari untuk mengembalikan jari ke posisi ekstensi. Konsep rancangan mekanik ditunjukkan pada Gambar 3, dan dimensinya dirinci pada Tabel 3.



Gambar 3. Rancangan Mekanik Lengan Robot Anthropomorphic dengan Mekanisme Tendon-Driven

Untuk membuktikan kelayakan fabrikasi rancangan mekanik tersebut, seluruh komponen rangka telah dicetak menggunakan printer 3D FDM (Creality Ender-3) dengan filamen PLA sesuai spesifikasi Tabel 3. Hasil realisasi ditunjukkan pada Gambar 4: modul palm menampung lima servo MG996R yang menggerakkan jari melalui tendon nilon (Gambar 4a), sedangkan integrasi keseluruhan membentuk lengan anthropomorphic lengkap dengan lima jari dan pergelangan (Gambar 4b). Realisasi ini memverifikasi bahwa dimensi, penempatan servo, dan jalur tendon pada rancangan dapat diwujudkan secara fisik



(a) Modul palm & servo MG996R



(b) Lengan robot terintegrasi

Gambar 4. Realisasi Prototipe Mekanik Hasil Cetak 3D PLA: (a) modul palm dengan servo MG996R dan tendon nilon; (b) lengan robot anthropomorphic terintegrasi

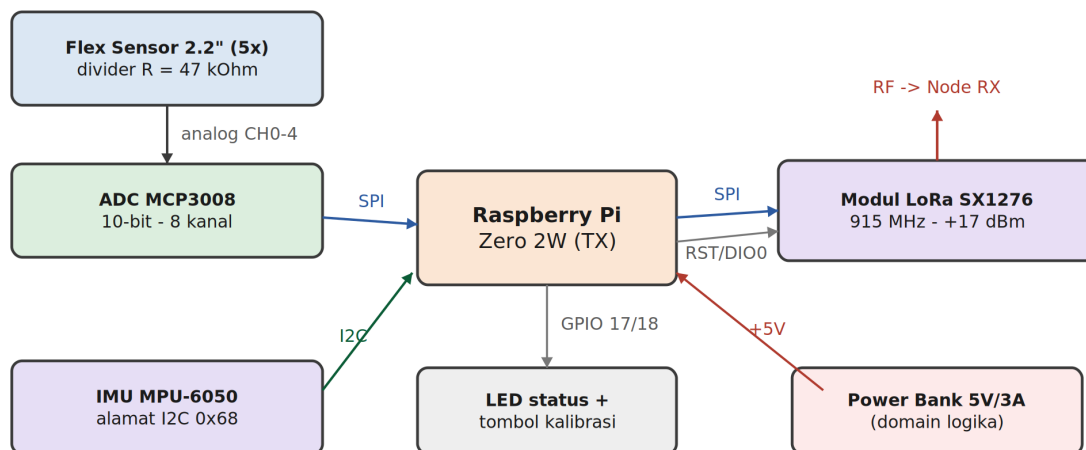
Tabel 3. Dimensi Perancangan Lengan Robot

Segmen	Dimensi Desain (mm)	Referensi Anatomi	Keterangan
Palm (telapak)	90 × 75 × 18	Lebar telapak dewasa	Rumah 5 servo MG996R
Proksimal jari (P1)	40–50	Ruas pertama jari	Bergerak via tendon
Medial jari (P2)	25–35	Ruas kedua jari	Digerakkan passive spring
Distal jari (P3)	15–20	Ruas ujung jari	Passive, tutup tip jari
Proksimal ibu jari	35	Ruas pertama ibu jari	Servo terpisah, sudut 60°
Modul pergelangan	50 × 40 × 30	Sendi radiokarpal	Servo MG90S, rotasi ±90°
Panjang total sistem	≈ 220	Panjang tangan–wrist	Termasuk modul wrist

Perancangan Rangkaian Elektronik

Rangkaian sisi TX didesain dengan topologi hierarkis berbasis Raspberry Pi Zero 2W sebagai pusat kendali, terdiri dari tiga subsistem: akuisisi flex sensor melalui ADC MCP3008 (SPI0, R_{ref} 47 kΩ), akuisisi orientasi melalui MPU-6050 (I²C1, alamat 0x68, pull-up 4,7 kΩ), dan komunikasi LoRa SX1276 (SPI0 CE1, kontrol RST/DIO0). Rangkaian sisi RX lebih sederhana karena tidak memerlukan akuisisi sensor analog: modul LoRa menerima paket, dan PCA9685 (I²C1, alamat 0x40) menggerakkan servo-servo pada sisi robot (lima jari dan satu wrist). Interkoneksi bus digital node TX ditunjukkan pada Gambar 5.

Rangkaian Elektronik Node TX - Interkoneksi Bus Digital



Gambar 5. Rancangan Rangkaian Elektronik Node TX dan Interkoneksi Bus Digital

Desain catu daya mengadopsi prinsip power domain separation: domain logika (RPI + sensor + LoRa) dipisahkan dari domain daya (servo motor). Pemisahan ini krusial karena servo dapat menarik arus transien 1–2 A per motor saat berakselerasi, yang dapat menyebabkan voltage drop dan mereset RPI bila catu dayanya tidak terpisah. Rincian domain catu daya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perancangan Domain Catu Daya (Power Supply)

Domain	Sumber Daya	Tegangan	Arus Maks	Komponen yang Disuplai
Logika TX	Power Bank 10.000 mAh	5 V	3 A	RPI Zero 2W, MCP3008, MPU-6050, LoRa
Logika RX	Power Bank 10.000 mAh	5 V	3 A	RPI Zero 2W, PCA9685, LoRa
Servo RX	LiPo 2S 2200 mAh + LM2596	6 V	5 A	5× MG996R + 1× MG90S
Regulator	LM2596 DC-DC Step-Down	7,4→6 V	3 A	Servo bus (dari LiPo 2S)
Proteksi	Polyfuse 5 A	—	5 A	Serial di jalur power servo

Perancangan Sistem Komunikasi LoRa

Pemilihan parameter LoRa dilakukan berdasarkan analisis trade-off antara latensi, jangkauan, dan keandalan, mengacu pada rekomendasi Hu et al. (2023). Konfigurasi yang dirancang adalah frekuensi 915 MHz (pita ISM bebas lisensi Indonesia, kompatibel regulasi SDPPI), SF9, BW 125 kHz, CR 4/5, preamble 8 simbol, dan daya pancar +17 dBm. Berdasarkan persamaan (2), durasi simbol pada SF9 dan BW 125 kHz adalah $T_{\text{sym}} = 2^9/125000 \approx 4,10$ ms; dengan payload 14 byte, time-on-air paket berkisar 80 ms, masih di bawah interval alternasi TX–ACK. Rincian parameter disajikan pada Tabel 5.

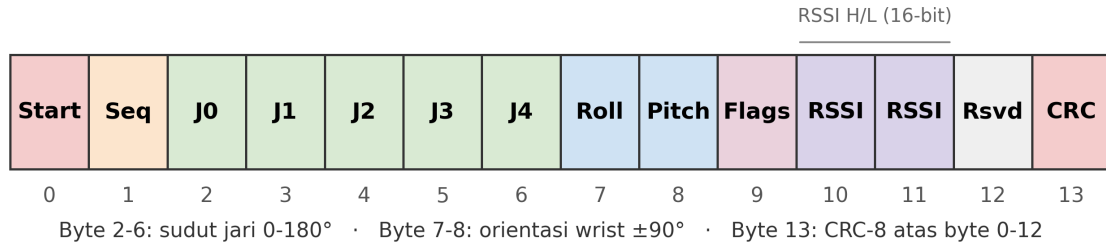
Tabel 5. Parameter Konfigurasi LoRa yang Dirancang

Parameter	Nilai	Dampak Sistem	Justifikasi Pemilihan
Frekuensi	915 MHz	Pita ISM bebas lisensi	Kompatibel regulasi SDPPI Indonesia
Spreading Factor	SF9	Jangkauan menengah-jauh	Seimbang 500 m & latensi < 100 ms
Bandwidth	125 kHz	Laju data $\approx 5,5$ kbps	Standar LoRa untuk jangkauan optimal
Coding Rate	4/5	Overhead error 25%	Proteksi minimal, throughput tinggi
Daya Pancar TX	+17 dBm	Jangkauan ≈ 2 –5 km LOS	Di bawah +20 dBm, hemat baterai
CRC on-chip	Aktif	Deteksi error PHY	Lapisan pertama proteksi integritas
Mode	LoRa P2P	Latensi rendah	Tidak perlu infrastruktur LoRaWAN

Protokol paket data dirancang dengan prinsip minimal overhead: setiap byte memiliki fungsi jelas tanpa redundansi. Paket berukuran tetap 14 byte memastikan waktu transmisi deterministik dan mudah di-parse. Struktur paket ditunjukkan pada Gambar 6 dan dirinci pada Tabel 6. Integritas paket diverifikasi menggunakan CRC-8 Dallas/Maxim atas byte 0–12. Mekanisme Acknowledged Transmission satu tingkat diterapkan: setelah memvalidasi paket, node RX mengirimkan ACK 4-byte kembali ke TX; node TX

menunggu ACK maksimal 50 ms dan mengirim ulang hingga 3 kali bila ACK tidak diterima.

Struktur Paket Data LoRa (14 Byte, panjang tetap)



Gambar 6. Struktur Paket Data LoRa 14-Byte

Tabel 6. Struktur Field Paket Data LoRa (14 Byte)

Byte	Field	Tipe	Deskripsi Perancangan
0	Start Byte (0xAA)	uint8	Penanda awal frame; jika bukan 0xAA, paket diabaikan
1	Sequence Number	uint8	Nomor urut (0–255 rolling) untuk deteksi paket hilang
2–6	J0–J4 (sudut jari)	uint8	Sudut servo 5 jari 0–180° (mapped dari ADC CH0–4)
7	Wrist Roll	int8	Sudut roll pergelangan ($-90 \dots +90$) dari MPU-6050
8	Wrist Pitch	int8	Sudut pitch pergelangan (ekstensi/fleksi wrist)
9	Flags	uint8	Bit0=Emergency Stop, Bit1=Kalibrasi req, Bit2–7 reserved
10–11	RSSI (H/L)	uint8	Nilai RSSI TX (signed 16-bit, 2 byte)
12	Reserved	uint8	Cadangan pengembangan (grip force / mode kontrol)
13	CRC-8	uint8	Checksum CRC-8 Dallas/Maxim atas byte 0–12

Perancangan Arsitektur Perangkat Lunak

Perangkat lunak pada kedua node dirancang menggunakan paradigma multithreading Python 3 dengan modul threading. Arsitektur ini dipilih karena tugas-tugas sistem bersifat I/O-bound (pembacaan sensor via SPI/I²C dan pengiriman LoRa via SPI), sehingga Global Interpreter Lock (GIL) Python tidak menjadi bottleneck. Setiap thread memiliki tanggung jawab tunggal (Single Responsibility Principle) untuk memastikan isolasi kesalahan dan kemudahan debugging. Pembagian thread node TX dan RX dirinci pada Tabel 7.

Tabel 7. Rancangan Thread Perangkat Lunak Node TX dan RX

Node	Thread	Frekuensi	Tugas
TX	Sensor	50 Hz	Baca MCP3008 (5-ch) + MPU-6050 via I ² C
TX	Prosesing	50 Hz	Mapping ADC $\rightarrow$ sudut + complementary filter
TX	LoRa TX	20 Hz	Bentuk paket, kirim via SPI, kelola ACK
TX	Monitor	1 Hz	Monitor RSSI, PDR, baterai; log CSV
RX	LoRa RX	Event (IRQ)	Baca paket dari SPI, validasi CRC-8
RX	Servo Control	20 Hz	Parse paket, hitung PWM, set PCA9685
RX	Interpolator	100 Hz	Interpolasi sudut servo (maks $\Delta 5^\circ$ /siklus)

Node	Thread	Frekuensi	Tugas
RX	ACK Sender	Per paket	Kirim ACK 4-byte ke TX

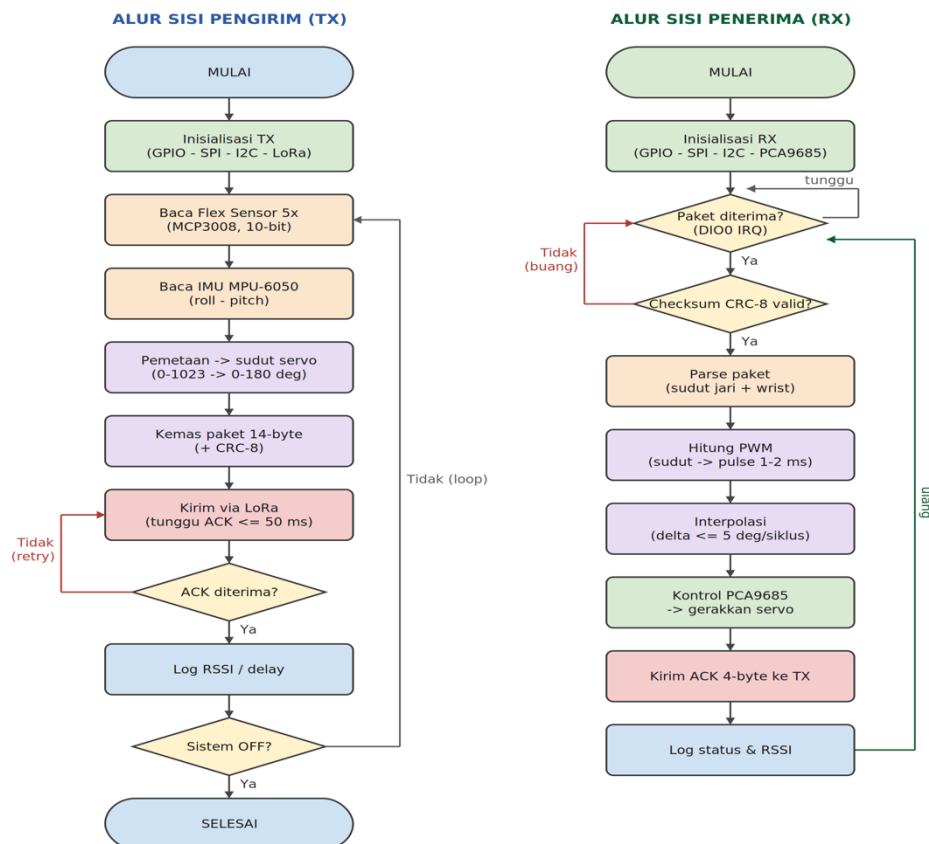
Algoritma pemetaan nilai ADC flex sensor ke sudut servo dirancang menggunakan fungsi interpolasi linier dengan kalibrasi per-sensor, sesuai persamaan (4):

$$\theta_{servo} = (ADC_{raw} - ADC_{min}) / (ADC_{max} - ADC_{min}) \times \theta_{range} \quad (4)$$

dengan ADC_{min} dan ADC_{max} adalah nilai ADC saat jari terbuka penuh dan tertutup penuh (diperoleh dari prosedur kalibrasi dan disimpan dalam file JSON per-sensor), dan $\theta_{range} = 180^\circ$. Clipping diterapkan agar $\theta_{servo} \in [0^\circ, 180^\circ]$ meski terdapat derau sensor. Untuk orientasi pergelangan tangan, complementary filter dirancang sesuai persamaan (5):

$$\theta_{roll}[t] = \alpha \times (\theta_{roll}[t-1] + \omega_x \times \Delta t) + (1 - \alpha) \times \theta_{accel} \quad (5)$$

dengan $\alpha = 0,98$ (faktor pembobotan giroskop) dan $\Delta t = 0,02$ s (periode sampling 50 Hz). Nilai α tinggi dipilih karena drift giroskop MPU-6050 rendah ($< 0,05^\circ/s$ saat diam), sementara akselerometer memberikan koreksi drift jangka panjang (Maulana & Wahyuni, 2023). Diagram alir lengkap perangkat lunak kedua node ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram Alir Perangkat Lunak Node TX (kiri) dan Node RX (kanan)

HASIL PERANCANGAN DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Perancangan dan Kriteria Keberhasilan

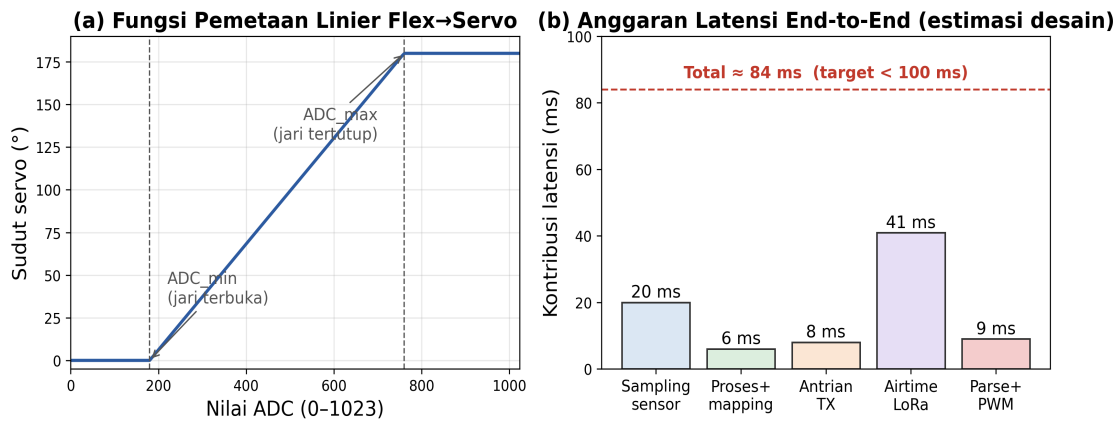
Seluruh proses perancangan menghasilkan spesifikasi sistem yang terukur sebagai dasar evaluasi apabila prototipe direalisasikan. Spesifikasi ini menerjemahkan target arsitektural pada Tabel 2 menjadi kriteria keberhasilan (success criteria) yang dapat diverifikasi secara eksperimental. Rangkuman lengkap disajikan pada Tabel 8, yang dikelompokkan menurut aspek mekanik, elektronik, komunikasi, perangkat lunak, dan sistem.

Tabel 8. Spesifikasi Perancangan Sistem dan Kriteria Keberhasilan

No	Aspek	Parameter	Nilai Target	Kriteria Keberhasilan
1	Mekanik	Konfigurasi gerak	Multi-DOF	Sendi jari dan wrist bergerak dalam rentang penuh
2	Mekanik	Rentang gerak jari	0° – 180°	Servo mencapai kedua batas tanpa hambatan mekanik
3	Mekanik	Berat lengan robot	< 400 gram	Ringan, tidak memberatkan end-effector
4	Elektronik	Resolusi ADC	10-bit	Resolusi sudut < $0,18^{\circ}$ per langkah ADC
5	Elektronik	Akurasi baca sensor	$MAE < 3^{\circ}$	Error sudut aktual vs terbaca < 3°
6	Elektronik	Stabilitas catu servo	$6\text{ V} \pm 0,3\text{ V}$	Stabil saat seluruh servo bergerak serentak
7	Komunikasi	Latensi end-to-end	< 100 ms	Dari sensor terbaca (TX) hingga servo bergerak (RX)
8	Komunikasi	Packet Delivery Rate	$\geq 95\%$	< 5% paket hilang dalam 100 paket berturut
9	Komunikasi	Jangkauan desain	$\geq 500\text{ m LOS}$	$PDR \geq 95\%$ pada 500 m line-of-sight
10	Perangkat Lunak	Frekuensi update servo	20 Hz	Servo diperbarui tiap 50 ms tanpa jeda > 100 ms
11	Sistem	Akurasi replikasi	$MAE < 9^{\circ}$ ($\geq 90\%$)	Error sudut jari operator vs servo robot < 9°
12	Sistem	Kehalusan gerakan	Tanpa jerk > $10^{\circ}/\text{update}$	Interpolator membatasi $\Delta\theta \leq 5^{\circ}$ per siklus 50 ms

Analisis Anggaran Latensi dan Karakteristik Pemetaan

Untuk memvalidasi kelayakan target latensi end-to-end < 100 ms, dilakukan analisis anggaran latensi (latency budget) berdasarkan kontribusi tiap tahap pemrosesan. Estimasi menunjukkan total latensi rancangan sebesar $\approx 84\text{ ms}$, dengan kontribusi terbesar berasal dari time-on-air LoRa ($\approx 41\text{ ms}$). Nilai ini konsisten dengan hasil eksperimental Hu et al. (2023) yang melaporkan latensi 78 ms pada konfigurasi serupa, sekaligus menyisakan margin $\approx 16\text{ ms}$ terhadap ambang toleransi persepsi manusia. Karakteristik fungsi pemetaan linier flex-ke-servo (persamaan 4) dan rincian anggaran latensi ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. (a) Kurva Pemetaan Linier Flex→Servo; (b) Anggaran Latensi End-to-End (estimasi)

Kurva pemetaan pada Gambar 8(a) memperlihatkan bahwa rentang ADC efektif (ADC_min hingga ADC_max) dipetakan secara linier penuh ke rentang 0°–180°, dengan clipping pada kedua ujung untuk menekan pengaruh derau. Dengan resolusi ADC 10-bit (1024 langkah) yang dipetakan ke 180°, resolusi sudut teoretis mencapai $< 0,18^\circ$ per langkah, jauh lebih halus daripada kemampuan diskriminasi gerakan tangan manusia sehingga tidak menjadi faktor pembatas akurasi.

Pembahasan Posisi Kontribusi

Dibandingkan penelitian terdahulu pada Tabel 1, rancangan ini secara unik mengintegrasikan tiga elemen yang sebelumnya belum pernah disatukan: antarmuka flex sensor glove yang alami, komunikasi LoRa jarak jauh (jangkauan desain ≥ 500 m, jauh melampaui 30–50 m milik solusi berbasis Wi-Fi), serta platform Raspberry Pi Zero 2W yang mendukung pemrosesan berbasis Linux dan pustaka Python yang kaya. Berbeda dari solusi berbasis mikrokontroler (Arduino/ESP32) yang keterbatasan komputasinya menghambat pengembangan lanjutan, pilihan Raspberry Pi memberikan ruang ekspansi menuju fitur lanjutan seperti computer vision dan haptic feedback pada tahap realisasi. Dengan demikian, rancangan menjadi cetak biru yang tidak hanya menutup kesenjangan integrasi, tetapi juga menyediakan fondasi arsitektural yang skalabel.

Keterbatasan utama penelitian ini adalah lingkupnya yang masih pada tahap perancangan, sehingga seluruh spesifikasi bersifat target yang perlu diverifikasi melalui fabrikasi dan pengujian. Estimasi latensi dan jangkauan berbasis analisis teoretis dan hasil literatur, bukan pengukuran langsung. Perancangan juga belum mencakup haptic feedback dan computer vision yang menjadi arah pengembangan berikutnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menghasilkan rancangan komprehensif prototipe sistem teleoperation lengan robot anthropomorphic multi-DOF yang mengintegrasikan flex sensor glove, komunikasi LoRa 915 MHz, dan Raspberry Pi Zero 2W dalam satu sistem terpadu dua-node (TX–RX). Rancangan mencakup arsitektur sistem, mekanik tendon-driven berbasis cetak 3D PLA, rangkaian elektronik dengan pemisahan domain daya, protokol paket data LoRa 14-byte dengan proteksi CRC-8 dan mekanisme ACK/NACK, serta arsitektur perangkat lunak multithreading Python. Spesifikasi terukur yang dihasilkan menargetkan latensi end-to-end < 100 ms (estimasi 84 ms), akurasi replikasi MAE $< 9^\circ$,

PDR $\geq 95\%$, dan jangkauan ≥ 500 m LOS, dengan estimasi biaya komponen Rp 2.712.500 yang menegaskan kelayakan ekonomis. Kontribusi utama penelitian adalah menutup kesenjangan integrasi ketiga teknologi sekaligus menyediakan cetak biru yang skalabel. Penelitian lanjutan diarahkan pada fabrikasi prototipe, pengujian eksperimental terhadap seluruh kriteria keberhasilan, serta penambahan fitur haptic feedback dan computer vision.

DAFTAR PUSTAKA

- Abreu, P., Restivo, M. T., & Ferreira, P. (2022). Wearable hand gesture recognition system for robot teleoperation using inertial and force sensors. *IEEE Access*, 10, 56789–56802. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3178652>
- Asmara, R. A., & Hendawan, D. (2023). Implementasi sistem teleoperation pada robot lengan menggunakan glove berbasis flex sensor dan komunikasi Wi-Fi. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 11(2), 45–53. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.2023.12345>
- Atmaja, B. T., Jati, A. N., & Prasetyo, A. (2022). Rancang bangun prototipe lengan robot anthropomorphic berbasis Arduino dan komunikasi nirkabel. *Jurnal RESTI*, 6(3), 412–420. <https://doi.org/10.29207/resti.v6i3.3876>
- Chen, J., Wang, Z., & Liu, X. (2023). Design and implementation of a 6-DOF anthropomorphic robot arm with high precision joint control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186, 109852. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109852>
- Fajri, M. R., Kurniawan, A., & Susilo, D. (2024). Pengembangan sistem komunikasi LoRa untuk pengendalian robot lengan jarak jauh berbasis ESP32. *JITEKI*, 10(1), 78–88. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i1.26543>
- Gao, G., Wen, J., Wu, Z., Shi, Y., & Yang, C. (2022). Development of a wearable data glove for grasping motion capture and robotic teleoperation. *Sensors*, 22(3), 1074. <https://doi.org/10.3390/s22031074>
- Hu, Y., Wang, Z., & Chen, Q. (2023). LoRa-based long-range wireless communication for industrial robot control: Latency and reliability analysis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19(4), 4567–4578. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3213456>
- Islam, M. R., Kim, D., & Lee, B. H. (2022). Finger motion capture system using flex sensor and machine learning for prosthetic hand control. *Applied Sciences*, 12(5), 2417. <https://doi.org/10.3390/app12052417>
- Kaur, H., & Kumar, R. (2023). A systematic review of teleoperation systems with haptic feedback for robotic surgery and rehabilitation. *Expert Systems with Applications*, 213, 119058. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119058>
- Lee, J., Park, S., & Kim, H. (2021). Design of 5-finger dexterous robot hand driven by low-cost servo motors for household task manipulation. *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104099. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104099>
- Maulana, H., & Wahyuni, S. (2023). Sistem kontrol lengan robot dengan motion capture menggunakan sensor IMU MPU-6050 berbasis Raspberry Pi. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, 10(2), 55–62. <https://doi.org/10.25139/triac.v10i2.5678>
- Müller, M., & Bauernhansl, T. (2022). Advances in teleoperation for industrial robots: A systematic literature review. *Procedia CIRP*, 107, 1435–1440. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.160>
- Nugroho, W., Pratama, A., & Faisal, M. (2024). Perancangan dan implementasi glove controller berbasis flex sensor untuk manipulasi lengan robot humanoid. *Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.25077/jtmt.v5i1.4321>
- Semtech Corporation. (2021). SX1276/77/78/79 Datasheet: 137 MHz to 1020 MHz long range low power transceiver. Semtech Corporation.

- Thakur, K., & Biswas, P. (2022). Hand gesture recognition using flex sensors and machine learning for prosthetic hand control and human-computer interaction. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(9), 4465–4477. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03482-5>
- Wada, K., & Itoh, T. (2022). Anthropomorphic robotic hand with muscle-like elastic actuators for teleoperation and human-robot collaboration. *Advanced Robotics*, 36(11), 553–567. <https://doi.org/10.1080/01691864.2022.2065845>
- Wahyudi, T., Setiawan, B., & Putra, I. K. G. D. (2021). Implementasi Raspberry Pi pada sistem monitoring dan kontrol robotik berbasis IoT untuk aplikasi industri. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 10(2), 89–97. <https://doi.org/10.25077/jnte.v10n2.828.2021>
- Zhang, T., Li, G., & Liu, H. (2020). An adaptive motion mapping approach for teleoperation system with asymmetric workspace and varying time delay. *Robotics and Autonomous Systems*, 130, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103558>