

Sistem Kendali Jalan Robot Humanoid Pada Bidang Tidak Rata Menggunakan *LQR*

Curie Habiba*¹, Andi Dharmawan², Danang Lelono³

¹Program Studi Elektronika dan Instrumentasi, DIKE, FMIPA, UGM, Yogyakarta, Indonesia

^{2,3}Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta, Indonesia

e-mail: *¹curiehabiba@mail.ugm.ac.id, ²andi_dharmawan@mail.ucm.ac.id,

³danang@ugm.ac.id

Abstrak

Pengembangan robot humanoid memiliki keunggulan yaitu mobilisasi di lingkungan manusia yang baik karena strukturnya yang mirip manusia. Robot humanoid harus mampu berjalan seimbang pada bidang yang tidak rata. Bidang yang tidak rata menyebabkan adanya perubahan pola berjalan pada robot dan menyebabkan robot terjatuh. Berbagai penelitian mengemukakan bahwa robot humanoid akan stabil berjalan ketika COM atau ZMP dari robot tetap berada di area telapak kaki. Kondisi tersebut dapat diwujudkan dengan menanamkan sistem kendali pada robot humanoid.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mendesain sistem kendali untuk robot humanoid ketika berjalan. Kendali *LQR* dan strategi pengenalan bidang dapat digunakan untuk menstabilkan robot humanoid namun terbatas pada permukaan bidang tertentu dan respon sistem yang tidak konsisten. Pada setiap variasi bentuk bidang jalan, robot akan memerlukan perlakuan yang berbeda.

Pada penelitian ini akan dirancang kendali *LQR* dan strategi pengenalan bidang jalan untuk robot humanoid ketika berjalan pada bidang tidak rata. Metode *LQR* dipilih karena performa yang robust. Metode ini diharapkan dapat memberikan kemampuan robot humanoid untuk mengubah nilai umpan balik sistem kendali sesuai dengan keadaan robot sehingga robot dapat berjalan pada bidang tidak rata tanpa terjatuh.

Kata kunci— *LQR*, Humanoid, ZMP, stabil, kendali, biped.

Abstract

The development of a humanoid robot has the advantage of good mobilizing in human environment because of its human-like structure. Humanoid robots must be able to walking stably on an uneven terrain. The uneven surface causes change in the walking pattern of the robot and causes the robot to fall. Various studies suggest that humanoid robots will walk stably when the COM projection or ZMP of the robot remains in the soles of the feet. This condition can be realized by embedding a control system on a humanoid robot.

Various studies have been conducted to design control systems for humanoid robots while walking. *LQR* control and terrain recognition strategies can be used to stabilize humanoid robots but are limited to certain surfaces and system response is inconsistent. The robot need different treatment for each variation of the terrain.

In this research, *LQR* control and surface recognition strategy will be designed for a humanoid robot to walking on an uneven terrain. The *LQR* method was chosen because of its robust performance. This method is expected to provide the ability of humanoid robots to change the value of the control system feedback according to the state of the robot so that the robot can walk on uneven terrain without falling.

Keyword— *LQR*, Humanoid, ZMP, stable, controll, biped

1. PENDAHULUAN

Robot humanoid merupakan robot yang bentuk fisik dan fungsionalnya dikembangkan semirip mungkin dengan manusia. Karakteristik tersebut menjadi keunggulan robot humanoid sebagai teknologi yang fleksibel diaplikasikan di lingkungan manusia seperti Humanoid Robotics Project (HRP) oleh The Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) dari Jepang yang menggunakan robotnya untuk menggantikan manusia untuk merawat mesin industri, pelayan manajemen gedung dan rumah, eksperimen jarak jauh atau di tempat berbahaya [1], dan masih banyak lagi. Luasnya kegunaan robot humanoid menjadikan riset tentang mobilitas robot ini semakin menarik.

Robot humanoid secara fisik memiliki dua kaki atau biasa disebut bipedal sebagai komponen mobilitasnya. Gerakan dengan dua kaki memiliki banyak variasi seperti berjalan, berlari, hingga melompat. Kemampuan berjalan merupakan gerakan dasar yang digunakan untuk mobilitas robot humanoid di lingkungan manusia. Robot humanoid dapat berjalan dengan memetakan gerakan sudut bagian-bagian kaki pada varian waktu atau biasa disebut dengan pola berjalan [2].

Pola berjalan dibuat dengan memperhatikan medan berjalannya. Bidang datar dan tidak licin merupakan medan ideal bagi robot humanoid berjalan stabil, namun pada prakteknya robot humanoid harus mampu berjalan di bidang yang tidak selalu datar. Dalam menghasilkan pola berjalan, Inverted Pendulum Model (IPM) adalah metode yang paling umum digunakan untuk menghasilkan lintasan gerak [3]. Metode ini berhasil membuat lintasan berjalan robot sesuai dengan keadaan bidang dengan memodelkan robot humanoid sebagai model pendulum terbalik.

Robot humanoid ketika berjalan pada bidang tidak rata memiliki kecenderungan untuk jatuh. Ketika melangkah di bidang tidak rata, periode menapak atau touchdown akan berbeda-beda karena perbedaan ketinggian atau kemiringan bidang sehingga dibutuhkan strategi untuk menyesuaikan pola berjalan yang baik sehingga robot humanoid berjalan stabil [4]. Riset mengenai kestabilan berjalan yang sukses dan umum digunakan adalah kriteria kestabilan ZMP (Zero Moment Point) yang didefinisikan sebagai resultan atau pusat tekanan dari tanah pada kaki yang menapak. Gerak robot dikendalikan agar ZMP-nya selalu berada di dalam support polygon [2].

Strategi yang tak kalah penting untuk berjalan di bidang yang tidak rata adalah pengenalan bidang. Jika robot biped berjalan di bidang yang tidak rata, lintasan berjalan harus dimodifikasi berdasarkan bentuk permukaan jalan. Informasi yang tepat tentang bentuk permukaan jalan yang tidak rata sulit didapatkan karena faktor lingkungan atau keterbatasan sensor yang digunakan [3]. Sensor force sensitive resistor (FSR) digunakan pada telapak kaki robot untuk memetakan persebaran tekanan yang diterima untuk memprediksi posisi ZMP secara realtime.

Robot humanoid ketika menapak pada permukaan yang tidak rata, telapak kaki robot mendapatkan tumbukan yang tak terduga [5]. Gaya reaksi antara tanah dan telapak robot humanoid mempengaruhi stabilitas berjalannya. Jika informasi tentang kondisi kontak tanah dengan robot diabaikan ketika membuat lintasan berjalan robot, maka akan terjadi gaya reaksi tanah yang tidak terduga dan membuat robot humanoid tidak stabil. Kendali dibutuhkan untuk kaki yang berayun maupun kaki pendukung sehingga gaya reaksi yang diterima dapat diredam dan robot dapat berjalan stabil.

Kendali dibutuhkan untuk mengendalikan pergerakan kaki pendukung dan kaki yang berayun dalam waktu yang sama. Pada kaki pendukung kendali digunakan untuk menjaga keseimbangan robot dengan menjaga pergerakan pusat massa robot tetap dalam lintasannya. Lintasan gerak pusat massa diatur ulang sesuai dengan posisi telapak kaki pendukung [6]. Posisi ZMP akan dijaga untuk selalu berada di dalam support polygon sehingga kesetimbangan dapat tercapai. Pada kaki yang berayun, kendali digunakan untuk menyesuaikan posisi pijakan dan

meredam gaya reaksi yang terjadi ketika menapak. Ketika permukaan bidang tempat kaki robot menapak memiliki ketinggian yang berbeda dari lintasan jalan yang sudah dibuat, maka lintasan jalan harus dapat beradaptasi dengan mengubah periode perpindahan pusat massa dan periode menapak.

Kendali menggunakan Central Pattern Generator (CPG) digunakan untuk menangani tumbukan pada kaki yang berayun dan stabilitas berjalan robot. Kecepatan sudut dari robot ketika berjalan digunakan sebagai sinyal umpan balik CPG, yang hanya mempengaruhi amplitudo dari sinyal keluaran model dan tidak berpengaruh pada frekuensi. Jika robot berjalan di lingkungan yang kompleks, frekuensi dan amplitudo sinyal keluaran CPG memerlukan kendali real time agar robot dapat beradaptasi dengan lingkungan [7]. Kendali PID merupakan salah satu kendali dengan tanggap sistem yang baik untuk mengendalikan robot humanoid [8]. Namun ketika berada di lingkungan yang kompleks, gangguan tak terduga tidak bisa ditangani kendali PID dengan optimal [9]. Oleh karena itu dibutuhkan umpan balik yang mempertimbangkan pergerakan kaki yang mempengaruhi gerak kaki lainnya.

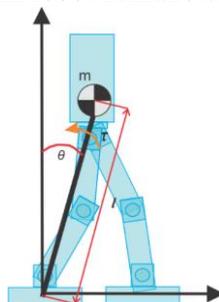
Robot humanoid menggunakan sistem Multiple Input Multiple Output (MIMO) dimana joint torques adalah vektor masukan dan keluarannya [2]. Linear Quadratic Regulator (LQR) merupakan kendali yang dapat diimplementasikan pada sistem MIMO. Lintasan berjalan yang sudah di buat dengan konsep pendulum terbalik dan dengan kendali LQR akan mengendalikan lintasan pusat massa robot humanoid yang diterapkan pada kaki pendukung dengan error seminimal mungkin [10]. Pada pergelangan kaki robot humanoid yang berayun, kendali fuzzy digunakan untuk meredam gaya reaksi berdasarkan posisi kontak kaki dengan bidang [9]. Selain posisi telapak kaki yang menapak, gaya reaksi dari tanah juga dipertimbangkan untuk mengurangi impact pada robot humanoid.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan dalam penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap yang dibuat secara sistematis agar penelitian dapat berjalan dengan baik dan terarah. Metode penelitian yang dijabarkan meliputi rancangan model sistem humanoid ketika berjalan, strategi berjalan di bidang tidak rata, pembuatan pola berjalan, dan sistem kendali robot.

2.1 rancangan model sistem

Robot humanoid digunakan pada penelitian ini merupakan robot yang memiliki torso dan sepasang kaki. Pergerakan berfokus pada posisi torso sebagai masukan kendali mengikuti pola berjalan dengan menggerakkan sendi-sendi kaki. Robot humanoid yang digunakan memiliki 12 *degree of freedom*, sehingga akan memiliki kinematika dan komputasi yang kompleks. Oleh karena itu perlu pemodelan yang robust sehingga dapat menyederhanakan proses komputasi dan mampu mengendalikan robot sehingga tetap berjalan seimbang. Inverted pendulum merupakan salah satu model sederhana dalam komputasi dan mampu merepresentasikan dinamika gerak sistem robot humanoid ketika berjalan.



Gambar 1 Inverted Pandulum

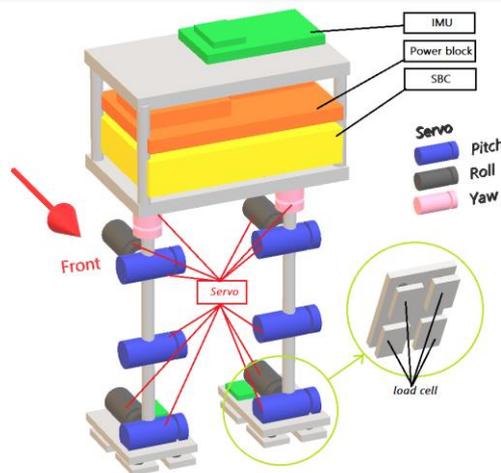
Model matematis pendulum terbalik seperti pada Gambar 1, dengan pendekatan Newton-Euler pada persamaan (1).

$$ml^2\ddot{\theta} - mgl \sin\theta = \tau \quad (1)$$

Selain menggunakan model pendulum terbalik untuk memodelkan gerak COM, pada penelitian ini ZMP robot humanoid juga akan digunakan sebagai kriteria keseimbangan ketika berjalan. Zero moment point merupakan koordinat titik di mana gaya F dapat menggantikan seluruh gaya yang tersebar pada permukaan telapak kaki robot. Selain itu ZMP juga dapat dianggap sebagai titik momen dari ground reaction force bernilai nol. ZMP digunakan sebagai tolak ukur keseimbangan robot berkaki ketika berjalan karena robot berkaki memiliki titik kontak dengan permukaan jalan yang terbatas.

2.2 Rancangan mekanik dan elektronik

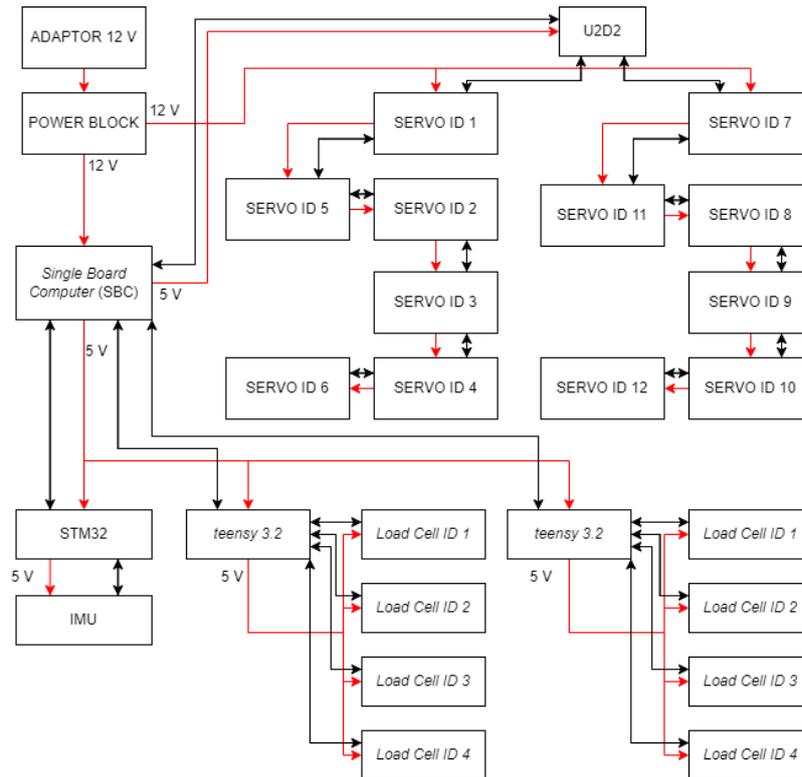
Arsitektur sistem robot humanoid dilengkapi dengan servo sebagai penggerak, sensor sebagai *feedback*, *single board computer* sebagai pengontrol utama, *microcontroller* sebagai pengolah data sensor dan pengontrol tambahan yang dirangkai dalam frame mekanik yang berbentuk bipedal atau berkaki dua. Fisik robot terdiri dari dua bagian utama yaitu torso dan kaki. Bagian torso atau badan robot menghubungkan kaki kanan dan kiri. Torso robot berisi papan sirkuit regulator listrik, SBC, dan sensor IMU, sedangkan kaki robot disusun oleh frame atau link kaki, servo, dan sensor load cell. Konfigurasi robot dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Konfigurasi Robot

Pada Gambar 4.2 merupakan rancangan konfigurasi robot yang meliputi penempatan komponen-komponen seperti servo, sensor, dan controller pada frame robot. Pada torso robot terdapat SBC, power block atau papan sirkuit yang berisi regulator pendistribusi daya, dan modul sensor IMU. Sedangkan pada kaki robot terdapat servo-servo sebagai actuator robot yang masing-masing terhubung dengan link atau frame yang digambarkan dengan warna abu-abu muda. Peletakan servo dan posisi sumbu putar di sesuaikan sehingga dapat menerapkan gerakan kaki mendekati kaki manusia.

Servo yang digunakan adalah MX-64 yang memiliki torsi maksimum sebesar 5,5 Nm dengan derajat putar 0 hingga 360 derajat dan memiliki encoder sebagai sensor posisi. Servo digunakan sebagai penggerak tiap sendi dari kaki robot, tergantung letak servo pada sendi, nilai maksimal derajat dapat berbeda-beda. Servo dynamixel dikendalikan oleh mikrokontroler U2D2 melalui komunikasi USB ke *Single Board Computer*. Setiap Dynamixel tersusun dengan konfigurasi daisy chain sehingga terhubung secara seri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Rancangan Sistem Elektronis

2. 3 Rancangan strategi berjalan

Robot bergerak dengan mengikuti pola berjalan adaptif yang didapatkan dengan cara menghitung posisi tujuan langkah kaki robot serta periode berjalan sehingga didapatkan pola pusat massa yang harus diikuti robot. Ketika robot menapak pada bidang tidak rata, pola berjalan di hitung ulang berdasarkan kemiringan dan ketinggian bidang. Terdapat empat buah fase ketika robot mengikuti pola yaitu ketika robot memindahkan pusat massa untuk bersiap mengangkat kaki, saat melangkahkan kaki, saat menapakkan kaki, dan saat mengembalikan pusat massa ke posisi semula. Setiap sudut sendi robot untuk bergerak memindahkan pusat massa hingga melangkah didapatkan dengan menggunakan inverse kinematic.

Sistem kendali akan menghitung torsi dengan cara menghitung error yang didapatkan dari pengurangan state yang terukur dengan referensi state atau pola berjalan. Servo roll dan pitch pada pergelangan kaki yang menopang badan kemudian akan menghasilkan torsi yang sesuai untuk menggerakkan robot. Kaki yang berayun juga menggunakan kendali untuk menggerakkan Servo roll dan pitch pada pergelangan kaki sehingga dapat meminimalisir gaya reaksi dari tanah dan penyesuaian posisi kaki pada bidang.

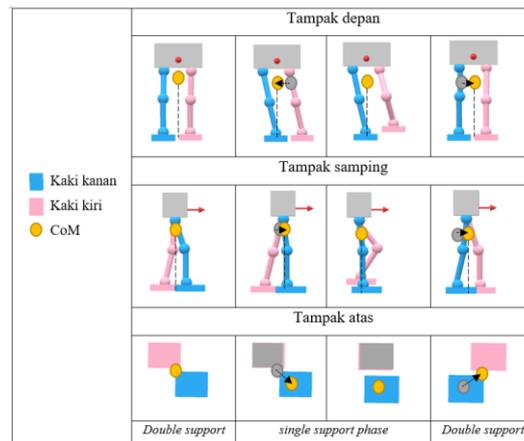
Telapak kaki yang melangkah akan menyentuh bidang pada suatu waktu. Sensor load cell akan membaca perubahan tekanan yang terjadi pada telapak kaki sehingga mendapatkan waktu ketika kaki menapak sehingga sistem kendali kembali menghitung error dari perubahan pola berjalan akibat gaya reaksi dari kaki yang menapak. Telapak kaki robot perlu memosisikan diri sejajar dengan bidang jalan sehingga dapat memperoleh maksimum luasan support polygon sehingga robot dapat berjalan stabil dan seimbang pada langkah berikutnya.

Sistem kendali yang akan diterapkan dikatakan berhasil ketika telah memenuhi kriteria tertentu. Kriteria toleransi yang digunakan pada penelitian ini bergantung pada luas telapak kaki yang menyentuh bidang (support polygon) serta periode langkah robot karena menggunakan kriteria kestabilan ZMP.

2.4 Rancangan Pola Berjalan

Pola berjalan di rancang dengan mempertimbangkan posisi CoM dan ZMP robot. Posisi CoM dijaga agar ZMP robot tetap berada pada support polygon ketika berjalan di permukaan yang tidak rata. Pola jalan terdiri dari dua fase, yaitu ketika robot berdiri dengan dua tumpuan kaki atau *double support phase* dan ketika robot berdiri dengan satu tumpuan kaki atau *single support phase*.

Pola berjalan yang diberikan kepada robot adalah posisi koordinat x, y dan z dari badan atau CoM robot serta posisi telapak kaki yang berayun secara kontinu terhadap waktu hingga periode berjalan berakhir. Posisi koordinat tersebut didapatkan dengan mempertimbangkan kriteria kestabilan ZMP dan dimensi robot. Skema pola berjalan robot di tunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Pola Berjalan

Posisi robot diawali dengan berdiri dengan kaki kiri di belakang seperti pada Gambar 4 pada fase double support yang pertama. Kemudian robot menggerakkan torsonya menuju ke kaki kanan untuk menggeser proyeksi CoM sehingga berada dalam support polygon kaki kanan. Setelah itu kaki kanan mulai melangkah dengan mempertahankan proyeksi CoM tetap pada support polygon, mulai saat ini robot memasuki fase single support hingga kaki kiri menapak. Setelah kaki kiri menapak, robot menggerakkan torsonya sehingga proyeksi CoM kembali ke tengah support polygon robot untuk fase double support.

2.6 Rancangan sistem kendali

Linear Quadratic Regulator atau yang biasa disingkat dengan LQR adalah metode untuk menentukan penguatan umpan balik K pada sistem kendali berbasis state space. Penguatan K didapatkan dengan mengolah dinamika sistem dengan bentuk matematis pada Persamaan (3) dan (3).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (3)$$

di mana

\mathbf{x} = State sistem

\mathbf{u} = Masukan sistem

\mathbf{y} = Keluaran sistem

\mathbf{A} = Matriks yang memetakan turunan *state* terhadap *state* ($n \times n$)

\mathbf{B} = Matriks yang memetakan turunan *state* terhadap masukan ($n \times m$)

C = Matriks yang memetakan keluaran terhadap *state*

D = Matriks yang memetakan keluaran terhadap masukan

LQR adalah metode yang digunakan untuk menentukan penguatan **K** pada umpan balik yang ditunjukkan pada Persamaan (4) yang meminimalisir *cost function* pada Persamaan (5).

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{x} \quad (4)$$

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (5)$$

Dengan mensubstitusi state variabel kendali yang dipengaruhi oleh nilai **K** (*full state feedback gain*) pada Persamaan (4) ke dalam Persamaan (5), maka diperoleh persamaan (6).

$$J = \int_{t_0}^{t_{\infty}} \mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{B} \mathbf{K}) \mathbf{x} dt \quad (6)$$

Pencarian nilai optimal dari **K** dilakukan dengan menggunakan persamaan (7),

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) \quad (7)$$

di mana matriks **P** adalah variabel matriks (dengan ukuran jumlah state \times 1) dan dapat diperoleh dengan metode Riccati pada Persamaan (8).

$$\mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} - \mathbf{S} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{Q} = 0 \quad (8)$$

Penentuan nilai **Q** dan **R** memiliki aturan sebagai berikut :

1. Matriks **Q** digunakan untuk mengatur performa masing-masing state.
2. Nilai **R** digunakan untuk mengatur seberapa besar gaya dan torsi total yang mempengaruhi sistem. Semakin tinggi **R**, maka pengaruh umpan balik terhadap sistem semakin menghilang sehingga sistem memiliki kecenderungan menjadi open loop.

Pada perancangan sistem kendali dilakukan penalaan nilai **Q** dan **R** yang sesuai sistem agar berjalan optimal. Setelah mendapat nilai state dari persamaan pendulum terbalik dan ZMP, waktu sampling juga ditentukan untuk melihat konsistensi sistem. Kemudian dilakukan penalaan nilai **Q** dan **R** dimulai dari nilai terkecil untuk mendapatkan nilai **K**. Sistem kendali diperlukan untuk mendapatkan sistem dengan nilai *error* seminimal mungkin. Pada kasus robot *humanoid* ketika berjalan, *error* yang diminimalkan adalah jarak *zero moment point* terhadap luasan telapak kaki yang bersentuhan dengan lintasan berjalan. Hal ini dapat dicapai dengan cara robot mengikuti pola berjalan yang telah dibuat dengan memperhitungkan dinamika dari robot dengan tanggap sistem yang cepat namun dengan *error* sekecil mungkin. Nilai tersebut dapat diperoleh menggunakan sensor *load cell* pada telapak kaki robot dan sensor IMU (*gyroscope* dan *accelerometer*).

Sistem kendali *fullstate feedback* yang akan digunakan memerlukan model *state space* dari persamaan gerak pendulum terbalik pada Persamaan (1). Model *state space* merupakan persamaan linier dalam bentuk matriks yang memetakan antara *state*, masukan dan keluaran. Persamaan yang lebih dari orde satu perlu dilinerisasi untuk mengubah persamaan tersebut menjadi beberapa persamaan orde satu dan memetakannya pada bentuk umum *state space*.

Model *state space* didapatkan dengan cara menentukan *state* dan masukan dari sistem terlebih dahulu kemudian dibentuk Persamaan (2) dan (3). State sistem yang digunakan pada model pendulum terbalik yaitu sudut dan kecepatan sudut pendulum pada sumbu *pitch* dan *roll*. Matriks **A** dan **B** kemudian dibentuk dengan melakukan integral parsial persamaan turunan *state* $\dot{\mathbf{x}}$ terhadap masing-masing *state* \mathbf{x} untuk matriks **A**. Sementara untuk matriks **B** didapatkan dengan melakukan integral parsial persamaan turunan *state* $\dot{\mathbf{x}}$ terhadap masukan **u**.

Model pendulum terbalik dengan dua masukan dalam bentuk *state space* ditunjukkan oleh Persamaan (9) dan (10).

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mgl}{I_{xx}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{mgl}{I_{yy}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{I_{xx}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{yy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

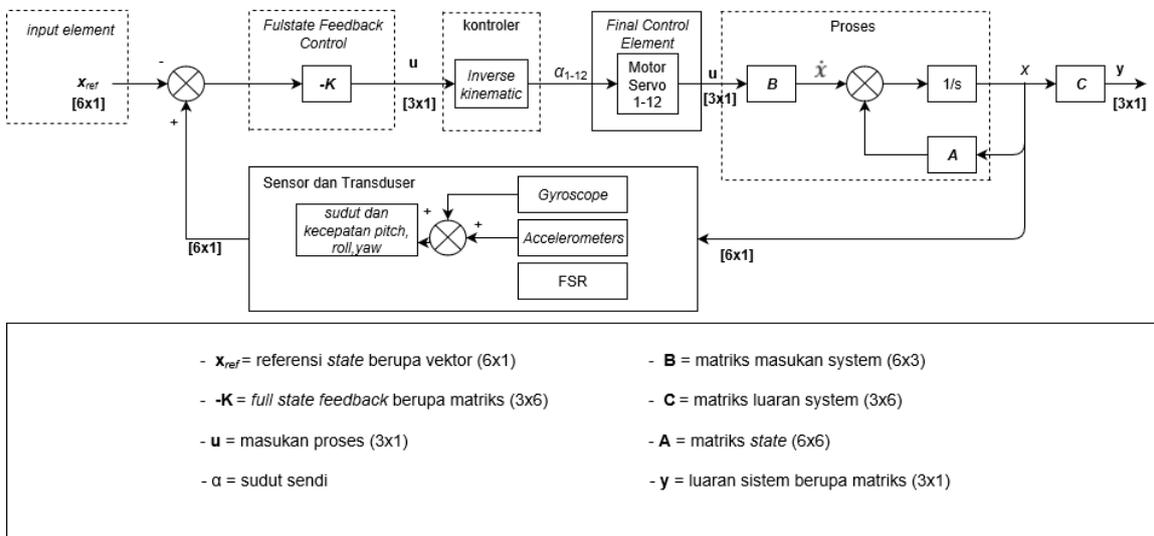
$\dot{\mathbf{x}} \quad \mathbf{A} \quad \mathbf{x} \quad \mathbf{B} \quad \mathbf{u}$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$\mathbf{y} \quad \mathbf{C} \quad \mathbf{x} \quad \mathbf{D} \quad \mathbf{u}$

Keterangan:

- θ = Sudut *pitch* I_{xx} = Momen inersia pada sumbu x
- $\dot{\theta}$ = Kecepatan sudut *pitch* I_{yy} = Momen inersia pada sumbu y
- $\ddot{\theta}$ = Percepatan sudut *pitch* g = Gaya gravitasi bumi
- ϕ = Sudut *roll* y_1 = Keluaran *pitch*
- $\dot{\phi}$ = Kecepatan sudut *roll* y_2 = Keluaran *roll*
- $\ddot{\phi}$ = Percepatan sudut *roll* m = Massa total robot
- u_1 = Masukan *pitch* l = Jarak titik pusat massa dengan telapak kaki
- u_2 = Masukan *roll*



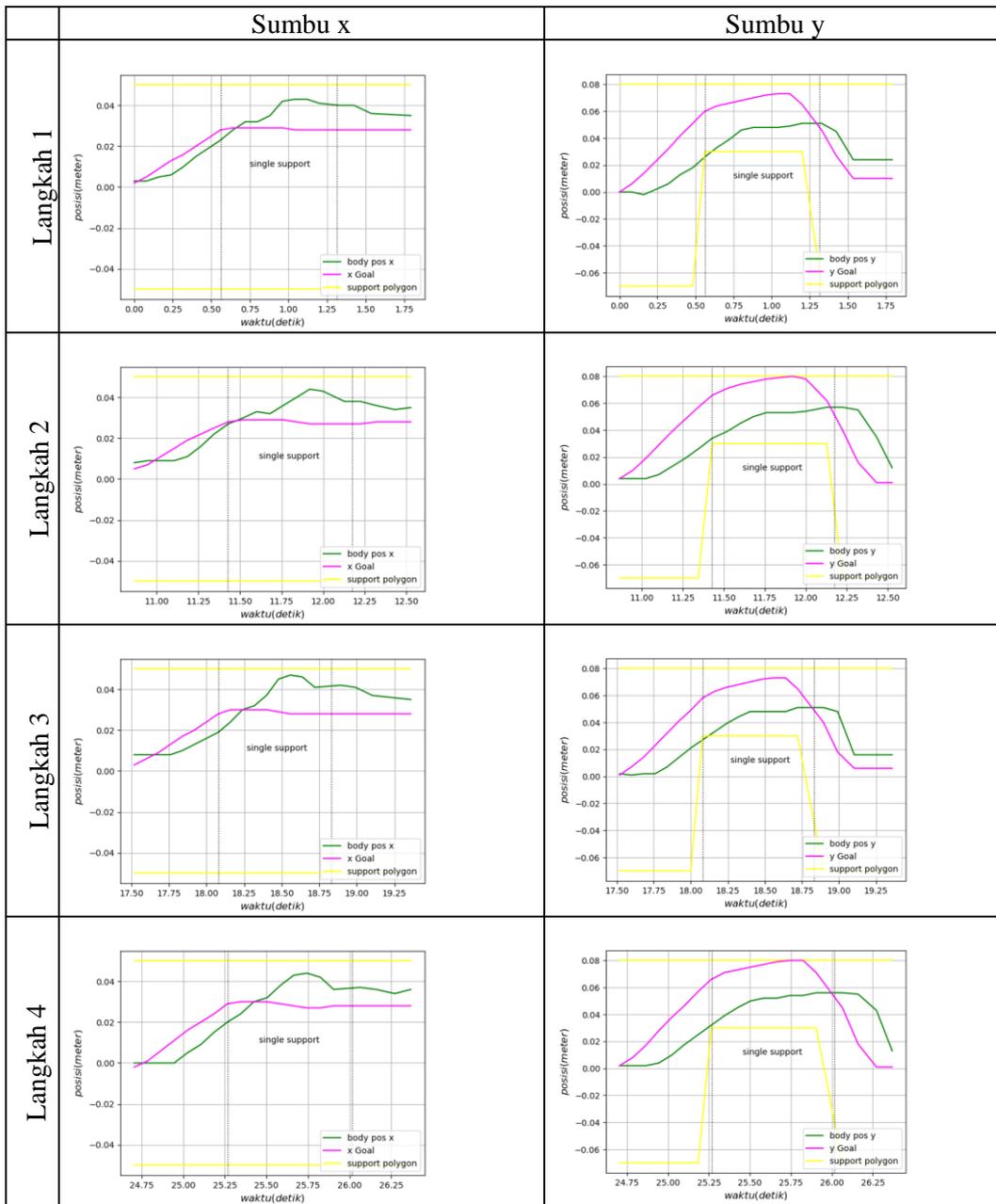
Gambar 5 Blok diagram kendali

Sistem kendali yang sudah dijabarkan di atas dapat diringkas dalam blok diagram kendali pada Gambar 5. Nilai x_{ref} merupakan posisi COM yang didapat dari walking generator yang telah dibuat. Nilai error didapat dengan mensubstitusi nilai x dengan nilai COM real hasil perhitungan sensor *load cell* dan IMU. Kemudian nilai error dikalikan dengan penguat K sehingga didapat posisi COM baru hasil kendali LQR. Posisi COM diubah menjadi nilai sudut dengan *inverse kinematic* yang kemudian dieksekusi oleh motor servo sebagai aktuator sistemnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian gerak berjalan pada bidang tidak rata dilakukan dengan membuat robot berjalan di bidang tidak rata yang terbuat dari potongan papan kayu. Nilai **Q** pada pengujian berjalan lurus digunakan sebagai acuan awal pada pengujian ini. Kemudian penalaan nilai **Q** kembali dilakukan menyesuaikan respon sistem sehingga mendapatkan nilai **K** terbaik untuk hasil respon sistem yang optimal. Pengujian berjalan di bidang tidak rata dilakukan dengan panjang langkah 3 cm dengan periode langkah 1,5 detik.

Pada langkah pertama, robot berdiri tegap di bidang rata dengan tinggi CoM 20 cm, kaki kanan sebagai kaki pendukung dan kaki kiri sebagai kaki yang berayun. Posisi kaki pendukung berada di koordinat 0 m pada sumbu x dan sumbu ya, sedangkan posisi kaki berayun berada pada koordinat -0,03 m pada sumbu x dan 0 pada sumbu y. Posisi tersebut digunakan agar pola jalan langkah pertama dan seterusnya sama sehingga dapat dibandingkan.



Gambar 6 Respon Sistem Keendali

Robot berhasil berjalan pada bidang tidak rata dengan hasil seperti pada Gambar 6. Garis magenta mewakili pola jalan yang telah dibuat sebagai referensi kendali, garis hijau mewakili posisi CoM secara *real time* dan garis kuning merupakan batas toleransi gerak CoM yang di ambil dari luasan *support polygon*. Pada pengujian ini robot berhasil berjalan 4 langkah dan mengenelai bidang tanpa terjatuh.

Pada langkah pertama, respon CoM pada sumbu x berhasil mengikuti referensi pola jalan dengan batas *overshoot* berada di dalam *support polygon*. Gangguan terbesar terjadi pada pertengahan periode *single support*, yaitu ketika posisi kaki yang berayun terangkat di posisi puncaknya. Gangguan tersebut menyebabkan adanya error pada sistem, dengan tanggap respon seperti yang ditunjukkan pada gambar sudah mampu membuat robot berjalan seimbang.

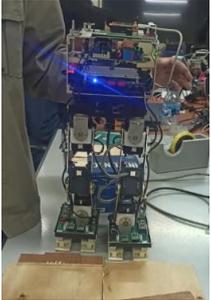
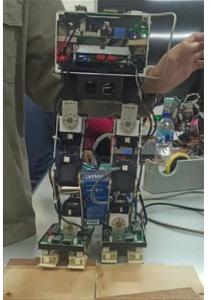
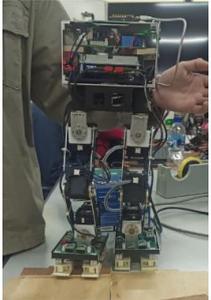
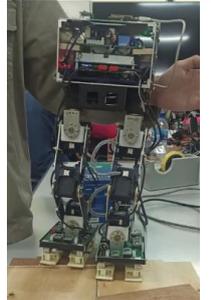
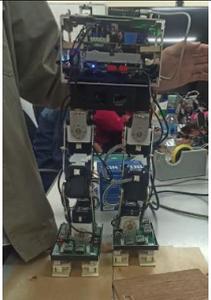
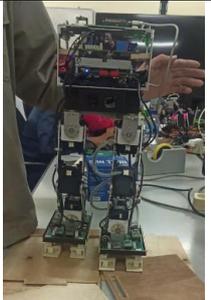
Respon CoM pada sumbu y di langkah pertama menunjukkan adanya periode ketika CoM berada diluar *support polygon* namun robot masih dapat mempertahankan posisinya dan tidak jatuh. Hal ini memungkinkan karena CoM robot mempunyai cukup kecepatan melawan gaya gangguan gravitasi, gerak kaki robot yang berayun, dan gaya gangguan lainnya. Gerak CoM sumbu y memiliki *steady state error* 2 cm pada saat periode *single support*. Pada periode ini beban servo *roll* pergelangan kaki sangat berat karena menopang massa robot dengan momentum sudut yang paling besar dibandingkan di periode lainnya, sehingga respon sistem menjadi lambat untuk menyesuaikan kemampuan torsi servo agar tidak terjadi *stall*. Akibatnya *rise time* sistem menjadi lebih lama dan *steady state error* yang besar.

Pada langkah kedua, kaki kanan robot beralih menjadi kaki yang berayun, sedangkan kaki kiri yang menjadi kaki pendukung. Kaki kiri robot sudah berada di bidang tidak rata dan sudah menapak dengan posisi luasan *support polygon* maksimum dari hasil algoritme membaca bidang. Respon sistem memperlihatkan hasil yang hamper sama dengan respon pada langkah pertama, yaitu pada sumbu x dengan *overshoot* 1,4 cm di periode yang sama, yaitu ketika kaki yang berayun berada di posisi tertinggi. Pada sumbu y terlihat respon sistem yang hampir sama dengan langkah pertama juga, namun kali ini posisi CoM berhasil bertahan di dalam *support polygon*.

Respon sistem pada sumbu x menghasilkan pola yang mirip di ke empat langkah robot, yaitu kemampuan dalam mengoreksi error dengan variasi gangguan berupa kemiringan dan ketinggian bidang tidak rata. *Overshoot* selalu terjadi ketika fase kaki terangkat, dengan gangguan posisi telapak kaki pendukung dimana semakin miring dan rendahnya bidang semakin besar pula momentum sudutnya.

Langkah pertama dan kedua memiliki jeda waktu 9,2 detik. Pada periode itu, robot mengoreksi posisi torso dan membaca bidang sehingga robot dapat menyesuaikan pola jalan pada langkah berikutnya. Begitu juga pada langkah ke tiga dan keempat memiliki jeda waktu yang berbeda. Hal ini disebabkan posisi menapaknya kaki pada bidang tidak selalu sama.

Posisi telapak kaki yang berbeda ini dipengaruhi oleh posisi CoM robot ketika kaki pertama kali menyentuh bidang dan juga bentuk dan ketinggian bidang itu sendiri. Jika posisi CoM robot selalu berada di dalam luasan *support polygon* maka posisi kaki yang manapak memiliki kemungkinan mendarat yang baik sehingga tidak membutuhkan banyak koreksi posisi torso dan sudut pergelangan kaki. Begitu juga dengan bentuk bidang, semakin ekstream perbedaan kemiringan dan ketinggian bidang dari bidang datar, maka membutuhkan waktu yang lebih lama untuk membaca bidang dengan mengandalkan sensor *load cell*. Posisi awal dan akhir periode jalan robot ditunjukkan pada Gambar 7.

	Posisi awal	Posisi akhir
Langkah 1	 <p>Waktu (detik) : 0</p>	 <p>Waktu (detik) : 1.8</p>
Langkah 2	 <p>Waktu (detik) : 10.8</p>	 <p>Waktu (detik) : 12.5</p>
Langkah 3	 <p>Waktu (detik) : 17.5</p>	 <p>Waktu (detik) : 19.4</p>
Langkah 4	 <p>Waktu (detik) : 24.7</p>	 <p>Waktu (detik) : 26.3</p>

Gambar 7 State robot

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian, pengamatan, dan analisis hasil penelitian yang telah diperoleh, maka didapatkan kesimpulan dari penelitian ini adalah penelitian yang dilakukan telah berhasil membuktikan bahwa pola jalan model LIPM, model kestabilan ZMP, kendali LQR, dan strategi berjalan dengan membaca bidang menggunakan persebaran tekanan pada telapak kaki yang telah dibuat dapat digunakan untuk membuat sebuah sistem robot *humanoid* berjalan pada permukaan jalan tidak rata.

5. SARAN

Saran yang diberikan untuk kelanjutan penelitian ini adalah menggunakan servo dengan torsi yang mampu menopang robot dengan gangguan gaya grafitasi dan gaya tidak terduga lainnya sesuai kebutuhan sistem sehingga lebih mudah membuat pola gerakan. Kemudian penambahan kamera sebagai sensor pengenalan objek dan orientasi robot dan menggunakan sensor tekanan dengan sensitifitas tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yokoi, K. 2004, HUMANOID ROBOT APPLICATIONS IN HRP The Ministry of Economy , Trade and Industry (METI) of Japan ran the Humanoid Robotics Project (HRP) from 1998JFY to 2002JFY, 1(3), 409–428.
- [2] Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K. & Yokoi, K., 2014. Introduction to Humanoid Robotics. Berlin Heidelberg: Springer.
- [3] Yoo, S. M., Hwang, S. W., Kim, D. H., dan Park, J. H. 2018, Biped Robot Walking on Uneven Terrain Using Impedance Control and Terrain Recognition Algorithm. 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 293–298.
- [4] Liu, Y., Wensing, P. M., Schmiedeler, J. P., dan Orin, D. E. 2016, Terrain-Blind Humanoid Walking Based on a 3D Actuated Dual-SLIP Model. IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, 3766(c), 1–8.
- [5] Dong, C., Chen, X., Yu, Z., Huang, Z., Li, Q., dan Zhou, Q. 2019, A novel hierarchical control strategy for biped robot walking on uneven terrain. 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) Toronto, Canada, 1–6.
- [6] Zheng, Y., Lin, M. C., Manocha, D., Adiwahono, A. H., dan Chew, C. 2010, A Walking Pattern Generator for Biped Robots on Uneven Terrains. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System Taipei, Taiwan, 4483–4488.
- [7] Wang, Z., He, B., Shen, R., dan Meng, W. (2015). Contact impact inhibition strategy for biped robot walking based on central pattern generator. 2015 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics Zhuhai, China, 733–738.
- [8] Iswara, P.J. dan Putra, A.E., 2012, Sistem Kontrol Keseimbangan Statis Robot Humanoid Joko Klana Berbasis Pengontrol PID, Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems, 1, 2, 67–76.
- [9] Mason, S., Righetti, L., dan Schaal, S. 2015. Full dynamics LQR control of a humanoid robot: An experimental study on balancing and squatting. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 374–379.
- [10] Dharmawan, A., Habiba, C., dan Auzan, M. 2019. Walking Stability Control System on Humanoid When Turning Based on LQR Method. International Journal of Scientific & Tecnology Research, 8(11).
- [11] Ma, H., Li, G., dan Wang, J. 2009, Humanoid Walking Pattern Modification Based on Foot-Ground Equivalent Contact Control. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guilin, China, 1(d), 457–462.