UNIVERSITAS GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN III
PERNYATAAN IV
KATA PENGANTAR V
DAFTAR ISI VII
DAFTAR GAMBAR IX
DAFTAR TABEL X
INTISARI XI
ABSTRACT XII
1. BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 6
1.3. Batasan Masalah 7
1.4. Tujuan Penelitian 8
1.5. Manfaat Penelitian 8
1.6. Kontribusi Penelitian 9
2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA 10
2.1. Kinematika pada Robot Manipulator 10
2.2. Metode pada Komputasi fungsi Trigonometri 11
2.3. FPGA sebagai basis Komputasi Kinematika Robot Manipulator 14
2.3.1. Komputasi fungsi trigonometri pada FPGA 16
2.4. State of Arts dan Research Gap 19
3. BAB III LANDASAN TEORI 22
3.1. Robot Manipulator 22
3.1.1. Konvensi Denavit Hartenberg 23
3.1.2. Elementary Transform Sequence (ETS) 25
3.2. CORDIC 28
3.3. FPGA 30
4. BAB IV METODE PENELITIAN 33
4.1. Analisis Masalah 33
4.2. Model Robot Manipulator menggunakan ETS 37
4.3. Rangkaian PWM Generator 42
4.4. Top level arsitektur 45
4.5. Perancangan Unit Modular Perangkat Keras 50
4.5.1 Fungsi Trigonometri menggunakan metode LUT 50
4.5.2 Fungsi Trigonometri menggunakan metode CORDIC 52
4.6. Skema Pengujian 54
5. BAB V PWM GENERATOR MULTI-CHANNEL UNTUK KENDALI CONTINUOUS PATH 58
5.1. Pemodelan PWM generator 59
5.1.1. Single Channel Point-to-Point 59

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.1.2. Multi Channel Point- to Point 60
5.1.3. Multi-Channel Continuous Path 61
5.2. Simulasi fungsional..... 62
5.3. Implementasi fisik 63
5.3.1. Pengujian parameter 63
6. BAB VI ARSITEKTUR HYBRID LUT-CORDIC UNTUK EFISIENSI DAN AKURASI KOMPUTASI FUNGSI TRIGONOMETRI PADA ROBOT MANIPULATOR 67
6.1. Pemodelan Komputasi Trigonometri..... 67
6.1.1. Look Up Table 67
6.1.2. CORDIC..... 69
6.2. Pengujian fungsional dan pengukuran kinerja..... 71
6.2.1. Look Up Table 71
6.2.2. CORDIC..... 74
6.2.3. Hybrid LUT-CORDIC..... 77
6.3. Perbandingan Kinerja Komputasi..... 83
6.4. Analisis *Trade-off*..... 92
6. BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN..... 96
7.1. Kesimpulan..... 96
7.2. Saran..... 97

DAFTAR PUSTAKA 98

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Frame Koordinat yang terlampir pada lengan robot 23
Gambar 3.2 Arsitektur dasar FPGA (Bailey, 2011) 31
Gambar 4.1 Tahapan Pelaksanaan Penelitian..... 37
Gambar 4.2 Open Manipulator X..... 38
Gambar 4.3 Struktrur Mekanik Open Manipulator X 39
Gambar 4.4 (a) Konektifitas dan (b) sinyal PWM kendali servo [datasheet]..... 42
Gambar 4.5 Diagram Blok PWM Generator Tunggal dengan Metode Point to Point..... 42
Gambar 4.6 Blok diagram PWM generator untuk metode Continuous path..... 44
Gambar 4.7 Antarmuka unit komputasi trigonometri..... 45
Gambar 4.8 Top level arsitektur 47
Gambar 4.9 Arsitektur CORDIC untuk komputasi fungsi trigonometri..... 53
Gambar 4.10 Unit penjumlah dan pengurang 54
Gambar 5.1 Antarmuka unit PWM modulator 58
Gambar 5.2 Entitas PWM Generator single channel 60
Gambar 5.3 Listing entitas PWM generator multichannel continuous path..... 61
Gambar 5.4 Lisiting Pembagi frekuensi 61
Gambar 5.5 listing pengaturan kecepatan rotasi 62
Gambar 5.6 Hasil simulasi PWM generator motor tunggal metode point-to point 63
Gambar 6.1 Listing entitas unit fungsi trigonometri menggunakan LUT..... 68
Gambar 6.2 Listing deklarasi kapasitas ROM dan data yang tersimpan..... 68
Gambar 6.3 Listing akses data ROM 69
Gambar 6.4 Deklarasi entitas fungsi trigonometri menggunakan CORDIC 69
Gambar 6.5 Deklarasi struktural component pada CORDIC 70
Gambar 6.6 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan LUT 72
Gambar 6.7 Potongan tampilan file vcd pengujian 73
Gambar 6.8 Grafik Akurasi menggunakan metode LUT 74
Gambar 6.9 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan CORDIC 75
Gambar 6.10 Grafik Akurasi menggunakan metode CORDIC 76
Gambar 6.11 Arsitektur yang diusulkan..... 81
Gambar 6.12 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan Hybrid LUT CORDIC..... 82
Gambar 6.13 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan Hybrid LUT CORDIC..... 83
Gambar 6.14 Perbandingan *absolute error* komputasi fungsi trigonometri 83
Gambar 6.15 Grafik trade off kinerja perangkat keras 94

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator**
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Realisasi fungsi trigonometri pada FPGA 18
Tabel 2.2 State of Art komputasi fungsi trigonometri berbasis FPGA 19
Tabel 4.1 Pemodelan ETS robot Open Manipulator X 39
Tabel 4.2 Element pada matriks transformasi homogen model robot 41
Tabel 4.3 8-bit dan 10 bit data 48
Tabel 4.4 Representasi tabel kebenaran 51
Tabel 4.5 Skema pengujian 55
Tabel 4.6 Metrik Evaluasi 56
Tabel 5.1 Data pengujian resolusi motor 64
Tabel 5.2 Data pengujian lebar pulsa maksimal dan minimal 65
Tabel 5.3 Relasi lebar pulsa terhadap sudut 66
Tabel 6.1 Kinerja perangkat keras menggunakan metode LUT 73
Tabel 6.2 Perbandingan Kesalahan mutlak hasil komputasi fungsi sinus 78
Tabel 6.3 Sudut-rotasi untuk setiap iterasi 78
Tabel 6.4 Kinerja perangkat keras menggunakan metode CORDIC untuk format data berbeda 79
Tabel 6.5 Prekomputasi fungsi sin(θ) dan cos (90 – θ) dalam format binner 80
Tabel 6.6 Perbandingan kinerja perangkat keras 84
Tabel 6.7 Perbandingan kinerja perangkat keras yang diusulkan dengan penelitian lain 89
Tabel 6.8 Normalisasi konseptual perbandingan penelitian 91

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Pengembangan Arsitektur *Hybrid* LUT–CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator

Komputasi fungsi trigonometri yang cepat dan akurat dengan sumber daya terbatas sangat esensial pada robot manipulator. *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) sebagai *platform* komputasi robot manipulator menjadi alternatif ideal karena sifat komputasi paralel alaminya, namun implementasi fungsi trigonometri pada FPGA menghadapi *trade-off*: metode *Look-Up Table* (LUT) boros memori pada akurasi tinggi, sedangkan metode *Coordinate Rotation Digital Computer* (CORDIC) memicu latensi tinggi jika iterasinya ditambah. Kondisi ini menunjukkan adanya *trade-off* antara akurasi, kecepatan komputasi, dan penggunaan sumber daya logika FPGA.

Penelitian ini mengembangkan arsitektur perangkat keras *hybrid* LUT–CORDIC berbasis FPGA untuk komputasi fungsi trigonometri. Pendekatan hybrid dirancang dengan memetakan distribusi kesalahan mutlak dari CORDIC dasar pada domain sudut masukan. Selanjutnya, kesalahan dominan dilokalisasi pada interval sudut kecil, kemudian dikoreksi menggunakan LUT berukuran kecil. Dengan demikian, jalur CORDIC tetap digunakan pada sebagian besar rentang sudut, sedangkan LUT hanya digunakan pada interval yang menghasilkan kesalahan dominan. Arsitektur yang diusulkan menggunakan format data 10-bit, dimodelkan serta diimplementasikan pada FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa arsitektur *hybrid* LUT–CORDIC mampu meningkatkan akurasi komputasi fungsi trigonometri secara signifikan tanpa menambah latensi komputasi. Dibandingkan dengan CORDIC *Maximum Absolute Error* (MAE) sinus dan kosinus terpangkas masing-masing sebesar 88,19% dan 88,75%, sedangkan *Mean Squared Error* (MSE) keduanya tereduksi hingga lebih dari 97,5%. Dari sisi perangkat keras, penggunaan *slice* juga berkurang dari 81 menjadi 69, sedangkan waktu komputasi turun dari 35,271 ns menjadi 30,627 ns. Arsitektur hybrid LUT–CORDIC ini mampu menggeser *trade-off* komputasi trigonometri pada FPGA menuju rancangan yang lebih akurat, cepat, dan hemat sumber daya logika, sehingga relevan dengan kebutuhan komputasi robot manipulator.

Kata kunci: FPGA, CORDIC, LUT, hybrid LUT–CORDIC, fungsi trigonometri, robot manipulator.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Development of FPGA-Based Hybrid LUT–CORDIC Architecture for Trigonometric Function Computation In Robot Manipulators

Fast and accurate computation of trigonometric functions with limited resources is essential in robotic manipulators. Field-Programmable Gate Array (FPGA) as a computing platform for robotic manipulators serves as an ideal alternative due to its inherent parallel computing nature. However, the implementation of trigonometric functions on FPGA faces a trade-off: the Look-Up Table (LUT) method is memory-intensive at high accuracy, whereas the Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) method induces high latency when iterations are increased. This condition demonstrates a trade-off between accuracy, computation speed, and the utilization of FPGA logic resources.

This research develops a hybrid LUT–CORDIC hardware architecture based on FPGA for computing trigonometric functions. The hybrid approach is designed by mapping the absolute error distribution of the basic CORDIC over the input angle domain. Furthermore, dominant errors are localized within small angular intervals and subsequently corrected using a small-sized LUT. Consequently, the CORDIC path remains utilized across most of the angular range, while the LUT is only employed in intervals that yield dominant errors. The proposed architecture utilizes a 10-bit data format, modeled and implemented on a Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324 FPGA.

The test results indicate that the hybrid LUT–CORDIC architecture significantly improves the accuracy of trigonometric function computation without increasing computation latency. Compared to CORDIC, the Maximum Absolute Error (MAE) of sine and cosine is truncated by 88.19% and 88.75%, respectively, while the Mean Squared Error (MSE) of both is reduced by more than 97.5%. From the hardware perspective, slice utilization is also reduced from 81 to 69, while the computation time decreases from 35.271 ns to 30.627 ns. This hybrid LUT–CORDIC architecture successfully shifts the trade-off of trigonometric computation on FPGA toward a more accurate, faster, and logic-resource-efficient design, making it highly relevant to the computational needs of robotic manipulators.

Keywords: FPGA, CORDIC, LUT, hybrid LUT–CORDIC, trigonometric function, robot manipulator.

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Robot manipulator banyak digunakan pada berbagai aplikasi medis dan industri karena mampu melakukan pekerjaan berulang, bekerja secara presisi (Nguyen dan Marvel,2022), serta beroperasi pada lingkungan yang sulit atau berbahaya bagi manusia (Issa, et al., 2019). Dalam menjalankan tugasnya robot manipulator tidak hanya dituntut mencapai titik tujuan, tetapi juga harus mampu mengikuti lintasan tertentu dengan posisi dan orientasi *end-effector* yang sesuai (Yan, et al., 2022). Kendali pada robot manipulator harus memiliki kemampuan komputasi fungsi trigonometri, kinematika balik, interpolasi lintasan dan kendali gerakan secara sinkron (Cong, 2021). Dengan demikian, sebuah robot merupakan sistem komputasi informasi yang sangat kompleks.

Berdasarkan metode kontrol untuk memandu *end effector* pada robot manipulator, terdapat 2 jenis kontrol robot yaitu *point-to-point* dan *continuous path*. Robot *point-to-point* dapat dikonfigurasi dengan menentukan kumpulan titik diskrit sehingga tidak memerlukan jalur *end effector* antara titik asal dan titik tujuan. Sementara itu, pada metode *continuous path*, seluruh jalur *end effector* dapat dikendalikan, sehingga dibutuhkan kendali kecepatan dan percepatan gerak robot (Spong, et al., 2020). Metode *continuous path* merupakan metode yang paling banyak digunakan pada robot manipulator (Mercedes, et al., 2020). Komputasi kinematika yang dilakukan secara *realtime* diperlukan untuk merealisasikan metode *continuous path* pada sebuah robot manipulator.

Realisasi metode kendali *continuous path* pada sebuah robot manipulator membutuhkan pengendalian setiap sendi secara paralel dan sinkron. Keterbatasan kanal yang dapat digunakan untuk keluaran *Pulse Witdh Modulation*

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

(PWM) merupakan salah satu kelemahan dari pengendalian berbasis mikrokontroler untuk robot manipulator. Dalam beberapa penelitian servo motor dikendalikan oleh PWM yang disediakan oleh rangkaian driver motor (Ay et al, 2018; Bhavanibhatla et al, 2019). Namun, komunikasi antara pengontrol utama dan rangkaian driver motor menggunakan protokol *Inter-Integrated Circuit* (I2C) yang tidak memungkinkan untuk mengontrol setiap motor pada setiap sendi secara bersamaan. Di sisi lain, membangun sistem *hybrid* antara *Digital Signal Processor* (DSP), *Motion Control Unit* (MCU) dan *Personal Computer* (PC) menimbulkan kesulitan dalam memodifikasi struktur perangkat keras dan mencapai tingkat pencuplikan yang lebih cepat (Petko, et al, 2016).

Metode kendali *continuous path* untuk memandu end-effector dan gerakan manipulator yang halus serta stabil pada frekuensi sampling tertentu mampu menghasilkan perencanaan lintasan yang efektif (Yan et al, 2022). Untuk dapat merealisasikan perencanaan lintasan yang efektif dibutuhkan komputasi kinematik yang cepat dan efektif. Salah satu contoh komputasi kinematika yang penting dilakukan secara *realtime* adalah komputasi kinematik balik, karena melibatkan tahapan yang paling membutuhkan banyak waktu(Tkachenko dan Song, 2020). Dengan demikian, dibutuhkan *platform* komputasi dan kendali yang tepat untuk sebuah robot manipulator.

Terdapat beberapa *platform* yang dapat digunakan untuk komputasi dan kendali robot manipulator, diantaranya adalah *Central Processing Unit* (CPU), *Graphics Processing Unit* (GPU), *Application-Specific Integrated Circuit* (ASIC) dan *Field-Programmable Gate Array* (FPGA). Menurut (Lin et al, 2018) GPU, ASIC dan FPGA mampu menggungguli CPU dalam kecepatan komputasi. Hal ini dikarenakan CPU dirancang untuk dapat mengerjakan tugas yang sangat bervariasi dan mengeksekusi intruksi secara sekuensial. Disisi lain GPU dirancangan dengan ribuan inti prosessor yang dapat bekerja secara simultan yang mengakibatkan kebutuhan daya yang sangat tinggi sehingga tidak cocok untuk komputasi dengan sumber daya terbatas (Wan et al, 2021). ASIC merupakan salah satu *platform*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

komputasi yang cocok untuk komputasi dengan sumber daya terbatas dengan kinerja yang bagus, namun demikian memiliki kelemahan dari sisi biaya dan waktu pengembangan dan tidak fleksibel (Dhilleswararao et al, 2022).

FPGA memiliki fleksibilitas untuk implementasi *realtime* sehingga meningkatkan kecepatan pemrosessan (Cong, 2021). FPGA merupakan perangkat keras yang dapat rekonfigurasi sehingga yang dapat digunakan untuk melakukan komputasi paralel secara alamiah. Hal ini sesuai untuk mengeksekusi algoritma komputasi secara intensif (Tkachenko dan Song, 2020). Komputasi paralel yang presisi FPGA dapat menjamin kebutuhan perancangan pada sistem (Jiang et al, 2017). Disamping itu, FPGA sebagai basis akselerasi robotika menjadi alternatif yang kompetitif dalam kaitannya dengan skenario daya terbatas dan latensi kritis karena dapat mengungguli CPU maupun GPU pada efisiensi energi dan kinerjanya (Wan, et al, 2021). Selain itu, fleksibilitas yang ditawarkan oleh FPGA memberikan keleluasaan dalam membangun arsitektur dan jalur data yang sesuai dengan kebutuhan sistem yang akan dikendalikan sehingga komputasi dapat berjalan dengan optimal.

Terdapat beberapa penelitian yang menggunakan FPGA sebagai basis komputasi kinematika robot manipulator seperti pada penelitian Muttaqin et al., (2021) dan Cong (2021). Pada kedua penelitian ini FPGA hanya digunakan untuk mengendalikan gerak servo secara paralel tanpa melakukan komputasi kinematika pada FPGA. Disisi lain, juga terdapat penelitian yang telah mengimplementasikan komputasi kinematika maju pada FPGA seperti yang dilakukan (Dereli, 2021). Pada penelitian berbeda juga diimplementasikan komputasi kinematika balik pada FPGA seperti yang dilakukan oleh (Tkachenko dan Song, 2020; Jiang et al, 2017). Agar dapat mengimplementasikan komputasi kinematika secara *realtime* dengan penggunaan resouce yang terbatas, beberapa penelitian harus mengorbankan beberapa aspek pada robot manipulator seperti; mengabaikan orientasi *end-effector* yang merupakan salah-satu komponen utama pada sikap robot manipulator, sangat bergantung pada struktur mekanik robot sehingga

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator**
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

mengurangi akurasi dan tidak dapat diaplikasikan pada robot dengan struktur yang berbeda, mengurangi jumlah *Degrees of Freedom* (DoF) yang terdapat pada robot manipulator sehingga menyederhanakan model matematika robot yang berdampak pada fleksibilitas gerakan robot.

Kinematika robot manipulator secara fundamental dimodelkan menggunakan persamaan matriks homogen yang setiap elemennya disusun dari rangkaian operasi fungsi trigonometri, sehingga fungsi trigonometri akan selalu muncul pada komputasi kinematik robot yaitu pada kinematika maju ataupun kinematika balik. Selain itu, fungsi trigonometri juga dapat dimanfaatkan pada robot manipulator untuk analisis dinamika, perencanaan lintasan, dan kontrol gerak. Dengan demikian, fungsi trigonometri harus dihitung secara real-time untuk memenuhi kebutuhan komputasi robot. Hal ini sejalan dengan tantangan utama pada komputasi robot diantaranya adalah minimalisasi konsumsi energi dan jaminan kinerja yang realtime (Xu, el al., 2022).

Disisi lain, terdapat aspek lain yang dibutuhkan pada komputasi fungsi trigonometri yaitu akurasi dan efisiensi komputasi (Tang and Xu, 2020). Hal ini disebabkan pada kinematika robot, fungsi sinus dan kosinus menjadi elemen utama dalam matriks rotasi dan transformasi homogen. Oleh karena itu, kesalahan komputasi pada fungsi trigonometri dapat merambat ke hasil perhitungan posisi dan orientasi *end-effector*. Dari sisi efisiensi komputasi, fungsi trigonometri merupakan bagian dari komputasi yang lebih besar sehingga unit komputasinya diintegrasikan dengan modul-modul komputasi lain yang membutuhkan sumber daya logika komputasi yang lebih besar dan tugas yang lebih kompleks. Sehingga komputasi trigonometri tidak hanya harus cepat, tetapi juga harus akurat dan efisien dari sisi penggunaan sumber daya perangkat keras.

Meskipun beberapa penelitian menunjukkan bahwa FPGA sesuai untuk akselerasi komputasi robotika karena mampu memberikan determinisme waktu, efisiensi energi, dan kinerja yang kompetitif dibandingkan *platform* komputasi umum seperti CPU maupun GPU pada skenario tertentu (Cong, 2021; Tkachenko

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dan Song, 2020; Jiang et al., 2017; Wan et al., 2021). Implementasi fungsi trigonometri pada FPGA tetap menghadapi persoalan *trade-off* antara akurasi, kecepatan, dan penggunaan penggunaan sumber daya logika.

Dua pendekatan umum yang dapat digunakan untuk melakukan komputasi fungsi trigonometri pada FPGA, yaitu Look Up Table (LUT) dan Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) (Salehi et al, 2020). Metode LUT dipertimbangkan sebagai metode yang paling mudah, efektif dan cepat, namun dalam implementasinya dibutuhkan jumlah LUT yang besar seiring dengan meningkatnya kebutuhan akurasi (Satti et al, 2022). Dengan demikian metode ini tidak sesuai dengan aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi dengan sumber daya yang terbatas (Li et al, 2024). Implementasi algoritma CORDIC pada komputasi fungsi trigonometri pada FPGA sangat nyaman karena membutuhkan alokasi sumber daya yang rendah (Paz dan Garrido, 2023). Disisi lain penggunaan algoritma CORDIC memiliki latensi yang tinggi karena latensinya berelasi terhadap jumlah iterasi yang berpengaruh terhadap presisi(Bai et al, 2025).

Penelitian-penelitian sebelumnya telah mencoba mengatasi kelemahan tersebut melalui berbagai modifikasi. Pada pendekatan LUT, beberapa penelitian menggunakan *twiddle factor* untuk pemetaan kuadran (Martos et al, 2020), atau kombinasi LUT dengan ekspansi deret untuk meningkatkan akurasi (Chen et al, 2021). Namun, pendekatan ini tetap berisiko meningkatkan kebutuhan memori dan kompleksitas kontrol. Pada pendekatan CORDIC, beberapa variasi seperti radix-4, higher radix, double-step branching, dan modifikasi berbasis deret Taylor telah digunakan untuk menurunkan latensi atau meningkatkan presisi (Li et al., 2024; Bai et al., 2025). Namun, sebagian pendekatan tersebut tetap membutuhkan tambahan sumber daya logika yang tidak kecil. Perkembangan terkini dalam penelitian CORDIC terus mencari titik temu (*trade-off*) optimal antara penggunaan sumber daya, tundaan (*delay*), konsumsi daya, dan presisi; namun, mencapai optimasi secara bersamaan masih menjadi sebuah tantangan (Meher dan Aggarwal, 2025).

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan arsitektur perangkat keras hybrid LUT–CORDIC pada FPGA untuk komputasi fungsi trigonometri, khususnya sinus dan kosinus, pada robot manipulator. Kebaruan penelitian terletak pada strategi koreksi berbasis distribusi kesalahan. Dari pada mengganti sebagian besar tahapan CORDIC dengan LUT atau memperbesar jumlah iterasi, penelitian ini diawali dengan memetakan distribusi kesalahan mutlak dari CORDIC dasar pada domain sudut input. Selanjutnya kesalahan dominan dilokalisasi pada interval sudut sempit, sehingga LUT yang sangat kecil kemudian digunakan di dalam interval tersebut untuk menerapkan koreksi tingkat LSB, sementara jalur CORDIC tetap dipertahankan untuk sisa rentang input lainnya Dengan pendekatan ini, akurasi dapat ditingkatkan secara signifikan, sementara penggunaan sumber daya logika dan latensi tetap rendah.

Penelitian ini menggunakan format data 10-bit (resolusi sudut 0,125° dan presisi output sinus/kosinus 10-bit) agar sesuai dengan resolusi sendi manipulator. Implementasi dilakukan menggunakan VHDL pada FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menilai *trade-off* antara akurasi numerik, kecepatan komputasi, dan penggunaan sumber daya logika FPGA. Metrik utama yang digunakan meliputi kesalahan mutlak maksimal , MSE, jumlah slice, slice LUT, slice register, frekuensi kerja maksimum, periode minimum, jumlah siklus clock, dan waktu evaluasi komputasi. Dengan demikian, fokus penelitian tidak lagi diletakkan pada keseluruhan komputasi kinematika robot secara luas, tetapi pada unit dasar yang sangat menentukan, yaitu komputasi fungsi trigonometri yang akurat, cepat, dan hemat sumber daya logika untuk mendukung sistem robot manipulator.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan utama penelitian ini adalah adanya kendala *trade-off* pada komputasi fungsi trigonometri berbasis FPGA untuk robot manipulator. Metode LUT unggul dari sisi kecepatan, tetapi membutuhkan sumber daya logika yang

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

besar ketika akurasi ditingkatkan. Sebaliknya, metode CORDIC hemat penggunaan sumber daya logika, tetapi akurasinya bergantung pada jumlah iterasi yang dapat meningkatkan latensi komputasi. Kesenjangan ini menyulitkan pemenuhan kebutuhan sistem robot yang menuntut komputasi cepat, akurat, dan hemat sumber daya logika secara bersamaan.

1.3. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini diantaranya adalah :

1. Penelitian ini tidak merancang struktur mekanik dari robot manipulator, tetapi difokuskan pada pengembangan arsitektur perangkat keras untuk komputasi fungsi trigonometri pada robot manipulator.
2. Fungsi trigonometri yang akan dihitung adalah *sin()* dan *cos().*
3. Evaluasi inti dilakukan pada domain sudut kuadran pertama, yaitu 0° sampai 90°. Perluasan ke rentang sudut lebih luas dapat dilakukan melalui mekanisme pemetaan kuadran, tetapi tidak menjadi fokus utama evaluasi pada penelitian ini.
4. Arsitektur dimodelkan menggunakan VHDL dan diimplementasikan pada FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324.
5. Teknik-teknik perancangan yang digunakan fokus kepada penyeimbangan antara kinerja komputasi (kecepatan dan akurasi) dan penghematan sumber daya logika.
6. Penelitian ini belum melakukan pengujian konsumsi daya fisik, pengujian langsung pada gerakan robot manipulator nyata, pengukuran kesalahan posisi dan orientasi end-effector. Aspek-aspek tersebut ditempatkan sebagai arah pengembangan penelitian lanjutan.

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.1.2. Multi Channel Point- to Point 60
5.1.3. Multi-Channel Continuous Path 61
5.2. Simulasi fungsional..... 62
5.3. Implementasi fisik 63
5.3.1. Pengujian parameter 63
6. BAB VI ARSITEKTUR HYBRID LUT-CORDIC UNTUK EFISIENSI DAN AKURASI KOMPUTASI FUNGSI TRIGONOMETRI PADA ROBOT MANIPULATOR 67
6.1. Pemodelan Komputasi Trigonometri..... 67
6.1.1. Look Up Table 67
6.1.2. CORDIC..... 69
6.2. Pengujian fungsional dan pengukuran kinerja..... 71
6.2.1. Look Up Table 71
6.2.2. CORDIC..... 74
6.2.3. Hybrid LUT-CORDIC..... 77
6.3. Perbandingan Kinerja Komputasi..... 83
6.4. Analisis *Trade-off*..... 92
6. BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN..... 96
7.1. Kesimpulan..... 96
7.2. Saran..... 97

DAFTAR PUSTAKA 98

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Frame Koordinat yang terlampir pada lengan robot 23
Gambar 3.2 Arsitektur dasar FPGA (Bailey, 2011) 31
Gambar 4.1 Tahapan Pelaksanaan Penelitian..... 37
Gambar 4.2 Open Manipulator X..... 38
Gambar 4.3 Struktrur Mekanik Open Manipulator X 39
Gambar 4.4 (a) Konektifitas dan (b) sinyal PWM kendali servo [datasheet]..... 42
Gambar 4.5 Diagram Blok PWM Generator Tunggal dengan Metode Point to Point..... 42
Gambar 4.6 Blok diagram PWM generator untuk metode Continuous path..... 44
Gambar 4.7 Antarmuka unit komputasi trigonometri..... 45
Gambar 4.8 Top level arsitektur 47
Gambar 4.9 Arsitektur CORDIC untuk komputasi fungsi trigonometri..... 53
Gambar 4.10 Unit penjumlah dan pengurang 54
Gambar 5.1 Antarmuka unit PWM modulator 58
Gambar 5.2 Entitas PWM Generator single channel 60
Gambar 5.3 Listing entitas PWM generator multichannel continuous path..... 61
Gambar 5.4 Lisiting Pembagi frekuensi 61
Gambar 5.5 listing pengaturan kecepatan rotasi 62
Gambar 5.6 Hasil simulasi PWM generator motor tunggal metode point-to point 63
Gambar 6.1 Listing entitas unit fungsi trigonometri menggunakan LUT..... 68
Gambar 6.2 Listing deklarasi kapasitas ROM dan data yang tersimpan..... 68
Gambar 6.3 Listing akses data ROM 69
Gambar 6.4 Deklarasi entitas fungsi trigonometri menggunakan CORDIC 69
Gambar 6.5 Deklarasi struktural component pada CORDIC 70
Gambar 6.6 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan LUT 72
Gambar 6.7 Potongan tampilan file vcd pengujian 73
Gambar 6.8 Grafik Akurasi menggunakan metode LUT 74
Gambar 6.9 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan CORDIC 75
Gambar 6.10 Grafik Akurasi menggunakan metode CORDIC 76
Gambar 6.11 Arsitektur yang diusulkan..... 81
Gambar 6.12 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan Hybrid LUT CORDIC..... 82
Gambar 6.13 Hasil Simulasi fungsi trigonometri menggunakan Hybrid LUT CORDIC..... 83
Gambar 6.14 Perbandingan *absolute error* komputasi fungsi trigonometri 83
Gambar 6.15 Grafik trade off kinerja perangkat keras 94

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator**
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Realisasi fungsi trigonometri pada FPGA 18
Tabel 2.2 State of Art komputasi fungsi trigonometri berbasis FPGA 19
Tabel 4.1 Pemodelan ETS robot Open Manipulator X 39
Tabel 4.2 Element pada matriks transformasi homogen model robot 41
Tabel 4.3 8-bit dan 10 bit data 48
Tabel 4.4 Representasi tabel kebenaran 51
Tabel 4.5 Skema pengujian 55
Tabel 4.6 Metrik Evaluasi 56
Tabel 5.1 Data pengujian resolusi motor 64
Tabel 5.2 Data pengujian lebar pulsa maksimal dan minimal 65
Tabel 5.3 Relasi lebar pulsa terhadap sudut 66
Tabel 6.1 Kinerja perangkat keras menggunakan metode LUT 73
Tabel 6.2 Perbandingan Kesalahan mutlak hasil komputasi fungsi sinus 78
Tabel 6.3 Sudut-rotasi untuk setiap iterasi 78
Tabel 6.4 Kinerja perangkat keras menggunakan metode CORDIC untuk format data berbeda 79
Tabel 6.5 Prekomputasi fungsi sin(θ) dan cos (90 – θ) dalam format binner 80
Tabel 6.6 Perbandingan kinerja perangkat keras 84
Tabel 6.7 Perbandingan kinerja perangkat keras yang diusulkan dengan penelitian lain 89
Tabel 6.8 Normalisasi konseptual perbandingan penelitian 91

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Pengembangan Arsitektur *Hybrid* LUT–CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator

Komputasi fungsi trigonometri yang cepat dan akurat dengan sumber daya terbatas sangat esensial pada robot manipulator. *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) sebagai *platform* komputasi robot manipulator menjadi alternatif ideal karena sifat komputasi paralel alaminya, namun implementasi fungsi trigonometri pada FPGA menghadapi *trade-off*: metode *Look-Up Table* (LUT) boros memori pada akurasi tinggi, sedangkan metode *Coordinate Rotation Digital Computer* (CORDIC) memicu latensi tinggi jika iterasinya ditambah. Kondisi ini menunjukkan adanya *trade-off* antara akurasi, kecepatan komputasi, dan penggunaan sumber daya logika FPGA.

Penelitian ini mengembangkan arsitektur perangkat keras *hybrid* LUT–CORDIC berbasis FPGA untuk komputasi fungsi trigonometri. Pendekatan hybrid dirancang dengan memetakan distribusi kesalahan mutlak dari CORDIC dasar pada domain sudut masukan. Selanjutnya, kesalahan dominan dilokalisasi pada interval sudut kecil, kemudian dikoreksi menggunakan LUT berukuran kecil. Dengan demikian, jalur CORDIC tetap digunakan pada sebagian besar rentang sudut, sedangkan LUT hanya digunakan pada interval yang menghasilkan kesalahan dominan. Arsitektur yang diusulkan menggunakan format data 10-bit, dimodelkan serta diimplementasikan pada FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa arsitektur *hybrid* LUT–CORDIC mampu meningkatkan akurasi komputasi fungsi trigonometri secara signifikan tanpa menambah latensi komputasi. Dibandingkan dengan CORDIC *Maximum Absolute Error* (MAE) sinus dan kosinus terpangkas masing-masing sebesar 88,19% dan 88,75%, sedangkan *Mean Squared Error* (MSE) keduanya tereduksi hingga lebih dari 97,5%. Dari sisi perangkat keras, penggunaan *slice* juga berkurang dari 81 menjadi 69, sedangkan waktu komputasi turun dari 35,271 ns menjadi 30,627 ns. Arsitektur hybrid LUT–CORDIC ini mampu menggeser *trade-off* komputasi trigonometri pada FPGA menuju rancangan yang lebih akurat, cepat, dan hemat sumber daya logika, sehingga relevan dengan kebutuhan komputasi robot manipulator.

Kata kunci: FPGA, CORDIC, LUT, hybrid LUT–CORDIC, fungsi trigonometri, robot manipulator.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Development of FPGA-Based Hybrid LUT–CORDIC Architecture for Trigonometric Function Computation In Robot Manipulators

Fast and accurate computation of trigonometric functions with limited resources is essential in robotic manipulators. Field-Programmable Gate Array (FPGA) as a computing platform for robotic manipulators serves as an ideal alternative due to its inherent parallel computing nature. However, the implementation of trigonometric functions on FPGA faces a trade-off: the Look-Up Table (LUT) method is memory-intensive at high accuracy, whereas the Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) method induces high latency when iterations are increased. This condition demonstrates a trade-off between accuracy, computation speed, and the utilization of FPGA logic resources.

This research develops a hybrid LUT–CORDIC hardware architecture based on FPGA for computing trigonometric functions. The hybrid approach is designed by mapping the absolute error distribution of the basic CORDIC over the input angle domain. Furthermore, dominant errors are localized within small angular intervals and subsequently corrected using a small-sized LUT. Consequently, the CORDIC path remains utilized across most of the angular range, while the LUT is only employed in intervals that yield dominant errors. The proposed architecture utilizes a 10-bit data format, modeled and implemented on a Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324 FPGA.

The test results indicate that the hybrid LUT–CORDIC architecture significantly improves the accuracy of trigonometric function computation without increasing computation latency. Compared to CORDIC, the Maximum Absolute Error (MAE) of sine and cosine is truncated by 88.19% and 88.75%, respectively, while the Mean Squared Error (MSE) of both is reduced by more than 97.5%. From the hardware perspective, slice utilization is also reduced from 81 to 69, while the computation time decreases from 35.271 ns to 30.627 ns. This hybrid LUT–CORDIC architecture successfully shifts the trade-off of trigonometric computation on FPGA toward a more accurate, faster, and logic-resource-efficient design, making it highly relevant to the computational needs of robotic manipulators.

Keywords: FPGA, CORDIC, LUT, hybrid LUT–CORDIC, trigonometric function, robot manipulator.

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Robot manipulator banyak digunakan pada berbagai aplikasi medis dan industri karena mampu melakukan pekerjaan berulang, bekerja secara presisi (Nguyen dan Marvel,2022), serta beroperasi pada lingkungan yang sulit atau berbahaya bagi manusia (Issa, et al., 2019). Dalam menjalankan tugasnya robot manipulator tidak hanya dituntut mencapai titik tujuan, tetapi juga harus mampu mengikuti lintasan tertentu dengan posisi dan orientasi *end-effector* yang sesuai (Yan, et al., 2022). Kendali pada robot manipulator harus memiliki kemampuan komputasi fungsi trigonometri, kinematika balik, interpolasi lintasan dan kendali gerakan secara sinkron (Cong, 2021). Dengan demikian, sebuah robot merupakan sistem komputasi informasi yang sangat kompleks.

Berdasarkan metode kontrol untuk memandu *end effector* pada robot manipulator, terdapat 2 jenis kontrol robot yaitu *point-to-point* dan *continuous path*. Robot *point-to-point* dapat dikonfigurasi dengan menentukan kumpulan titik diskrit sehingga tidak memerlukan jalur *end effector* antara titik asal dan titik tujuan. Sementara itu, pada metode *continuous path*, seluruh jalur *end effector* dapat dikendalikan, sehingga dibutuhkan kendali kecepatan dan percepatan gerak robot (Spong, et al., 2020). Metode *continuous path* merupakan metode yang paling banyak digunakan pada robot manipulator (Mercedes, et al., 2020). Komputasi kinematika yang dilakukan secara *realtime* diperlukan untuk merealisasikan metode *continuous path* pada sebuah robot manipulator.

Realisasi metode kendali *continuous path* pada sebuah robot manipulator membutuhkan pengendalian setiap sendi secara paralel dan sinkron. Keterbatasan kanal yang dapat digunakan untuk keluaran *Pulse Witdh Modulation*

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

(PWM) merupakan salah satu kelemahan dari pengendalian berbasis mikrokontroler untuk robot manipulator. Dalam beberapa penelitian servo motor dikendalikan oleh PWM yang disediakan oleh rangkaian driver motor (Ay et al, 2018; Bhavanibhatla et al, 2019). Namun, komunikasi antara pengontrol utama dan rangkaian driver motor menggunakan protokol *Inter-Integrated Circuit* (I2C) yang tidak memungkinkan untuk mengontrol setiap motor pada setiap sendi secara bersamaan. Di sisi lain, membangun sistem *hybrid* antara *Digital Signal Processor* (DSP), *Motion Control Unit* (MCU) dan *Personal Computer* (PC) menimbulkan kesulitan dalam memodifikasi struktur perangkat keras dan mencapai tingkat pencuplikan yang lebih cepat (Petko, et al, 2016).

Metode kendali *continuous path* untuk memandu end-effector dan gerakan manipulator yang halus serta stabil pada frekuensi sampling tertentu mampu menghasilkan perencanaan lintasan yang efektif (Yan et al, 2022). Untuk dapat merealisasikan perencanaan lintasan yang efektif dibutuhkan komputasi kinematik yang cepat dan efektif. Salah satu contoh komputasi kinematika yang penting dilakukan secara *realtime* adalah komputasi kinematik balik, karena melibatkan tahapan yang paling membutuhkan banyak waktu(Tkachenko dan Song, 2020). Dengan demikian, dibutuhkan *platform* komputasi dan kendali yang tepat untuk sebuah robot manipulator.

Terdapat beberapa *platform* yang dapat digunakan untuk komputasi dan kendali robot manipulator, diantaranya adalah *Central Processing Unit* (CPU), *Graphics Processing Unit* (GPU), *Application-Specific Integrated Circuit* (ASIC) dan *Field-Programmable Gate Array* (FPGA). Menurut (Lin et al, 2018) GPU, ASIC dan FPGA mampu menggungguli CPU dalam kecepatan komputasi. Hal ini dikarenakan CPU dirancang untuk dapat mengerjakan tugas yang sangat bervariasi dan mengeksekusi intruksi secara sekuensial. Disisi lain GPU dirancangan dengan ribuan inti prosessor yang dapat bekerja secara simultan yang mengakibatkan kebutuhan daya yang sangat tinggi sehingga tidak cocok untuk komputasi dengan sumber daya terbatas (Wan et al, 2021). ASIC merupakan salah satu *platform*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

komputasi yang cocok untuk komputasi dengan sumber daya terbatas dengan kinerja yang bagus, namun demikian memiliki kelemahan dari sisi biaya dan waktu pengembangan dan tidak fleksibel (Dhilleswararao et al, 2022).

FPGA memiliki fleksibilitas untuk implementasi *realtime* sehingga meningkatkan kecepatan pemrosessan (Cong, 2021). FPGA merupakan perangkat keras yang dapat rekonfigurasi sehingga yang dapat digunakan untuk melakukan komputasi paralel secara alamiah. Hal ini sesuai untuk mengeksekusi algoritma komputasi secara intensif (Tkachenko dan Song, 2020). Komputasi paralel yang presisi FPGA dapat menjamin kebutuhan perancangan pada sistem (Jiang et al, 2017). Disamping itu, FPGA sebagai basis akselerasi robotika menjadi alternatif yang kompetitif dalam kaitannya dengan skenario daya terbatas dan latensi kritis karena dapat mengungguli CPU maupun GPU pada efisiensi energi dan kinerjanya (Wan, et al, 2021). Selain itu, fleksibilitas yang ditawarkan oleh FPGA memberikan keleluasaan dalam membangun arsitektur dan jalur data yang sesuai dengan kebutuhan sistem yang akan dikendalikan sehingga komputasi dapat berjalan dengan optimal.

Terdapat beberapa penelitian yang menggunakan FPGA sebagai basis komputasi kinematika robot manipulator seperti pada penelitian Muttaqin et al., (2021) dan Cong (2021). Pada kedua penelitian ini FPGA hanya digunakan untuk mengendalikan gerak servo secara paralel tanpa melakukan komputasi kinematika pada FPGA. Disisi lain, juga terdapat penelitian yang telah mengimplementasikan komputasi kinematika maju pada FPGA seperti yang dilakukan (Dereli, 2021). Pada penelitian berbeda juga diimplementasikan komputasi kinematika balik pada FPGA seperti yang dilakukan oleh (Tkachenko dan Song, 2020; Jiang et al, 2017). Agar dapat mengimplementasikan komputasi kinematika secara *realtime* dengan penggunaan resouce yang terbatas, beberapa penelitian harus mengorbankan beberapa aspek pada robot manipulator seperti; mengabaikan orientasi *end-effector* yang merupakan salah-satu komponen utama pada sikap robot manipulator, sangat bergantung pada struktur mekanik robot sehingga

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator**
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

mengurangi akurasi dan tidak dapat diaplikasikan pada robot dengan struktur yang berbeda, mengurangi jumlah *Degrees of Freedom* (DoF) yang terdapat pada robot manipulator sehingga menyederhanakan model matematika robot yang berdampak pada fleksibilitas gerakan robot.

Kinematika robot manipulator secara fundamental dimodelkan menggunakan persamaan matriks homogen yang setiap elemennya disusun dari rangkaian operasi fungsi trigonometri, sehingga fungsi trigonometri akan selalu muncul pada komputasi kinematik robot yaitu pada kinematika maju ataupun kinematika balik. Selain itu, fungsi trigonometri juga dapat dimanfaatkan pada robot manipulator untuk analisis dinamika, perencanaan lintasan, dan kontrol gerak. Dengan demikian, fungsi trigonometri harus dihitung secara real-time untuk memenuhi kebutuhan komputasi robot. Hal ini sejalan dengan tantangan utama pada komputasi robot diantaranya adalah minimalisasi konsumsi energi dan jaminan kinerja yang realtime (Xu, el al., 2022).

Disisi lain, terdapat aspek lain yang dibutuhkan pada komputasi fungsi trigonometri yaitu akurasi dan efisiensi komputasi (Tang and Xu, 2020). Hal ini disebabkan pada kinematika robot, fungsi sinus dan kosinus menjadi elemen utama dalam matriks rotasi dan transformasi homogen. Oleh karena itu, kesalahan komputasi pada fungsi trigonometri dapat merambat ke hasil perhitungan posisi dan orientasi *end-effector*. Dari sisi efisiensi komputasi, fungsi trigonometri merupakan bagian dari komputasi yang lebih besar sehingga unit komputasinya diintegrasikan dengan modul-modul komputasi lain yang membutuhkan sumber daya logika komputasi yang lebih besar dan tugas yang lebih kompleks. Sehingga komputasi trigonometri tidak hanya harus cepat, tetapi juga harus akurat dan efisien dari sisi penggunaan sumber daya perangkat keras.

Meskipun beberapa penelitian menunjukkan bahwa FPGA sesuai untuk akselerasi komputasi robotika karena mampu memberikan determinisme waktu, efisiensi energi, dan kinerja yang kompetitif dibandingkan *platform* komputasi umum seperti CPU maupun GPU pada skenario tertentu (Cong, 2021; Tkachenko

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dan Song, 2020; Jiang et al., 2017; Wan et al., 2021). Implementasi fungsi trigonometri pada FPGA tetap menghadapi persoalan *trade-off* antara akurasi, kecepatan, dan penggunaan penggunaan sumber daya logika.

Dua pendekatan umum yang dapat digunakan untuk melakukan komputasi fungsi trigonometri pada FPGA, yaitu Look Up Table (LUT) dan Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) (Salehi et al, 2020). Metode LUT dipertimbangkan sebagai metode yang paling mudah, efektif dan cepat, namun dalam implementasinya dibutuhkan jumlah LUT yang besar seiring dengan meningkatnya kebutuhan akurasi (Satti et al, 2022). Dengan demikian metode ini tidak sesuai dengan aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi dengan sumber daya yang terbatas (Li et al, 2024). Implementasi algoritma CORDIC pada komputasi fungsi trigonometri pada FPGA sangat nyaman karena membutuhkan alokasi sumber daya yang rendah (Paz dan Garrido, 2023). Disisi lain penggunaan algoritma CORDIC memiliki latensi yang tinggi karena latensinya berelasi terhadap jumlah iterasi yang berpengaruh terhadap presisi(Bai et al, 2025).

Penelitian-penelitian sebelumnya telah mencoba mengatasi kelemahan tersebut melalui berbagai modifikasi. Pada pendekatan LUT, beberapa penelitian menggunakan *twiddle factor* untuk pemetaan kuadran (Martos et al, 2020), atau kombinasi LUT dengan ekspansi deret untuk meningkatkan akurasi (Chen et al, 2021). Namun, pendekatan ini tetap berisiko meningkatkan kebutuhan memori dan kompleksitas kontrol. Pada pendekatan CORDIC, beberapa variasi seperti radix-4, higher radix, double-step branching, dan modifikasi berbasis deret Taylor telah digunakan untuk menurunkan latensi atau meningkatkan presisi (Li et al., 2024; Bai et al., 2025). Namun, sebagian pendekatan tersebut tetap membutuhkan tambahan sumber daya logika yang tidak kecil. Perkembangan terkini dalam penelitian CORDIC terus mencari titik temu (*trade-off*) optimal antara penggunaan sumber daya, tundaan (*delay*), konsumsi daya, dan presisi; namun, mencapai optimasi secara bersamaan masih menjadi sebuah tantangan (Meher dan Aggarwal, 2025).

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan arsitektur perangkat keras hybrid LUT–CORDIC pada FPGA untuk komputasi fungsi trigonometri, khususnya sinus dan kosinus, pada robot manipulator. Kebaruan penelitian terletak pada strategi koreksi berbasis distribusi kesalahan. Dari pada mengganti sebagian besar tahapan CORDIC dengan LUT atau memperbesar jumlah iterasi, penelitian ini diawali dengan memetakan distribusi kesalahan mutlak dari CORDIC dasar pada domain sudut input. Selanjutnya kesalahan dominan dilokalisasi pada interval sudut sempit, sehingga LUT yang sangat kecil kemudian digunakan di dalam interval tersebut untuk menerapkan koreksi tingkat LSB, sementara jalur CORDIC tetap dipertahankan untuk sisa rentang input lainnya Dengan pendekatan ini, akurasi dapat ditingkatkan secara signifikan, sementara penggunaan sumber daya logika dan latensi tetap rendah.

Penelitian ini menggunakan format data 10-bit (resolusi sudut 0,125° dan presisi output sinus/kosinus 10-bit) agar sesuai dengan resolusi sendi manipulator. Implementasi dilakukan menggunakan VHDL pada FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menilai *trade-off* antara akurasi numerik, kecepatan komputasi, dan penggunaan sumber daya logika FPGA. Metrik utama yang digunakan meliputi kesalahan mutlak maksimal , MSE, jumlah slice, slice LUT, slice register, frekuensi kerja maksimum, periode minimum, jumlah siklus clock, dan waktu evaluasi komputasi. Dengan demikian, fokus penelitian tidak lagi diletakkan pada keseluruhan komputasi kinematika robot secara luas, tetapi pada unit dasar yang sangat menentukan, yaitu komputasi fungsi trigonometri yang akurat, cepat, dan hemat sumber daya logika untuk mendukung sistem robot manipulator.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan utama penelitian ini adalah adanya kendala *trade-off* pada komputasi fungsi trigonometri berbasis FPGA untuk robot manipulator. Metode LUT unggul dari sisi kecepatan, tetapi membutuhkan sumber daya logika yang

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

besar ketika akurasi ditingkatkan. Sebaliknya, metode CORDIC hemat penggunaan sumber daya logika, tetapi akurasinya bergantung pada jumlah iterasi yang dapat meningkatkan latensi komputasi. Kesenjangan ini menyulitkan pemenuhan kebutuhan sistem robot yang menuntut komputasi cepat, akurat, dan hemat sumber daya logika secara bersamaan.

1.3. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini diantaranya adalah :

1. Penelitian ini tidak merancang struktur mekanik dari robot manipulator, tetapi difokuskan pada pengembangan arsitektur perangkat keras untuk komputasi fungsi trigonometri pada robot manipulator.
2. Fungsi trigonometri yang akan dihitung adalah *sin()* dan *cos().*
3. Evaluasi inti dilakukan pada domain sudut kuadran pertama, yaitu 0° sampai 90°. Perluasan ke rentang sudut lebih luas dapat dilakukan melalui mekanisme pemetaan kuadran, tetapi tidak menjadi fokus utama evaluasi pada penelitian ini.
4. Arsitektur dimodelkan menggunakan VHDL dan diimplementasikan pada FPGA Xilinx Artix-7 XC7A100T-CSG324.
5. Teknik-teknik perancangan yang digunakan fokus kepada penyeimbangan antara kinerja komputasi (kecepatan dan akurasi) dan penghematan sumber daya logika.
6. Penelitian ini belum melakukan pengujian konsumsi daya fisik, pengujian langsung pada gerakan robot manipulator nyata, pengukuran kesalahan posisi dan orientasi end-effector. Aspek-aspek tersebut ditempatkan sebagai arah pengembangan penelitian lanjutan.

Pengembangan Arsitektur Hybrid LUTâ€“CORDIC berbasis FPGA untuk Komputasi Fungsi Trigonometri pada
Robot Manipulator
Nia Gella Augoestien, Prof. Dr. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc; Dr.techn. Ahmad Ashari, M.I.Kom;Dr. Andi Dharmawan, S
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan arsitektur perangkat keras hybrid LUT–CORDIC pada FPGA untuk komputasi fungsi trigonometri pada robot manipulator yang menyeimbangkan kinerja komputasi dari sisi kecepatan komputasi, akurasi dan penggunaan sumber daya logika.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah menghasilkan arsitektur komputasi fungsi trigonometri berbasis FPGA yang dapat digunakan pada robot manipulator. Arsitektur yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi unit dasar bagi sistem komputasi robot manipulator yang membutuhkan perhitungan fungsi trigonometri yang cepat, akurat sekaligus hemat penggunaan sumber daya logika.

Dari sisi akademik, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan metode komputasi trigonometri berbasis FPGA dengan pendekatan hybrid yang tidak hanya berorientasi pada pengurangan latensi, tetapi juga pada peningkatan akurasi melalui koreksi kesalahan yang terlokalisasi. Dari sisi praktis, pengurangan kesalahan komputasi sinus dan kosinus berpotensi mengurangi akumulasi kesalahan pada perhitungan matriks rotasi dan transformasi homogen, sehingga mendukung perhitungan posisi dan orientasi end-effector yang lebih andal secara numerik.

Selain itu, penghematan sumber daya logika FPGA memberikan ruang integrasi yang lebih besar bagi modul lain dalam sistem robotika, seperti PWM generator, kinematika balik, kinematika balik, analisis dinamika dan kendili gerakan.. Dengan demikian, hasil penelitian ini relevan bagi pengembangan sistem kendali robotika tertanam yang membutuhkan keseimbangan antara akurasi, determinisme waktu, dan efisiensi perangkat keras.