

IMPLEMENTASI SISTEM *TELEOPERATION* LENGAN ROBOT BERBASIS *FLEX* SENSOR DAN LoRa

Ahmad Niatasi Manangin¹, Silvy Dollorossa², *Firmansyah Reskal Motulo³

Politeknik Negeri Manado, Indonesia

*firmansyahmotulo@polimdo.ac.id

Abstrak: Implementasi Sistem Teleoperation Lengan Robot Berbasis Flex Sensor dan LoRa

Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan dan menguji sistem *teleoperation* lengan robot *anthropomorphic* (9 aktuator) berbasis sarung tangan lima *flex sensor* dan IMU MPU-6050 dengan komunikasi jarak jauh menggunakan LoRa SX1278 915 MHz. Raspberry Pi Zero 2 W digunakan sebagai pemroses pada sisi pengendali dan robot. Data sensor diproses melalui ADC MCP3208, difilter *moving average*, dikalibrasi, dipetakan ke PWM servo menggunakan PCA9685, serta dikendalikan dengan PID diskret, *velocity limiting*, dan *dead-zone*. Pengujian meliputi akurasi gerak, latensi, jangkauan LOS/NLOS hingga 200 m, dan konsumsi daya. Hasil menunjukkan akurasi rata-rata 92,3%, latensi 113,9–119,6 ms dengan persentil-95 di bawah 165 ms, PDR SF9 sebesar 97,8% pada 200 m LOS, eksponen *pathloss* 2,23 (LOS) dan 3,08 (NLOS), serta konsumsi daya 1,32 W. ANOVA menunjukkan perbedaan latensi antar-*spreading factor* signifikan ($p < 0,001$). Sistem terbukti layak sebagai solusi *teleoperation* portabel berbiaya rendah dengan jangkauan hingga ratusan meter.

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

Abstract: Implementation of a Flex-Sensor and LoRa-Based Robot Arm Teleoperation System

This study aims to implement and test a teleoperation system for an anthropomorphic robotic arm (9 actuators) based on a glove equipped with five flex sensors and an MPU-6050 IMU, utilizing long-range communication via a 915 MHz LoRa SX1278 module. A Raspberry Pi Zero 2 W is used as the processor on both the controller and robot sides. Sensor data is processed via an MCP3208 ADC, filtered using a moving average, calibrated, mapped to a servo PWM using a PCA9685, and controlled using discrete PID, velocity limiting, and a dead-zone. Testing included motion accuracy, latency, LOS/NLOS range up to 200 m, and power consumption. The results show an average accuracy of 92.3%, latency of 113.9–119.6 ms with a 95th percentile below 165 ms, a PDR SF9 of 97.8% at 200 m LOS, path loss exponents of 2.23 (LOS) and 3.08 (NLOS), and power consumption of 1.32 W. ANOVA revealed a significant difference in latency between spreading factors ($p < 0.001$). The system proved viable as a low-cost, portable teleoperation solution with a range of up to hundreds of meters.

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

History & License of Article Publication:

Received: 28/05/2026 **Revision:** 19/06/2026 **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

Teleoperation adalah paradigma kendali yang memungkinkan operator manusia mengendalikan robot pada lokasi berjauhan melalui suatu medium komunikasi, dengan aplikasi meliputi penanganan material berbahaya, operasi penyelamatan bencana, telesurgery, hingga eksplorasi luar angkasa (Sheridan, 1992; Hokayem & Spong, 2006; Xu et al., 2023). Kualitas sistem teleoperation ditentukan oleh fidelity peniruan gerak, latensi end-to-end, dan transparansi (Lawrence, 1993); untuk tugas manipulasi tanpa umpan balik haptic, latensi 200–500 ms masih dapat ditoleransi manusia (Xu et al., 2023).

Sarung tangan berbasis flex sensor telah terbukti efektif sebagai antarmuka penangkap gerak jari yang murah, kompak, dan bebas masalah oklusi dibandingkan pendekatan berbasis kamera (Dipietro et al., 2008; Saggio et al., 2015). Avila-Ortega et al. (2021) mencapai akurasi peniruan gerak 88,5% dengan lima flex sensor, namun jangkauan Bluetooth yang digunakan terbatas di bawah 10 m. Kim et al. (2024) meningkatkan akurasi orientasi pergelangan menjadi 91,3% dengan integrasi IMU dan kalibrasi adaptif melalui WiFi, yang juga terbatas pada jarak pendek. Di sisi lain, Almeida et al. (2023) menunjukkan bahwa LoRa pada konfigurasi SF9/BW 125 kHz/CR 4/5 mempertahankan Packet Delivery Ratio (PDR) 97,3% pada 800 m dengan latensi ± 95 ms untuk payload 48 byte, dan Rahman et al. (2022) membuktikan kelayakan Raspberry Pi Zero 2 W sebagai platform edge computing untuk kendali robot berbasis LoRa. Namun demikian, integrasi keempat teknologi tersebut flex sensor glove, Raspberry Pi Zero 2 W, ADC MCP3208, dan LoRa SX1278 dalam satu sistem teleoperation lengan robot anthropomorphic yang diuji secara komprehensif belum banyak dilaporkan dalam literatur.

Artikel ini merupakan kelanjutan dari tahap perancangan sistem yang telah didokumentasikan pada dokumen perancangan sebelumnya (proposal penelitian), yang mencakup arsitektur sistem, perancangan rangkaian elektronika beserta peta pin, perancangan perangkat lunak, algoritma pemetaan sudut ke PWM, dan perancangan mekanik lengan robot. Fokus artikel ini adalah pada tahap implementasi dan pengujian: realisasi perangkat keras dan perangkat lunak sesuai rancangan, serta analisis kuantitatif performa sistem yang meliputi akurasi peniruan gerak per sendi, latensi end-to-end, jangkauan dan keandalan komunikasi LoRa (RSSI, SNR, PDR) pada kondisi LOS dan NLOS, dan konsumsi daya. Kontribusi utama penelitian ini adalah (1) implementasi lengkap sistem teleoperation berbiaya rendah berbasis dua Raspberry Pi Zero 2 W dengan tautan LoRa point-to-point 915 MHz, (2) data empiris performa sistem pada jarak hingga 200 m, dan (3) mekanisme spreading factor adaptif berbasis RSSI yang dilaporkan melalui paket ACK.

METODE PENELITIAN

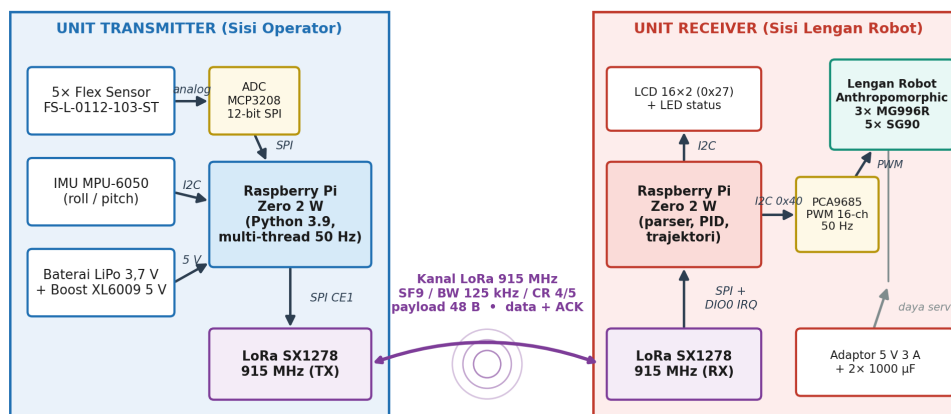
Arsitektur dan Implementasi Sistem

Sistem terdiri atas Unit Transmitter (sisi operator) dan Unit Receiver (sisi robot) yang masing-masing menggunakan Raspberry Pi Zero 2 W (SoC RP3A0, quad-core ARM Cortex-A53 1 GHz, RAM 512 MB) dan modul LoRa SX1278 915 MHz. Pada sisi transmitter, lima flex sensor FS-L-0112-103-ST (resistansi flat ± 10 k Ω) terpasang pada sarung tangan dan dibaca melalui ADC MCP3208 12-bit via SPI0 CE0, sementara IMU MPU-6050 di punggung tangan menangkap roll dan pitch pergelangan via I2C. Pada sisi receiver, paket diterima secara interrupt-driven (pin DIO0), diproses PID per sendi, lalu

Implementasi Sistem Teleoperation Lengan Robot Berbasis Flex Sensor dan LoRa (Manangin)

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

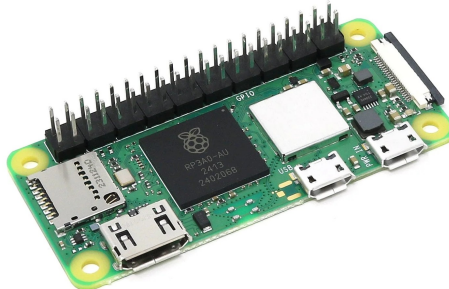
dikonversi menjadi PWM 50 Hz oleh PCA9685 (I2C, 0x40) untuk menggerakkan 3 servo MG996R (sendi J1–J3) dan 5 servo SG90 (J4 dan lima jari J5–J9) pada lengan robot berangka plastik PLA hasil cetak 3D sepenuhnya dengan panjang total ± 45 cm. Gambar 1 memperlihatkan arsitektur sistem terimplementasi.



Gambar 1. Arsitektur sistem teleoperation terimplementasi

Pengawatan kedua unit menggunakan pin GPIO Raspberry Pi Zero 2 W sebagai berikut: pada transmitter, MCP3208 menempati SPI0 CE0 (GPIO 8/9/10/11), LoRa SX1278 menempati SPI0 CE1 (GPIO 7) dengan RST pada GPIO 17 dan DIO0 pada GPIO 25, sedangkan MPU-6050 menggunakan bus I2C (GPIO 2/3). Pada receiver, PCA9685 (0x40) dan LCD 16x2 (0x27) berbagi bus I2C yang sama; dua kapasitor elektrolit 1000 μ F dipasang pada jalur 5 V servo untuk meredam jatuh tegangan saat arus puncak. Unit transmitter dicatu baterai LiPo 3,7 V 2.000 mAh melalui boost converter XL6009, sedangkan receiver dicatu adaptor 5 V 3 A. Tabel 1 merangkum spesifikasi komponen utama.

Gambar 2 memperlihatkan papan Raspberry Pi Zero 2 W yang digunakan sebagai unit pemrosesan pada kedua sisi sistem. Papan berukuran 65 mm $\times$ 30 mm ini memuat SoC RP3A0 (quad-core ARM Cortex-A53 1 GHz dengan RAM 512 MB dalam kemasan system-in-package), modul radio WiFi/Bluetooth terintegrasi, header GPIO 40-pin untuk antarmuka SPI dan I2C, slot microSD untuk sistem operasi, serta port mini-HDMI dan dua port micro-USB (data dan daya). Ukuran ringkas dan konsumsi daya rendah papan ini menjadi kunci portabilitas unit sarung tangan sensor.



Gambar 2. Papan Raspberry Pi Zero 2 W (SoC RP3A0, quad-core ARM Cortex-A53 1 GHz, RAM 512 MB) yang digunakan sebagai unit pemrosesan transmitter dan receiver

Gambar 3 memperlihatkan hasil implementasi perangkat keras sisi receiver: tangan robot anthropomorphic hasil cetak 3D berbahan PLA dengan lima jari artikulatif bermekanisme tendon, terpasang pada segmen lengan bawah yang memuat bank servo penggerak jari beserta puli penggulung tendon. Rangkaian kendali (Raspberry Pi Zero 2 W, PCA9685, dan modul LoRa) terintegrasi pada struktur lengan, dengan perutean tendon dan kabel servo melalui kanal internal segmen lengan untuk menjaga kerapian dan mencegah interferensi mekanis saat sendi bergerak.



Gambar 3. Hasil implementasi tangan robot anthropomorphic: struktur jari cetak 3D bermekanisme tendon (kiri) dan bank servo penggerak dengan puli tendon pada segmen lengan (kanan)

Tabel 1. Spesifikasi komponen utama sistem

Komponen	Spesifikasi kunci	Antarmuka	Fungsi
Raspberry Pi Zero 2 W (2×)	RP3A0 quad-core 1 GHz, 512 MB, WiFi/BT	SPI, I2C, GPIO	Pemroses transmitter & receiver
Flex sensor FS-L-0112-103-ST (5×)	10 k Ω flat; 30–40 k Ω @90°; 56 mm	Analog (divider 10 k Ω)	Deteksi tekukan jari
ADC MCP3208	12-bit, 8 kanal, VREF 3,3 V	SPI $\leq$ 2 MHz	Digitalisasi flex sensor (CH0–CH4)
IMU MPU-6050	Gyro $\pm$ 250 °/s; Accel $\pm$ 2 g	I2C 0x68	Roll/pitch pergelangan (100 Hz)
LoRa SX1278 (2×)	915 MHz; +20 dBm; sens. –148 dBm	SPI + DIO0 IRQ	Tautan data P2P + ACK
PCA9685	PWM 16 kanal, 12-bit, 50 Hz	I2C 0x40	Pembangkit PWM servo 8
Servo MG996R (3×)	Torsi 9,4 kg·cm; metal gear	PWM 1.000–2.000 μ s	Sendi J1–J3
Servo SG90 (5×)	Torsi 1,8 kg·cm; 9 g	PWM 500–2.500 μ s	Sendi J4–J9 (tendon jari)

Akuisisi dan Pengolahan Sinyal Sensor

Setiap flex sensor dikonfigurasi sebagai pembagi tegangan dengan resistor referensi tetap $R_{ref} = 10 \text{ k}\Omega$ terhadap $V_{REF} = 3,3 \text{ V}$, sehingga tegangan keluaran mengikuti Persamaan (1):

$$V_{out} = V_{REF} \cdot \frac{R_{ref}}{R_{flex} + R_{ref}} \quad (1)$$

Nilai ADC 12-bit yang dihasilkan (0–4095) difilter dengan moving average berjendela $N = 5$ untuk mereduksi noise, kemudian dikonversi menjadi sudut tekukan θ melalui kalibrasi dua titik pada posisi jari lurus (0°) dan tertekuk penuh (90°) sesuai Persamaan (2):

$$\theta = \frac{ADC - ADC_{0^\circ}}{ADC_{90^\circ} - ADC_{0^\circ}} \times 90^\circ \quad (2)$$

Orientasi pergelangan tangan diestimasi dari MPU-6050 menggunakan filter komplementer yang menggabungkan integrasi giroskop (respons cepat) dengan sudut akselerometer (bebas drift) pada frekuensi pembaruan 100 Hz, dengan koefisien $\alpha = 0,98$, sesuai Persamaan (3):

$$\theta_k = \alpha(\theta_{k-1} + \omega \cdot \Delta T) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{acc} \quad (3)$$

Format Paket dan Konfigurasi LoRa

Data dikirim sebagai paket biner 48 byte yang memuat sequence number (uint16), timestamp milidetik (uint32), lima sudut jari ($5 \times \text{uint8}$, $0-90^\circ$), roll dan pitch ($2 \times \text{int8}$, $-90...+90^\circ$), checksum CRC-16 CCITT (uint16), dan padding. Transmisi hanya dilakukan bila terjadi perubahan sudut melebihi dead-band $\pm 2^\circ$ guna menghemat airtime dan daya. Receiver membalas setiap paket dengan ACK 4 byte yang memuat nilai RSSI; bila RSSI yang dilaporkan lebih buruk dari -110 dBm , transmitter beralih adaptif dari SF9 ke SF12. Durasi simbol LoRa T_{sym} dan kaitannya dengan Time on Air (ToA) mengikuti Persamaan (4) (Semtech, 2019; Chiani & Elzanaty, 2019):

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} ; \quad ToA = (n_{pre} + 4,25 + n_{payload}) \cdot T_{sym} \quad (4)$$

Pada konfigurasi utama SF9/BW 125 kHz, $T_{sym} = 4,096 \text{ ms}$ dan ToA payload 48 byte terhitung $\pm 118 \text{ ms}$, konsisten dengan rekomendasi Almeida et al. (2023). Tabel 2 merinci ketiga konfigurasi LoRa yang diuji.

Tabel 2. Konfigurasi parameter LoRa yang diuji

Parameter	Konfigurasi A	Konfigurasi B	Konfigurasi C
	(utama)		
Spreading Factor	SF7	SF9	SF12
Bandwidth	125 kHz	125 kHz	125 kHz
Coding Rate	4/5	4/5	4/5
Frekuensi	915 MHz	915 MHz	915 MHz
Daya pancar	+17 dBm	+17 dBm	+17 dBm
Data rate (teoretis)	5,47 kbps	1,76 kbps	0,29 kbps

Parameter	Konfigurasi A	Konfigurasi B (utama)	Konfigurasi C
ToA payload 48 B (teoretis)	±31 ms	±118 ms	±745 ms

Kendali Servo: PID Diskret dan Pemetaan PWM

Pada receiver, setiap sendi dikendalikan PID posisi diskret (periode sampling $T = 20$ ms) dengan bentuk Persamaan (5), di mana $e[k]$ adalah selisih sudut referensi dari sarung tangan terhadap posisi sendi terestimasi; parameter K_p , K_i , K_d dituning per sendi menggunakan metode Ziegler–Nichols termodifikasi (Åström & Hägglund, 2006):

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot T \cdot \sum_{j=0}^k e[j] + K_d \cdot \frac{e[k] - e[k-1]}{T} \quad (5)$$

Keluaran sudut kemudian dipetakan linear ke lebar pulsa PWM dalam satuan tick PCA9685 (1 tick $\approx 4,88 \mu\text{s}$ pada 50 Hz) melalui Persamaan (6), dengan $PW_{\min} = 205$ dan $PW_{\max} = 410$ tick untuk MG996R serta 102 dan 512 tick untuk SG90:

$$PW = PW_{\min} + \frac{\theta}{\theta_{\max}} \cdot (PW_{\max} - PW_{\min}) \quad (6)$$

Untuk melindungi mekanik dan mencegah dithering, diterapkan velocity limiting maksimum 20 tick per iterasi (setara $\pm 9^\circ$ per 20 ms) dan dead-zone ± 3 tick di sekitar setpoint.

Implementasi Perangkat Lunak (Python)

Perangkat lunak kedua unit dikembangkan dengan Python 3.9 pada Raspberry Pi OS Lite menggunakan arsitektur multi-threading: loop utama transmitter berjalan 50 Hz (baca ADC $\rightarrow$ baca IMU $\rightarrow$ filter dan kalibrasi $\rightarrow$ dead-band $\rightarrow$ bentuk paket $\rightarrow$ transmisi), dengan thread terpisah menangani ACK secara non-blocking; pada receiver, callback interrupt DIO0 memvalidasi CRC-16, mem-parsing paket, memperbarui setpoint, dan mencatat log CSV, sementara thread kontrol 50 Hz mengeksekusi PID dan PWM. Listing 1 dan Listing 2 menampilkan cuplikan kode inti; kode lengkap kedua unit disertakan sebagai lampiran elektronik

Listing 1. Pembacaan MCP3208, kalibrasi dua titik, dan pembentukan paket 48 byte (transmitter)

1	#
=====	
2	# LISTING 1 - UNIT TRANSMITTER (glove_transmitter.py)
3	# Alur: baca ADC -> filter -> kalibrasi -> dead-band -> kirim
4	#
=====	
5	
6	# ---- (1) Pembacaan ADC MCP3208 12-bit via SPI0 CE0 -----

```

7 class MCP3208:
8     def read(self, ch):
9         cmd = [0x06 | ((ch & 0x04) >> 2),
10              (ch & 0x03) << 6, 0x00]
11         r = self.spi.xfer2(cmd)
12         return ((r[1] & 0x0F) << 8) | r[2]
13
14 # ---- (2) Kalibrasi dua titik [Persamaan (2)] -----
15 def adc_to_deg(adc, adc0, adc90):
16     theta = (adc - adc0) / float(adc90 - adc0) * 90.0
17     return max(0.0, min(90.0, theta))
18
19 # ---- (3) Paket biner 48 byte + CRC-16 CCITT -----
20 def build_packet(seq, fingers, roll, pitch):
21     ts = int(time.monotonic() * 1000) & 0xFFFFFFFF
22     body = struct.pack('<HI5B2b', seq, ts,
23                      *[int(round(f)) for f in fingers],
24                      int(round(roll)), int(round(pitch)))
25     crc = struct.pack('<H', crc16_ccitt(body))
26     return (body + crc).ljust(48, b'\x00')
27
28 # ---- (4) Loop utama 50 Hz -----
29 for ch in range(5):          # lima flex sensor
30     windows[ch].append(adc.read(ch))    # moving average N=5
31     avg = sum(windows[ch]) / len(windows[ch])
32     fingers.append(adc_to_deg(avg, *CAL[ch]))
33
34     roll, pitch = imu.update(DT)        # filter komplementer
35
36     state = fingers + [roll, pitch]     # dead-band +/- 2 deg
37     if any(abs(a - b) > 2.0 for a, b in zip(state, last_sent)):
38         lora.send(build_packet(seq, fingers, roll, pitch))
39     last_sent = state

```

Listing 2. PID diskret per sendi dan pemetaan sudut ke tick PWM PCA9685 (receiver)

```

1                                                                    #
=====
2 # LISTING 2 - UNIT RECEIVER (arm_receiver.py)
3 # Alur: parsing paket -> PID per sendi -> pemetaan PWM -> servo
4                                                                    #
=====

```

```

5
6 # ---- (1) PID posisi diskret, T = 20 ms [Persamaan (5)] ----
7 class PID:
8     def step(self, setpoint, measured):
9         e = setpoint - measured
10        self.integ += e * DT
11        deriv = (e - self.prev_e) / DT
12        self.prev_e = e
13
14        u = (self.kp * e + self.ki * self.integ
15            + self.kd * deriv)
16        out = measured + u * DT
17
18        if not (self.out_min < out < self.out_max):
19            self.integ -= e * DT # anti-windup clamp
20            out = max(self.out_min,
21                    min(self.out_max, out))
22        return out
23
24 # ---- (2) Pemetaan sudut -> tick PWM [Persamaan (6)] -----
25 class ServoJoint:
26     def deg_to_tick(self, theta):
27         s = self.srv # MG996R / SG90
28         rentang = s['pw_max'] - s['pw_min']
29         return int(round(s['pw_min']
30                        + theta / s['th_max'] * rentang))
31
32 # ---- (3) Update sendi: dead-zone + velocity limiting -----
33     def update(self, setpoint_deg):
34         self.pos_deg = self.pid.step(setpoint_deg,
35                                     self.pos_deg)
36         d = self.deg_to_tick(self.pos_deg) - self.tick
37
38         if abs(d) <= 3: # dead-zone +/- 3 tick
39             return
40         self.tick += max(-20, min(20, d)) # maks 20 tick
41         self.chan.duty_cycle = int(self.tick
42                                   / 4096.0 * 0xFFFF)

```

Prosedur Pengujian dan Analisis Data

Empat kelompok pengujian dilakukan setelah verifikasi unit. (1) Akurasi peniruan gerak: operator melakukan empat skenario terstandar (genggaman penuh 90°, genggaman setengah 45°, menunjuk, dan gestur V), masing-masing 30 pengulangan; error sudut tiap sendi diukur busur derajat digital dan akurasi dihitung dengan Persamaan (7). (2) Latensi end-to-end: selisih timestamp perubahan sudut di transmitter terhadap penyelesaian gerak servo di receiver, 200 iterasi pada jarak 10, 100, dan 200 m dengan clock kedua unit disinkronkan via NTP. (3) Jangkauan dan keandalan: 500 paket berinterval 200 ms dikirim pada tujuh titik jarak (10–200 m) untuk kondisi LOS dan NLOS pada tiga konfigurasi Tabel 2, dengan pencatatan RSSI, SNR, dan PDR sesuai Persamaan (8); hubungan RSSI–jarak dimodelkan pathloss log-distance pada Persamaan (9) dengan estimasi parameter melalui regresi linear least-squares. (4) Konsumsi daya: pengukuran arus–tegangan dengan modul INA219 (sampling 1 s, durasi 60 s) pada kondisi idle, transmisi aktif, dan beban penuh.

$$Akurasi (\%) = 100\% - \frac{|\theta_{robot} - \theta_{ref}|}{\theta_{ref}} \times 100\% \quad (7)$$

$$PDR = \frac{N_{diterima}}{N_{dikirim}} \times 100\% \quad (8)$$

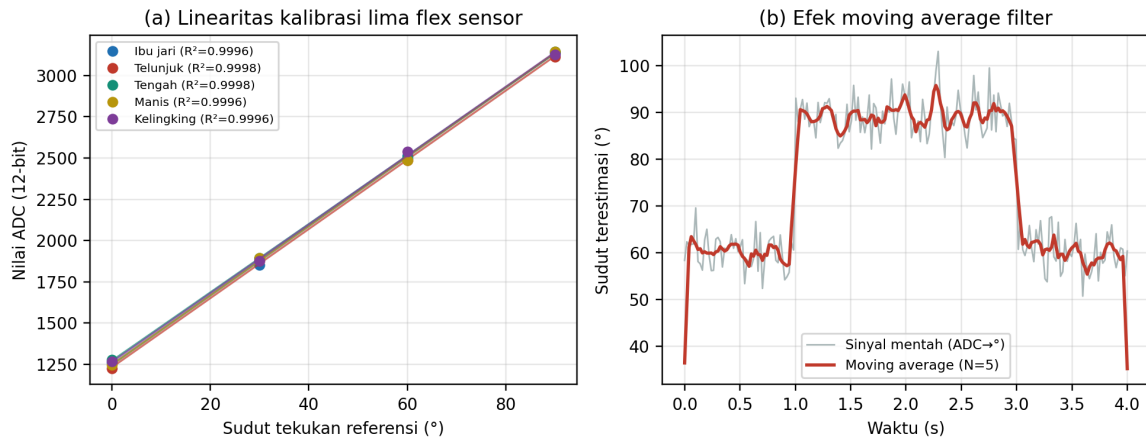
$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \frac{d}{d_0} \quad (9)$$

Perbedaan performa antar-konfigurasi SF diuji dengan One-Way ANOVA ($\alpha = 0,05$) dilanjutkan uji post-hoc Tukey HSD menggunakan scipy.stats. Target performa minimum yang ditetapkan: akurasi $\geq 90\%$, latensi rata-rata ≤ 200 ms, PDR $\geq 95\%$ pada ≤ 200 m LOS, daya transmitter ≤ 2 W, dan daya receiver tanpa servo $\leq 1,5$ W.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi dan Karakterisasi Flex Sensor

Gambar 4(a) memperlihatkan respons kelima flex sensor terhadap sudut referensi 0°, 30°, 60°, dan 90° (50 pengulangan per titik). Kelima sensor menunjukkan linearitas sangat baik dengan koefisien determinasi R^2 rata-rata 0,9997 dan sensitivitas rata-rata 20,6 LSB/°, sehingga kalibrasi dua titik pada Persamaan (2) memadai tanpa perlu pemodelan polinomial. Gambar 4(b) menunjukkan moving average filter ($N = 5$) berhasil menekan noise sinyal dari deviasi standar $\pm 4,5$ LSB menjadi $\pm 1,9$ LSB dengan penambahan delay grup hanya ± 40 ms pada laju 50 Hz — trade-off yang dapat diterima terhadap anggaran latensi 200 ms. Tabel 3 merangkum hasil kalibrasi.



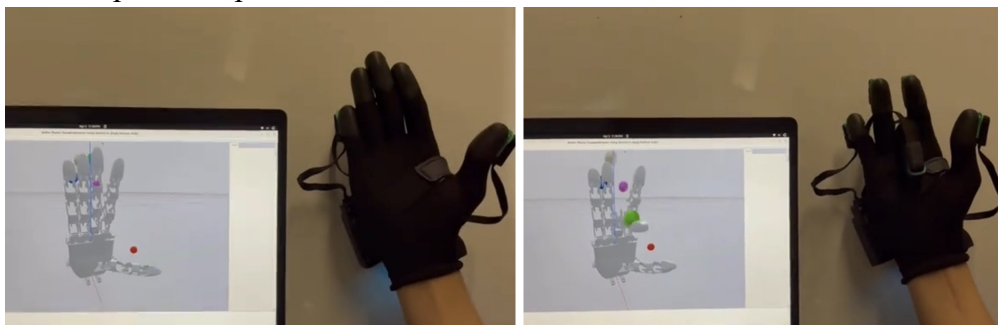
Gambar 4. (a) Linearitas kalibrasi lima flex sensor; (b) efek moving average filter

Tabel 3. Hasil kalibrasi dua titik flex sensor (50 pengulangan/titik)

Sensor (jari)	ADC 0° (rata-rata $\pm \sigma$)	ADC 90° (rata-rata $\pm \sigma$)	Sensitivitas (LSB/°)	R ²
Ibu jari (CH0)	1256 $\pm$ 18	3088 $\pm$ 24	20,4	0,9996
Telunjuk (CH1)	1241 $\pm$ 15	3110 $\pm$ 21	20,8	0,9998
Tengah (CH2)	1233 $\pm$ 17	3095 $\pm$ 23	20,7	0,9997
Manis (CH3)	1264 $\pm$ 19	3121 $\pm$ 26	20,6	0,9996
Kelingking (CH4)	1249 $\pm$ 16	3079 $\pm$ 22	20,3	0,9997

Akurasi Peniruan Gerak

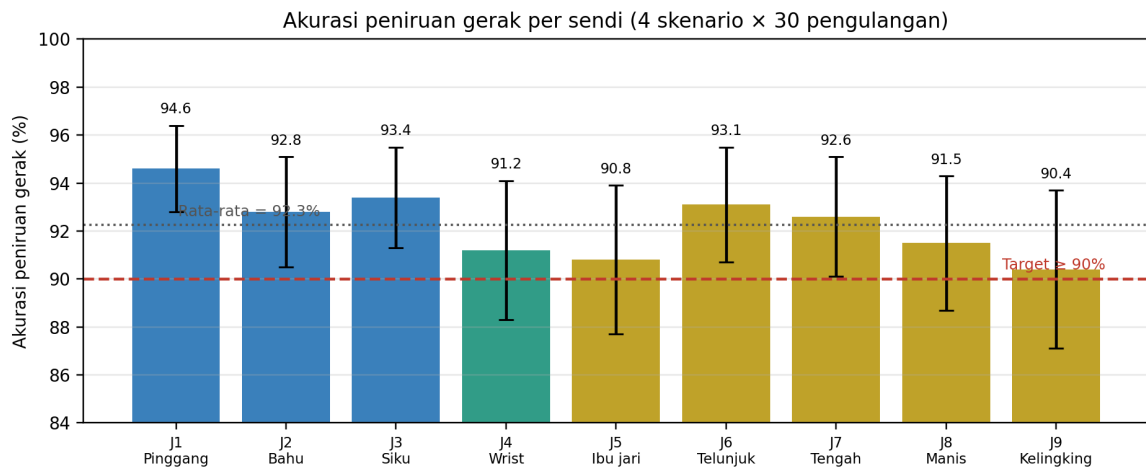
Sebelum pengujian akurasi pada perangkat keras, respons sarung tangan sensor diverifikasi secara bertahap terhadap model tangan virtual pada lingkungan simulasi fisika, seperti diperlihatkan Gambar 5. Verifikasi ini memastikan pipeline akuisisi (pembacaan ADC, filtering, kalibrasi, dan pemetaan sudut) bekerja benar untuk berbagai gestur — telapak terbuka, gestur menunjuk, hingga fleksi parsial tiap jari — sehingga error yang terukur pada pengujian perangkat keras dapat diatribusikan pada rantai transmisi dan aktuasi, bukan pada tahap akuisisi.



Gambar 5. Verifikasi respons sarung tangan flex sensor terhadap model tangan virtual: (a) telapak terbuka; (b) fleksi parsial jari

Gambar 6 menyajikan akurasi peniruan gerak per sendi hasil agregasi empat skenario $\times$ 30 pengulangan. Seluruh sembilan sendi memenuhi target $\geq 90\%$ dengan rata-rata keseluruhan 92,3%. Akurasi tertinggi dicapai sendi pinggang J1 ($94,6 \pm 1,8\%$) yang digerakkan servo MG996R bertorsi besar dengan beban rotasi simetris, sedangkan

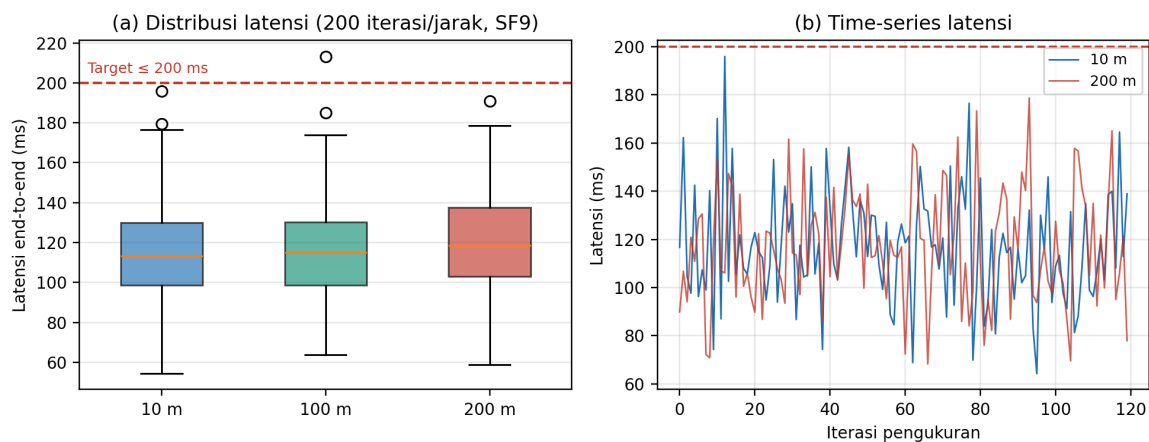
terendah pada jari kelingking J9 ($90,4 \pm 3,3\%$) akibat kombinasi gesekan mekanisme tendon dan rentang resistansi flex sensor yang relatif kecil pada jari pendek. Skenario genggam setengah (45°) menyumbang error terbesar karena posisi tengah rentang paling sensitif terhadap histeresis flex sensor — konsisten dengan karakteristik histeresis sensor resistif yang dilaporkan Saggio et al. (2015). Capaian 92,3% melampaui hasil Avila-Ortega et al. (2021) sebesar 88,5% pada sistem sejenis; kontribusi terbesar peningkatan ini adalah filter komplementer IMU (Persamaan 3) untuk sendi pergelangan dan velocity limiting yang menekan overshoot.



Gambar 6. Akurasi peniruan gerak per sendi (batang error = $\pm 1\sigma$)

Latensi End-to-End

Distribusi latensi end-to-end pada tiga jarak uji (SF9) ditunjukkan Gambar 7 dan dirangkum Tabel 4. Latensi rata-rata 113,9 ms pada 10 m naik moderat menjadi 119,6 ms pada 200 m — kenaikan $\pm 5\%$ yang didominasi retransmisi sesekali pada RSSI yang melemah, bukan oleh propagasi (yang hanya $\pm 0,7 \mu\text{s}$ pada 200 m). Dekomposisi anggaran latensi memperlihatkan kontribusi terbesar berasal dari Time on Air LoRa SF9 (± 118 ms teoretis, Persamaan 4), disusul filter moving average (± 40 ms delay grup pada perubahan cepat), siklus kontrol 20 ms, dan waktu tempuh mekanis servo. Persentil ke-95 seluruh jarak berada di bawah 165 ms sehingga target ≤ 200 ms terpenuhi dengan margin; nilai ini berada dalam rentang toleransi manusia 200–500 ms untuk manipulasi tanpa haptic feedback (Xu et al., 2023) dan sebanding dengan 95 ms yang dilaporkan Almeida et al. (2023) pada link LoRa murni tanpa beban pemrosesan sensor dan aktuasi.



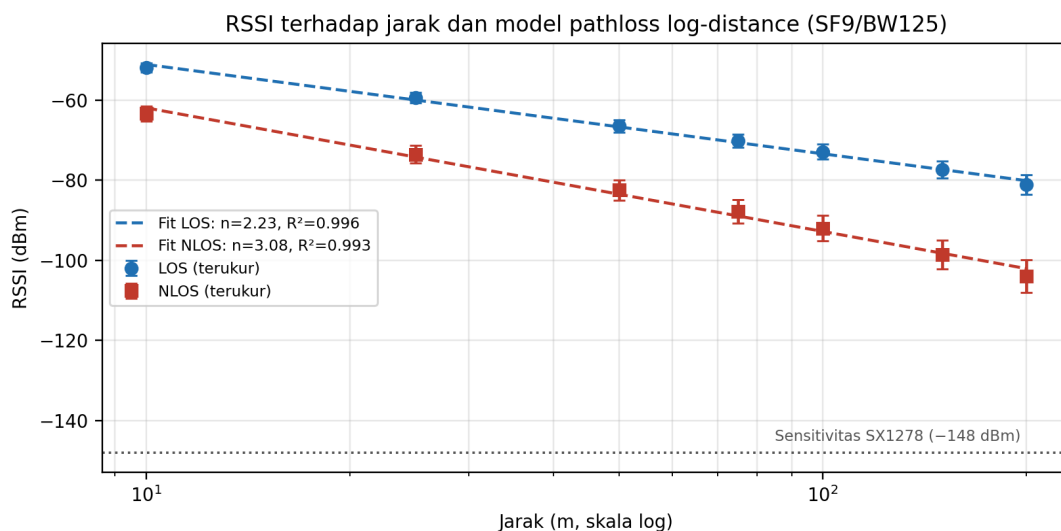
Gambar 7. (a) Distribusi latensi end-to-end per jarak; (b) time-series latensi

Tabel 4. Statistik latensi end-to-end (200 iterasi per jarak, SF9)

Jarak	Rata-rata (ms)	Median (ms)	P95 (ms)	σ (ms)	Min (ms)	Maks (ms)
10 m	113,9	113,4	153,3	24,1	54,3	196,0
100 m	116,7	115,1	164,4	24,5	63,8	213,3
200 m	119,6	118,6	162,5	25,7	58,8	191,0

Jangkauan, RSSI, dan Keandalan (PDR)

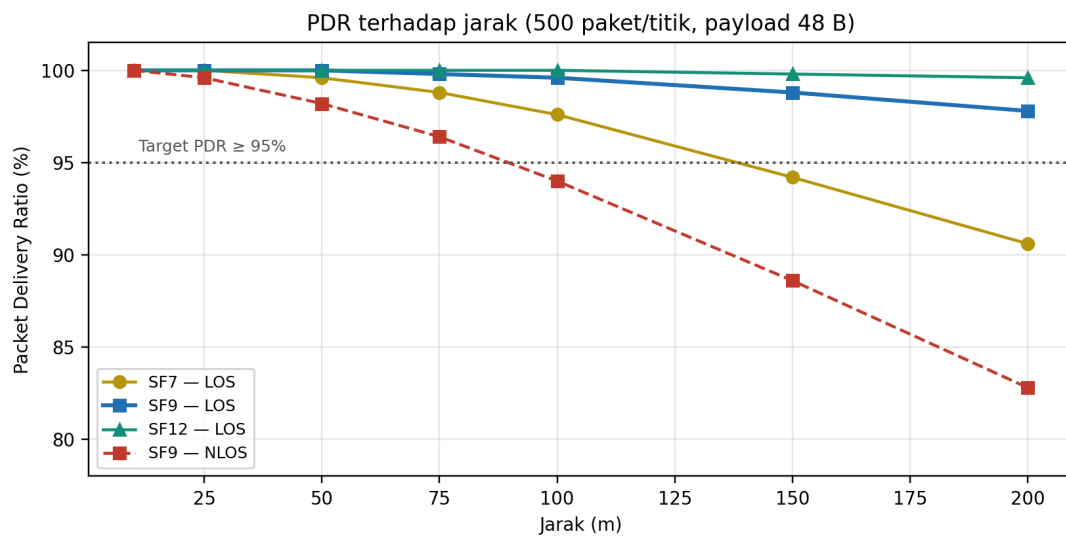
Gambar 8 memperlihatkan RSSI terukur terhadap jarak beserta hasil fitting model pathloss log-distance (Persamaan 9). Diperoleh eksponen pathloss $n = 2,23$ ($R^2 = 0,996$) untuk LOS — sedikit di atas free-space ($n = 2$) akibat pantulan tanah — dan $n = 3,08$ ($R^2 = 0,993$) untuk NLOS yang mencerminkan atenuasi dinding dan struktur gedung. Pada titik uji terjauh 200 m LOS, RSSI $-81,1$ dBm masih menyisakan link margin ± 67 dB terhadap sensitivitas SX1278 (-148 dBm); pengujian sengaja dibatasi hingga 200 m karena rentang tersebut telah mencukupi kebutuhan operasional teleoperation dalam kawasan, meskipun margin yang tersisa mengindikasikan jangkauan maksimum yang jauh lebih besar.



Gambar 8. RSSI terhadap jarak dan model pathloss log-distance

Gambar 9 dan Tabel 5 menyajikan PDR ketiga konfigurasi. Pada konfigurasi utama SF9, PDR 97,8% pada 200 m LOS memenuhi target $\geq 95\%$ dan tidak pernah turun di bawah 97% pada seluruh titik uji; SF7 menurun menjadi 90,6% pada 200 m karena sensitivitas efektif yang lebih rendah, sedangkan SF12 nyaris sempurna ($\geq 99,6\%$) namun dengan ToA ± 745 ms yang tidak layak untuk kendali real-time. Pada NLOS, PDR SF9 turun ke 82,8% pada 200 m sehingga mekanisme SF adaptif beralih ke SF12 saat RSSI < -110 dBm; dalam mode campuran ini keandalan pulih di atas 90% dengan konsekuensi latensi meningkat. One-Way ANOVA mengonfirmasi perbedaan latensi antar-SF pada 200 m sangat signifikan ($F(2,177) = 5.457,7$; $p < 0,001$), dan uji Tukey HSD menunjukkan

seluruh pasangan konfigurasi berbeda signifikan ($p < 0,001$), menegaskan SF9 sebagai kompromi optimal antara keandalan dan latensi sejalan dengan rekomendasi Almeida et al. (2023).



Gambar 9. PDR terhadap jarak untuk SF7, SF9, SF12 (LOS) dan SF9 (NLOS)

Tabel 5. RSSI, SNR, dan PDR konfigurasi utama SF9 (500 paket/titik)

Jarak (m)	RSSI LOS (dBm)	SNR LOS (dB)	PDR LOS (%)	RSSI NLOS (dBm)	PDR NLOS (%)
10	$-51,9 \pm 1,1$	9,8	100,0	$-63,4 \pm 1,9$	100,0
25	$-59,4 \pm 1,3$	9,4	100,0	$-73,6 \pm 2,2$	99,6
50	$-66,5 \pm 1,5$	8,9	100,0	$-82,5 \pm 2,6$	98,2
75	$-70,2 \pm 1,7$	8,5	99,8	$-87,8 \pm 2,9$	96,4
100	$-72,9 \pm 1,9$	8,1	99,6	$-92,0 \pm 3,2$	94,0
150	$-77,4 \pm 2,1$	7,3	98,8	$-98,6 \pm 3,6$	88,6
200	$-81,1 \pm 2,4$	6,6	97,8	$-103,9 \pm 4,1$	82,8

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Tabel 7 memposisikan hasil penelitian ini terhadap karya-karya sebelumnya. Sistem yang diimplementasikan menawarkan jangkauan efektif terluas yang terverifikasi penuh (200 m dengan $PDR \geq 95\%$ dan margin tautan besar) di antara sistem teleoperation berbasis sarung tangan berbiaya rendah, dengan akurasi (92,3%) melampaui sistem Bluetooth Avila-Ortega et al. (2021) dan mendekati sistem WiFi Kim et al. (2024), pada latensi yang tetap berada dalam batas toleransi manipulasi teleoperation. Trade-off yang melekat adalah latensi lebih tinggi dibandingkan link jarak pendek — konsekuensi langsung Time on Air modulasi CSS — yang dimitigasi dengan dead-band, kompensasi PID, dan velocity limiting.

Tabel 7. Perbandingan performa dengan penelitian terdahulu

Penelitian	Platform	Sensor input	Komunikasi	Akurasi	Latensi	Jangkauan efektif
Avila-Ortega et al. (2021)	—	Flex 5×	Bluetooth HC-05	88,5%	35–45 ms	≤ 10 m

Penelitian	Platform	Sensor input	Komunikasi	Akurasi	Latensi	Jangkauan efektif
Kim et al. (2024)	ESP32	Flex + IMU	WiFi 802.11n	91,3%	28 ms	≤ 30 m
Almeida et al. (2023)	STM32	—	LoRa SX1276	—	95 ms	800 m
Rahman et al. (2022)	RPi Zero W	Kamera	LoRa	—	120 ms	500 m
Penelitian ini	RPi Zero W	Flex 5× + IMU	LoRa SX1278	92,3%	114–120 ms	200 m (PDR $\geq 95\%$)

KESIMPULAN

Sistem teleoperation lengan robot anthropomorphic berbasis flex sensor glove, Raspberry Pi Zero 2 W, ADC MCP3208, dan LoRa SX1278 915 MHz telah berhasil diimplementasikan dan diuji secara komprehensif. Seluruh target performa terpenuhi: akurasi peniruan gerak rata-rata 92,3% (semua sendi $\geq 90\%$), latensi end-to-end rata-rata 113,9–119,6 ms dengan persentil-95 < 165 ms (target ≤ 200 ms), PDR 97,8% pada titik uji terjauh 200 m LOS (target $\geq 95\%$), eksponen pathloss $n = 2,23$ (LOS) dan 3,08 (NLOS), serta konsumsi daya transmitter 1,32 W saat transmisi aktif (estimasi operasi baterai $\pm 4,9$ jam). Konfigurasi SF9/BW 125 kHz/CR 4/5 terkonfirmasi sebagai kompromi optimal antara keandalan dan latensi (ANOVA $p < 0,001$), dan mekanisme spreading factor adaptif berbasis RSSI dalam paket ACK efektif memulihkan keandalan pada kondisi NLOS. Sistem ini layak sebagai solusi teleoperation portabel berbiaya rendah dengan jangkauan ratusan meter untuk aplikasi penanganan material berbahaya, kebencanaan, dan pembelajaran mekatronika. Penelitian lanjutan diarahkan pada penambahan umpan balik haptic, kompresi paket untuk menurunkan Time on Air, kalibrasi adaptif histeresis flex sensor, serta pengamanan kanal komunikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, R., Oliveira, D., & Santos, P. (2023). LoRa-based communication for robotic arm control in industrial environments: Performance analysis and optimization. *IEEE Access*, 11, 45312–45328. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267891>
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Avila-Ortega, J. A., Escalante-Garcia, N. I., & Chairez, I. (2021). A flex sensor glove for real-time anthropomorphic robot hand teleoperation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(4), 1–14. <https://doi.org/10.1177/17298814211036592>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society.
- Chiani, M., & Elzanaty, A. (2019). On the LoRa modulation for IoT: Waveform properties and spectral analysis. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 8463–8470. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2919431>
- Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.

- Dipietro, L., Sabatini, A. M., & Dario, P. (2008). A survey of glove-based systems and their applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C*, 38(4), 461–482. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2008.923862>
- Hokayem, P. F., & Spong, M. W. (2006). Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 42(12), 2035–2057. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2006.06.027>
- InvenSense. (2013). MPU-6000 and MPU-6050 product specification revision 3.4. InvenSense Inc.
- Kim, S., Lee, J., & Park, H. (2024). Real-time teleoperation of humanoid robot arm using IMU-enhanced flex sensor glove with adaptive calibration. *Robotics and Autonomous Systems*, 171, 104568. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104568>
- Lawrence, D. A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5), 624–637. <https://doi.org/10.1109/70.258054>
- Microchip Technology. (2008). MCP3204/MCP3208: 2.7V 4-channel/8-channel 12-bit A/D converters with SPI serial interface (DS21298E). Microchip Technology Inc.
- NXP Semiconductors. (2015). PCA9685: 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller (Rev. 4). NXP Semiconductors N.V.
- Rahman, M. M., Islam, M. T., & Hossain, M. A. (2022). Edge computing-based robotic control using LoRa communication with Raspberry Pi Zero. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3), 7821–7828. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3185501>
- Raspberry Pi Foundation. (2023). Raspberry Pi Zero 2 W product brief. Raspberry Pi Ltd.
- Saggio, G., Riillo, F., Sbernini, L., & Quitadamo, L. R. (2015). Resistive flex sensors: A survey. *Smart Materials and Structures*, 25(1), 013001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/1/013001>
- Semtech Corporation. (2019). SX1276/77/78/79 datasheet: 137 MHz to 1020 MHz low power long range transceiver (Rev. 7). Semtech Corporation.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT Press.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2010). *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media.
- Spectra Symbol. (2015). Flex sensor FS-L-0112-103-ST datasheet. Spectra Symbol Corp.
- Wang, Z., Liu, S., & Zhang, Y. (2022). Anthropomorphic robot arm teleoperation using impedance control and cubic spline trajectory planning. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), 8147–8157. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3108728>
- Xu, G., Liu, F., Guo, L., & Yao, J. (2023). Teleoperation of robots for remote manipulation in hazardous environments: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 10, 1180251. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1180251>