

Robot *Inverted* Pendulum Beroda Dua (IPBD) dengan Kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

FAHMIZAL¹, MUHAMMAD ARROFIQ², RONALD ADRIAN³, AFRIZAL MAYUB⁴

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada

⁴Pascasarjana S2 Pendidikan IPA FKIP, Universitas Bengkulu
Email: fahmizal@ugm.ac.id

Received 3 Januari 2019 | Revised 3 Februari 2019 | Accepted 24 Maret 2019

ABSTRAK

Makalah ini memaparkan proses pemodelan robot inverted pendulum beroda dua (IPBD) menggunakan dinamika Lagrange. Setelah sistem model robot IPBD diperoleh, teknik kendali optimal dalam hal ini menggunakan linear quadratic regulator (LQR) digunakan untuk melihat step respon sistem dan tanggapan respon sistem terhadap gangguan. Sebelum kendali LQR diimplementasikan, simulasi menggunakan Simulink Matlab dilakukan untuk mendapat parameter gain K pada kendali LQR. Selanjutnya, dengan mengubah-ubah matriks pembobot Q akan diperoleh variasi gain K. Pada penelitian ini dilakukan variasi matriks pembobotan Q sebanyak lima jenis. Sedangkan matriks elemen R di-tuning dengan nilai satu. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa dengan membesarkan pembobotan matriks Q, dihasilkan respon menuju keadaan steady lebih cepat dan overshoot berkurang. Parameter gain K dari hasil simulasi selanjutnya akan diimplementasikan secara embedded programming ke dalam Arduino Uno pada sistem robot IPBD.

Kata kunci: *Inverted pendulum beroda, Pemodelan, LQR*

ABSTRACT

This paper describes the process of modeling two-wheeled pendulum inverted robots (IPBD) using the Lagrange dynamics. After the IPBD robot model system was obtained, the optimal control technique in this case using a linear quadratic regulator (LQR) was used to see the system response step and the response of the system response to interference. Before the LQR control is implemented, simulation using Matlab Simulink is conducted to get the gain K parameter on the LQR control. Furthermore, by varying the weighting matrix Q, the gain variation K will be obtained. There are five types of Q weighting matrix in this research and the R element matrix is tuned with a value of 1. From the test, obtained results show that by raising the weighting matrix Q is produced a faster response to the steady state and overshoot is reduced. At the final stage, the gain K parameter from the simulation results will be implemented by embedded programming into Arduino Uno on the IPBD robot system.

Keywords: *Wheeled inverted pendulum, Modelling, LQR*

1. PENDAHULUAN

Robotika adalah bidang yang sangat menarik di bidang rekayasa maupun pengetahuan. Bidang ini telah memberikan kontribusi yang penting dalam dunia industri, dan telah banyak industri yang menggunakan robot untuk berbagai tugas seperti *assembling*, pengelasan, pengecatan dan pemindahan material. Secara paralel, kita menyaksikan munculnya robot yang memiliki peran penunjang (*assistive*) (Fasola, 2013) seperti robot pencari korban, penyapu ranjau, pengawasan (*surveillance*) (Song, 2009), eksplorasi (Nagatani, 2011), dan keamanan (Kim, 2010).

Di samping itu, minat penelitian ke arah robot dengan kemampuan merayap (*climbing*) (Zhang, 2006), berjalan tegak (*walking*) (Kuo, 2016), dan kesetimbangan (*balancing*) (Mayub, 2018) juga mendapat perhatian lebih. Pembahasan khusus dalam hal dinamik robot juga sangat menjanjikan dari segi kontribusi keilmuan. Perbedaan yang mendasar dari dinamika robot dan kinematika robot adalah penguraian gaya-gaya yang bekerja. Dinamika robot merupakan pergerakan robot dengan memperhatikan gaya-gaya yang bekerja, sedangkan kinematika tidak memperhatikan hal-hal tersebut. Tujuan utama kajian dinamik ini adalah untuk mendapatkan desain kendali yang kokoh (*robust*) yang mampu meredam gangguan dengan baik. Masih banyak struktur robot yang kompleks belum dikaji secara mendalam model dinamik oleh karena rumitnya persoalan pemodelan matematik sistem robot, sifat fisik alami (friksi pada poros aktuator, *backlash* pada *gearbox*, *noise* pada sensor, ketidaklinieran aktuator, dsb.) dan lingkungan (gangguan luar berupa efek pembebanan, jalan yang tidak rata, getaran, dll.). Kendali dasar dapat dirancang secara sistematis dari persamaan dinamik ini. Pada artikel ini sistem dinamik dari robot *Inverted Pendulum* Beroda Dua (IPBD) diturunkan menggunakan dinamika Lagrange.

Robot IPBD mengadopsi model sistem dari *inverted pendulum* konvensional dengan konfigurasi sistem fisik terdiri dari bandul, pedati dan motor DC. Penerapan sistem kendali pada robot IPBD juga beragam mulai dari kendali *linear* seperti PID (Pratama, 2015), kendali cerdas seperti Fuzzy (Bobby, 2015; Fahmizal, 2017) dan kendali *non-linear* seperti *Sliding Mode Controller* (SMC) (Huang, 2010). Robot IPBD bersifat *non-linear* dan merupakan sistem yang tidak stabil. Robot IPBD pada artikel ini menggunakan motor DC sebagai penggerak. Motor DC yang terletak pada masing-masing roda kiri dan kanan akan memberikan variabel gaya untuk mempertahankan kestabilan robot. Pada artikel ini akan dipaparkan kendali optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) yang dapat menjaga keseimbangan dari robot. Pada perancangan robot ini, sensor kemiringan dan sensor jarak digunakan sebagai masukan kondisi *state* dari robot. Sensor kemiringan yang diterapkan pada robot IPBD menggunakan *Inertia Measurement Unit* (IMU) MPU 6050 dan sensor ultasonik sebagai sensor pendeteksi jarak posisi.

Pada artikel ini, model matematis robot IPBD diturunkan dari hubungan fisis sistem. Model tersebut harus dapat menggambarkan karakteristik dinamis sistem secara memadai. Model dari robot ini diturunkan menggunakan dinamika Lagrange yang selanjutnya disimulasikan menggunakan Simulink Matlab. Fungsi sinyal *step* digunakan untuk melihat respon sistem pada kalang terbuka. Lebih jauh, sistem kendali pada kalang tertutup (*close loop*) menggunakan LQR. LQR merupakan metode kendali optimum dengan tujuan utama membawa *state* akhir ke titik nol dengan meminimalkan *cost function*. Jenis kendali ini bertujuan mencari nilai *gain state feedback* (K).

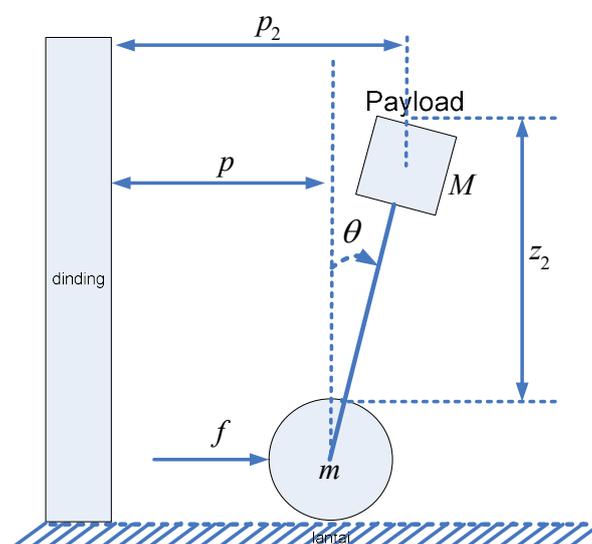
Artikel ini disusun menjadi lima bagian. Pada bagian 2, metodologi dalam penelitian ini diusulkan. Di bagian 3 simulasi model robot IPBD dengan menggunakan LQR dijelaskan. Prosedur implementasi kendali LQR disajikan di bagian 4 beserta eksperimen yang

menunjukkan keefektifan dan manfaat metode yang diusulkan. Bagian 5 merupakan kesimpulan dari penelitian ini.

2. METODOLOGI

2.1. Pemodelan Robot *Inverted* Pendulum Beroda

Model matematis diturunkan dari hubungan fisis sistem. Model tersebut harus dapat menggambarkan karakteristik dinamis sistem secara memadai. Model teoritis yang lengkap dari sistem robot IPBD dapat diturunkan menggunakan dinamika Lagrange. Langkah pertama adalah penentuan koordinat sistem, kemudian penentuan gaya, fungsi energi dan Lagrangian. Selanjutnya menggunakan persamaan Lagrange untuk menentukan persamaan gerak sistem. Diagram skematik dinamika IPBD dapat dilihat pada Gambar 1 dan sistem koordinat ini akan digunakan untuk selanjutnya dianalisis.



Gambar 1. Diagram Skematik Robot IPBD

Analisis fisis dinamika robot IPBD adalah sebagai berikut:

1. Sistem koordinat umum

Sistem robot IPBD ini adalah sistem yang memiliki dua buah kebebasan sehingga sistem ini dapat dipresentasikan menggunakan dua koordinat umum. Pada analisis kali ini, koordinat yang dipilih adalah pergeseran secara horizontal dari robot p , dan pergeseran sudut dari bandul $theta$ (θ). p bernilai positif ke arah kanan dan θ bernilai positif searah jarum jam, dihitung dari posisi terbaliknya.

2. Energi kinetik dan energi potensial

Energi kinetik untuk roda (E_R) terdiri dari energi kinetik rotasi roda dan translasi roda yang dijelaskan pada Persamaan (1), dengan m adalah massa roda dan \dot{p} adalah kecepatan robot ke arah horizontal.

$$\begin{aligned}
 E_R &= E_{rotasi} + E_{translasi} \\
 E_R &= \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} m \dot{p}^2 \\
 E_R &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m R^2 \right) \frac{\dot{p}^2}{R^2} + \frac{1}{2} m \dot{p}^2 = \frac{3}{4} m \dot{p}^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

Energi kinetik untuk bandul (E_B) dapat dinyatakan pada Persamaan (2), dengan M adalah massa bandul. Berdasarkan Gambar 1, nilai v dapat direpresentasikan menjadi bentuk $\dot{p}_2^2 + \dot{z}_2^2$, dengan turunan dari p_2 dan z_2 dijelaskan pada Persamaan (3) dan Persamaan (4).

$$E_B = \frac{1}{2} M v^2 \quad (2)$$

$$p_2 = p + l \sin \theta \text{ maka } \dot{p}_2 = \dot{p} + l \dot{\theta} \cos \theta \quad (3)$$

$$z_2 = l \cos \theta \text{ maka } \dot{z}_2 = -l \dot{\theta} \sin \theta \quad (4)$$

Maka dapat diperoleh Persamaan (5) yang merupakan jabaran dari Persamaan (2).

$$E_B = \frac{1}{2} M (\dot{p}_2 + \dot{z}_2)^2 \quad (5)$$

$$E_B = \frac{1}{2} M \left(\dot{p}_2^2 + 2 \dot{p} \dot{\theta} l \cos \theta + \frac{1}{2} M l^2 \dot{\theta}^2 \right)$$

Sehingga total energi kinetik T adalah E_R dijumlahkan dengan E_B atau jika dalam persamaan dinyatakan dalam Persamaan (6).

$$T = \frac{3}{4} m \dot{p}^2 + \frac{1}{2} m \dot{p}^2 + M l \cos \theta \dot{p} \dot{\theta} + \frac{1}{2} M l^2 \dot{\theta}^2 \quad (6)$$

Karena robot hanya bergerak pada sumbu horizontal saja, maka energi potensial V dari sistem hanya ditentukan sepenuhnya oleh sudut dari bandul seperti yang dijelaskan pada Persamaan (7), dengan g adalah percepatan gravitasi bumi dan l adalah panjang bandul.

$$V = M g l \cos \theta \quad (7)$$

3. Lagrangian

Ditahap ini, dilakukan analisis dinamik sistem dengan menggunakan metode Lagrangian yang dijelaskan pada Persamaan (8).

$$L = T - V \quad (8)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (6) dan Persamaan (7) ke Persamaan (8) maka diperoleh Lagrangian-nya menjadi seperti yang dijelaskan pada Persamaan (9).

$$L = \left(\frac{3}{4} m + \frac{1}{2} m \right) \dot{p}^2 + M l \cos \theta \dot{p} \dot{\theta} + \frac{1}{2} M l^2 \dot{\theta}^2 - M g l \cos \theta \quad (9)$$

4. Persamaan Lagrange

Koordinat umum yang dipilih pada Persamaan (9) adalah (p, θ) . Dari koordinat umum tersebut diterapkan analisis Lagrange lainnya yaitu masing-masing untuk p dan θ . Untuk menyelesaikan p dengan persamaan Lagrange dijelaskan pada Persamaan (10).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}} \right) - \frac{\partial L}{\partial p} = f \quad (10)$$

Menggunakan Persamaan (9) untuk mengevaluasi turunan parsial pada Persamaan (10) maka menghasilkan Persamaan (11).

$$\frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{3}{2} m + M \right) \dot{p} + M l \dot{\theta} \cos \theta \right\} - 0 = f \quad (11)$$

$$\left(\frac{3}{2} m + M \right) \ddot{p} + M l \ddot{\theta} \cos \theta - M l \dot{\theta}^2 \sin \theta = f$$

Untuk menyelesaikan θ dengan persamaan Lagrange dijelaskan pada pada Persamaan (12).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (12)$$

Menggunakan Persamaan (9) untuk mengevaluasi turunan parsial pada Persamaan (12) maka dihasilkan Persamaan (13).

$$\frac{d}{dt}(Ml\dot{p} \cos \theta + Ml^2\dot{\theta}) - Mgl \sin \theta = 0 \quad (13)$$

$$Ml\ddot{p} \cos \theta - Ml\dot{p} \sin \theta + Ml^2\ddot{\theta} - Mgl \sin \theta = 0$$

Sehingga persamaan sistem untuk robot IPBD dapat disajikan pada Persamaan (14).

$$\left(\frac{3}{2}m + M\right)\ddot{p} + Ml\ddot{\theta} \cos \theta - Ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = f \quad (14)$$

$$Ml\ddot{p} \cos \theta - Ml\dot{p} \sin \theta + Ml^2\ddot{\theta} - Mgl \sin \theta = 0$$

5. Linearisasi

Persamaan (14) tersebut adalah *non-linear*. Karena tujuan sistem kendali adalah menjaga bandul tetap tegak, persamaan tersebut dapat di-linear-kan yang berlaku untuk $\sin \theta \approx 0$ dan $\cos \theta \approx 1$ sehingga menjadi Persamaan (15).

$$\left(\frac{3}{2}m + M\right)\ddot{p} + Ml\ddot{\theta} = f \quad (15)$$

$$M\ddot{p} + Ml\ddot{\theta} - Mg\theta = 0$$

Dengan menyelesaikan Persamaan (15) akan didapat \ddot{p} dan $\ddot{\theta}$ yang disajikan pada Persamaan (16).

$$\ddot{p} = \frac{2f}{3m} - \frac{2Mg}{3m}\theta \quad (16)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2f}{3ml} + \left(\frac{3m+2M}{3ml}\right)g\theta$$

Bila pada Persamaan (16) disajikan dalam bentuk *state-space* maka diperoleh Persamaan (17). Dimana u adalah gaya yang bekerja pada sistem robot IPBD, f .

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \left(\frac{3m+2M}{3ml}\right)g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{2M}{3m}g & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ p \\ \dot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2}{3ml} \\ 0 \\ \frac{2}{3m} \end{bmatrix} u \quad (17)$$

2.2. Linear Quadratic Regulator (LQR)

Selain metode *pole placement* (Tewari, 2002), kendali keseimbangan juga dapat dirancang dengan menggunakan LQR. LQR adalah sebuah kendali optimal yang bertujuan membawa *state* akhir ke titik nol dengan meminimalkan *cost function*. Jenis kendali ini bertujuan mencari nilai *gain state feedback* (K) (Zhou, 1996). Misalkan sebuah *plant* mempunyai bentuk *state space* pada Persamaan (18).

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (18)$$

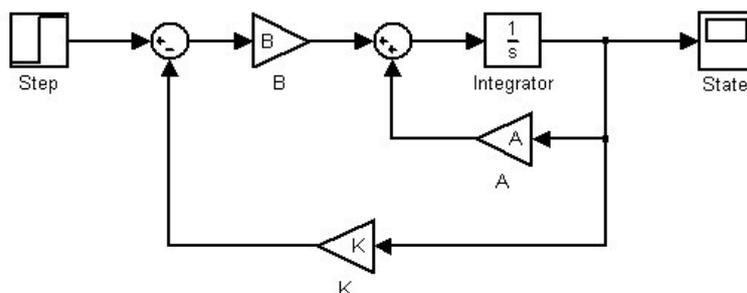
$$y = Cx$$

dengan indeks performansi pada Persamaan (19).

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \{x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)\} dt \quad (19)$$

Dimana Q adalah matriks *positive-definite*, *positive-semidefinite*, atau *real* simetris dan R adalah matriks *positive-definite* atau *real* simetris. Matrik x^* dan u^* merupakan *conjugate transpose* dari matriks x dan u . *Conjugate transpose* (sering juga disebut *adjoint matriks*

atau *hermitian transpose*) dari suatu matriks diperoleh dengan mencari *transpose* Matrix lalu *conjugate complex* dari tiap elemen matriks tersebut dicari. Perlu diperhatikan bahwa bagian kedua disebelah kanan pada persamaan menunjukkan perhitungan energi dari sinyal kendali yang dikeluarkan. Pembobotan matriks Q dan R menentukan kepentingan relatif dari kesalahan dan pengeluaran energi ini. Dalam hal ini, diasumsikan bahwa *vector* kendali $u(t)$ tidak terkendali. Jika diperoleh elemen matriks K yang dapat meminimalkan indeks performa, maka $u(t) = -Kx(t)$ akan optimal untuk setiap *initial state* $x(0)$. Diagram blok untuk konfigurasi LQR ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok LQR

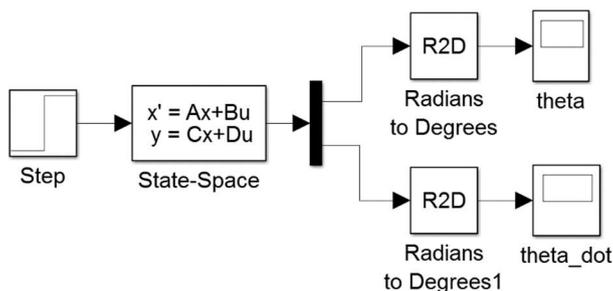
Mencari nilai *gain state feedback* (K) pada Matlab bisa dilakukan dengan sintaks: “[K,S,E]=lqr(A,B,Q,R)”, dengan S adalah solusi persamaan *Riccati* dan E adalah *closed-loop eigenvalue*. Persoalan regulator dapat diselesaikan dengan menyelesaikan persamaan *Riccati* pada Persamaan (20).

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{20}$$

Pemilihan pembobot matriks Q dan R berpedoman pada: semakin besar harga matriks Q, semakin besar harga elemen penguatan K sehingga mempercepat sistem untuk mencapai keadaan tunak (*intermediate state cost function*). Bila nilai R diperbesar, maka nilai penguatan K akan mengecil dan keadaan tunak/*steady (energy drive)* melambat.

3. SIMULASI

Model dari robot IPBD dibangun dengan menggunakan Simulink. Pada model ini, masukan dari model adalah aksi pengendali. Variabel sudut dari iterasi sebelumnya digunakan untuk menghitung percepatan robot dan percepatan sudut dari bandul menggunakan Persamaan (16) dan Persamaan (17) secara berurutan. Integrasi kemudian dilakukan untuk mendapatkan kecepatan dan posisi untuk kedua komponen yang bersangkutan. Sudut dan kecepatan sudut dari bandul serta posisi dan kecepatan sudut dari robot adalah keluaran dari model ini. Berdasarkan Persamaan (17) pemodelan dalam Simulink disajikan pada Gambar 3 dengan menggunakan data parameter dari robot IPBD yang disajikan pada Tabel 1.

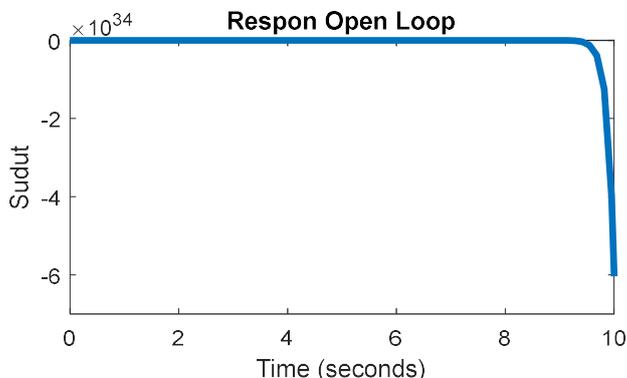


Gambar 3. Model Simulink untuk Sistem Robot IPBD (*Open Loop*)

Tabel 1. Paramerter dari Robot IPBD

Parameter	Deskripsi	Nilai	Satuan
m	Massa dari roda	0.05	kg
M	Massa dari pendulum	0.3	kg
l	Panjang pendulum	0.17	meter
g	Percepatan gravitasi bumi	9.81	m/s ²

Respon *open loop* untuk sistem ini didapat dengan menggunakan model Simulink dan model *state space* pada Persamaan (17). Hasil respon *open loop* disajikan pada Gambar 4 dengan hasil bahwa sistem adalah tidak stabil, karena robot IPBD cepat sekali jatuh menuju horizontal dari posisi tegak vertikalnya. Hal ini juga dapat dilihat pada Tabel 2 untuk posisi *pole* yang dapat dicari dari *eigen value* matriks A pada persamaan *state space* serta memeriksa *rank* matriks *controllability* dan *observability*.



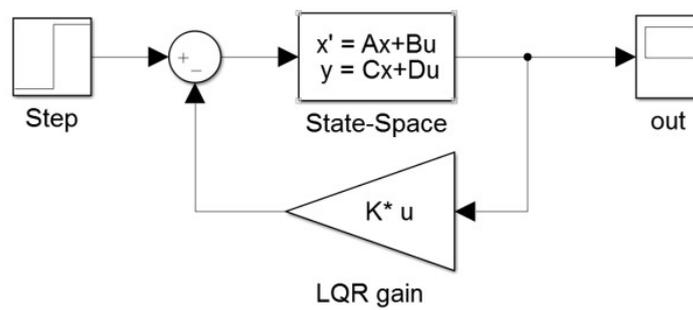
Gambar 4. Respon *Open Loop* dari Model Robot IPBD

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa terdapat sebuah *pole* di bidang sebelah kanan yaitu pada +16.97, yang menandakan sistem *open loop* ini tidak stabil. Oleh karena itu, untuk memindahkan semua *pole* ke bidang kiri dan untuk mempertahankan posisi bandul agar tetap tegak dibutuhkan suatu pengendali. Respon *close loop* untuk sistem ini didapatkan dengan menambahkan suatu pengendali pada sistem *open loop*-nya. Dengan menambahkan *gain* matriks K yang dicari dengan teknik LQR sebagai umpan balik sistem seperti pada Gambar 5, nilai *gain* matriks K dapat dihitung dengan bantuan Matlab, seperti yang disajikan pada Tabel 3.

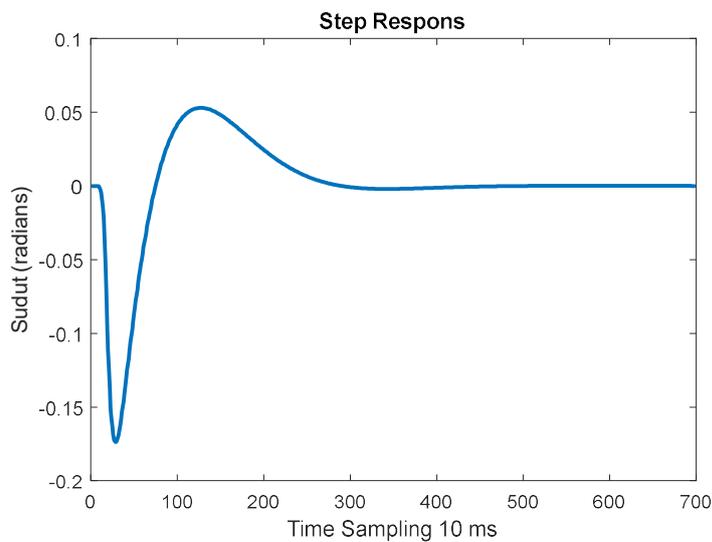
Hasil eksekusi program pada Tabel 3, menunjukkan bahwa matriks P merupakan matriks *positive-definite* dan dapat dicari, maka sistem *closed loop* ini stabil, selain itu dapat dilihat juga bahwa semua *pole* dapat dipindahkan kebidang kiri, seperti yang ditunjukkan pada matriks E. Selanjutnya, respon *close loop* dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil dari umpan balik *gain* K menyebabkan nilai sudut bandul robot IPBD dapat menuju nol. Penambahan pengendali menyebabkan sistem robot IPBD menjadi stabil. Pada hasil simulasi nilai sudut, akan mengalami osilasi pada awalnya, karena kondisi awal sebelum sistem dijalankan nilai sudut kemiringan robot IPBD tidak tepat berada pada nol derajat. Kemudian sistem akan menuju stabil menuju nilai nol (posisi tegak vertikal).

Tabel 2. Model IPBD, Pole, Controllability dan Observability

Model Sistem Robot IPBD	Pole	Controllability (rank)	Observability (rank)
$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(3m+2M)g}{3ml} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{2M}{3m}g & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2}{3ml} \\ 0 \\ \frac{2}{3m} \end{bmatrix}$ $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 288.23 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -39.20 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -78.43 \\ 0 \\ 13.33 \end{bmatrix}$	$p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 16.97 \\ -16.97 \end{bmatrix}$	4	4



Gambar 5. Simulink Model *Inverted Pendulum* dengan *Gain Feedback* K yang Diperoleh dari LQR



Gambar 6. Respon *Close Loop* dari Model Robot IPBD menggunakan LQR

Tabel 3. Pemrograman pada Matlab untuk Mencari *Gain* K Menggunakan LQR

```

%parameter robot IPBD
m=0.05;
M=0.3;
l=0.17;
g=9.8;

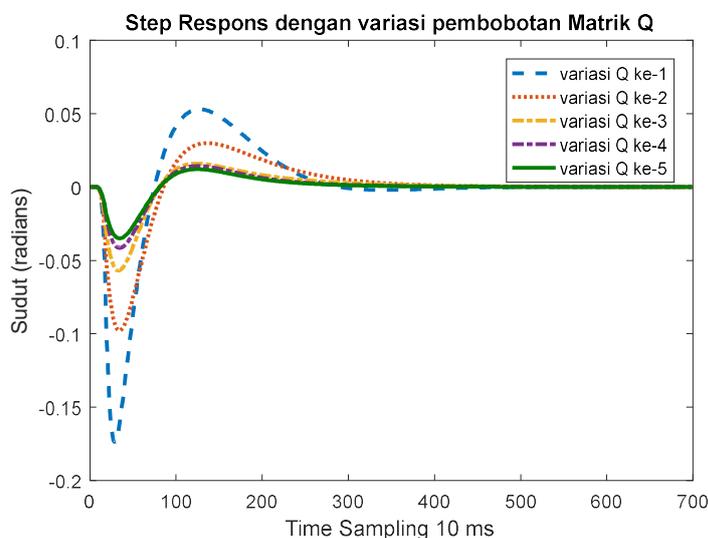
%state space system robot IPBD
A=[0 1 0 0; ((3*m)+(2*M))*g/(3*m*1) 0 0 0; 0 0 0
1; -(2*M*g)/(3*m) 0 0 0;];
B=[0; -2/(3*m*1); 0; 2/(3*m)];
C=[1 0 0 0; 0 0 1 0];
D=[0;0];

%parameter LQR
Q=transpose(C)*C;
R=1;
[K,P,E]=lqr(A,B,Q,R)

K =
-8.6964    -0.6384    -1.0000    -1.0123
P =
2.3235    0.2038    0.6384    0.5464
0.2038    0.0234    0.0999    0.0900
0.6384    0.0999    1.0123    0.5124
0.5464    0.0900    0.5124    0.4536

E =
-17.1313 + 2.3109i
-17.1313 - 2.3109i
-1.1545 + 1.1133i
-1.1545 - 1.1133i
    
```

Untuk tahap paling awal, *tuning* matriks pembobot Q dan R dilakukan dengan memberikan nilai pembobot R=1 dan matriks $Q = C^T * C$, namun semakin besar bobot matriks Q akan mempercepat respon menuju keadaan *steady*. Dengan mengubah-ubah matriks pembobot Q akan diperoleh variasi *gain* K. Berikut nilai variasi pembobotan matriks Q yang dilakukan pada penelitian ini sebanyak lima variasi seperti yang disajikan pada Tabel 4. Gambar 7 menyajikan perbedaan respons *closed loop* sistem dengan variasi pembobotan matriks Q. Grafik respon pada Gambar 7 menunjukkan bahwa parameter pembobotan matriks Q ke-5 menghasilkan *rise time* (tr) yang paling cepat dibandingkan dengan yang lain dan paling kecil mengalami *overshoot*.



Gambar 7. Grafik *Step Respons* dengan Variasi Pembobotan Matriks Q

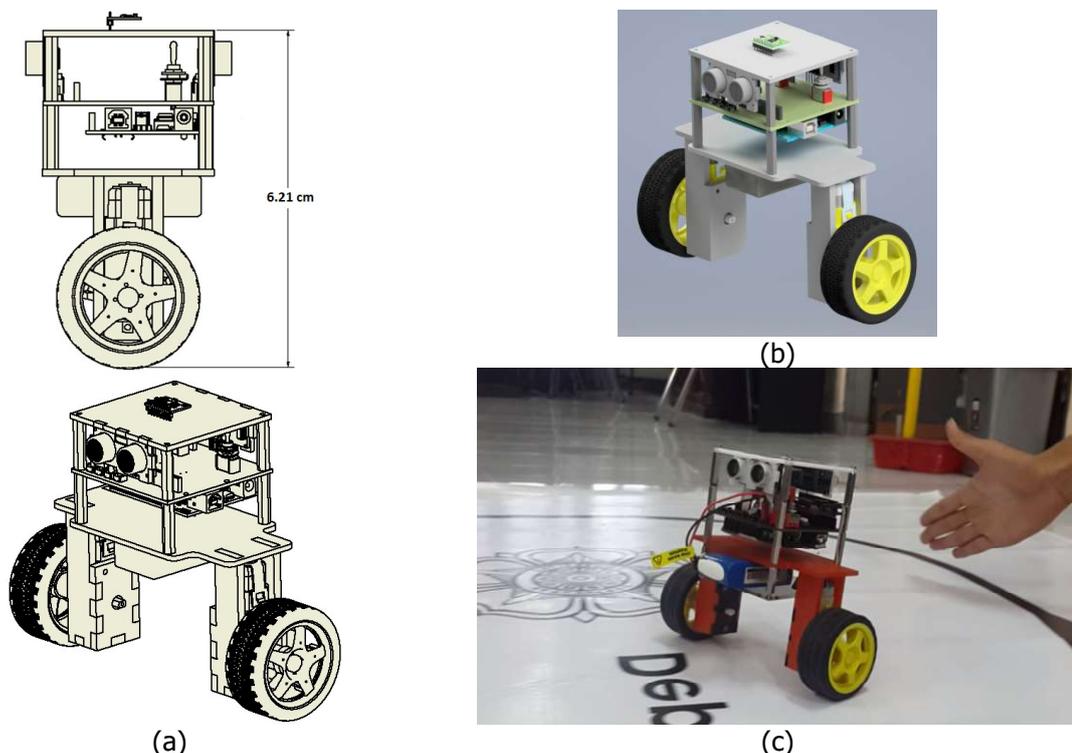
Tabel 4. Parameter Matriks Q dan Hasil Gain K

No.	Parameter matriks pembobot Q	Gain K dengan LQR
1.	$Q = C^T * C$	$K = \begin{bmatrix} -8.6964 \\ -0.6384 \\ -1 \\ -1.0123 \end{bmatrix}$
2.	$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$K = \begin{bmatrix} -11.1413 \\ -1.4140 \\ -1 \\ -1.5886 \end{bmatrix}$
3.	$Q = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$	$K = \begin{bmatrix} -16.0448 \\ -2.4036 \\ -1.7321 \\ -3.0615 \end{bmatrix}$
4.	$Q = \begin{bmatrix} 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix}$	$K = \begin{bmatrix} -20.2733 \\ -3.4555 \\ -2.6458 \\ -3.9953 \end{bmatrix}$
5.	$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$	$K = \begin{bmatrix} -23.2890 \\ -4.1061 \\ -3.1623 \\ -4.7601 \end{bmatrix}$

4. IMPLEMENTASI

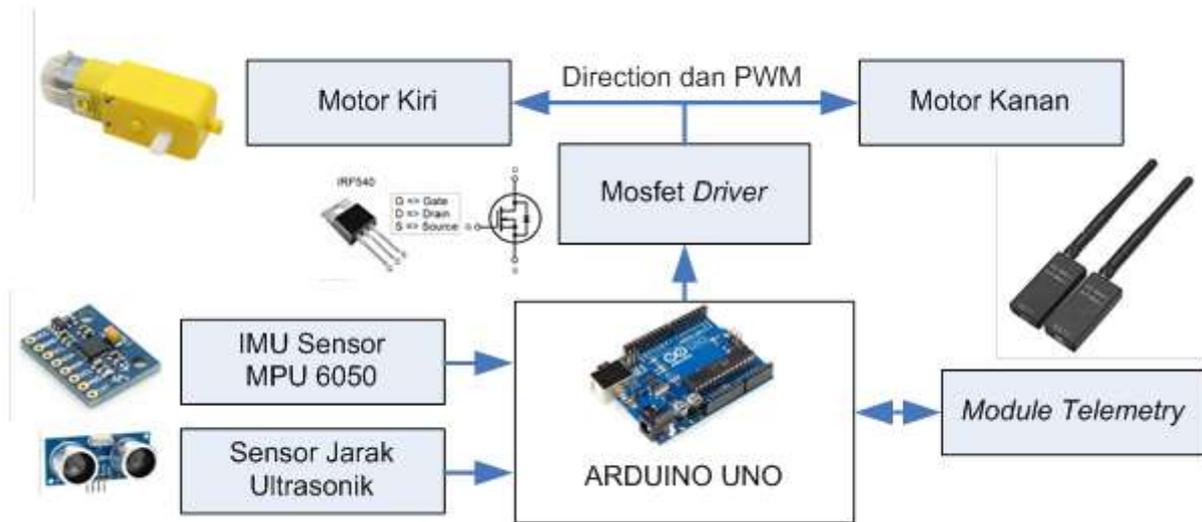
4.1. Perancangan Mekanik dan Elektronik

Rancangan mekanik robot IPBD menggunakan dua buah roda dan desain mekanik robot ini diusahakan dapat seimbang pada titik pusat massa robot. Desain mekanik dan bentuk *real* fisik dari robot IPBD diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. (a)-(b) Desain CAD Robot IPBD. (c) Hasil Desain Robot IPBD

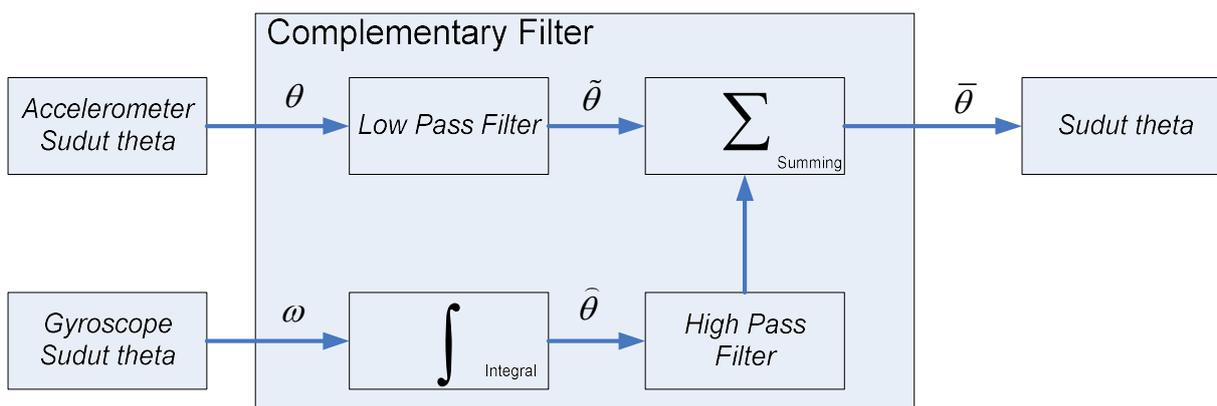
Sistem elektronik robot IPBD menggunakan Arduino Uno sebagai kendali utamanya. Adapun konfigurasi diagram blok sistem elektronika dari robot dijelaskan pada Gambar 9.



Gambar 9. Rangkaian Elektronika dari Robot IPBD

Data kemiringan dari robot ini menggunakan sebuah perangkat sensor IMU. Perangkat ini mampu mengukur dan melaporkan kecepatan, orientasi, dan gaya gravitasi. Pada penelitian ini, robot IPBD menggunakan sensor IMU MPU 6050. Sensor ini memiliki konfigurasi sebagai berikut: memiliki 6 derajat kebebasan, terdiri atas dua konfigurasi *accelerometer* dan *gyroscope* dengan komunikasi protokol data menggunakan *Inter Integrated Circuit* (I2C).

Dalam proses suatu pengukuran dengan IMU sensor, *noise* merupakan gangguan penting yang harus diperhatikan dan ditapis. Oleh karena itu, untuk mendapatkan sinyal sebenarnya yang terpisah dari sekumpulan *noise*, teknik penyaringan (*filtering*) sangat dibutuhkan. Pada penelitian ini, *complementary filter* (CF) digunakan untuk menghilangkan *noise*. Konfigurasi dari CF untuk sudut theta pada sumbu *axis-y* pada pergerakan *pitch* dijelaskan pada Gambar 10.



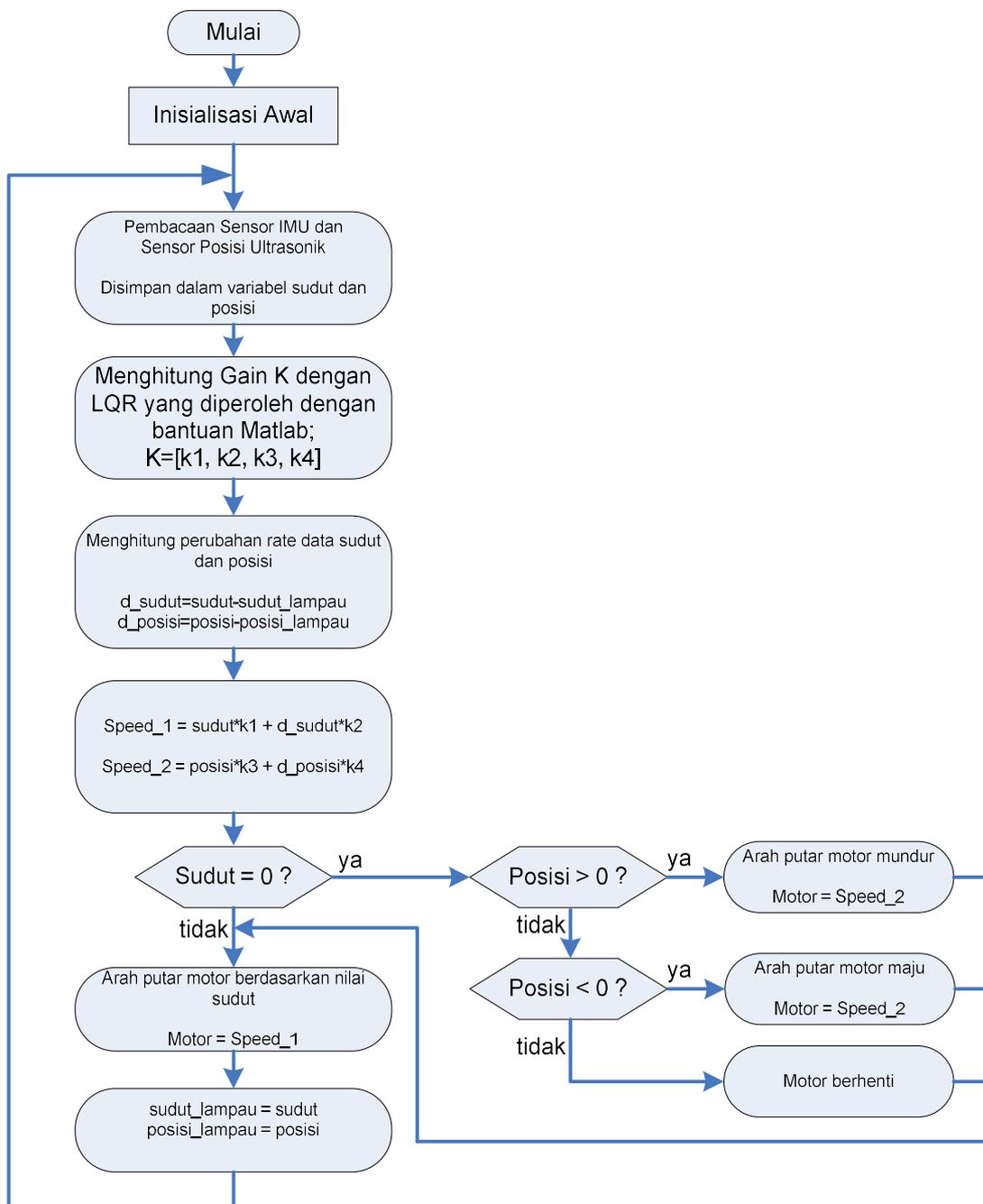
Gambar 10. Blok Diagram *Complementary Filter*

4.2. Perancangan Perangkat Lunak LQR

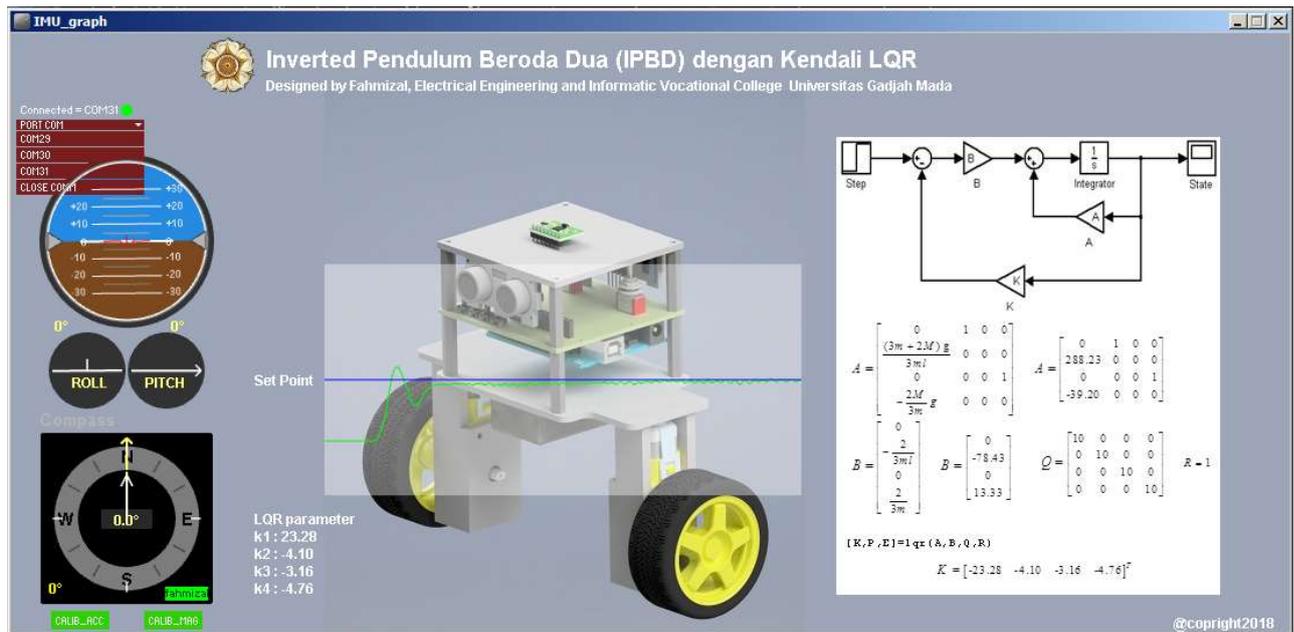
Rancangan perangkat lunak untuk sistem robot IPBD berisi tentang pembacaan sensor kemiringan oleh IMU sensor dan sensor posisi dengan menggunakan sensor ultrasonik. Data-data sensor tersebut dijadikan sebagai masukan untuk diolah dengan menggunakan LQR.

Matriks *gain* K sebagai umpan balik telah diperoleh dari hasil pemodelan sistem IPBD pada Persamaan (17). Berikut ini diagram alir penerapan kendali LQR pada sistem robot IPBD secara keseluruhan yang disajikan pada Gambar 11.

Parameter *gain* K dari hasil simulasi akan diimplementasikan secara *embedded programming* kedalam Arduino Uno pada sistem robot IPBD. Selain itu, untuk memudahkan proses pengamatan respons sistem robot IPBD, telah dikembangkan *Graphical User Interface* (GUI) dengan Processing IDE seperti yang disajikan pada Gambar 12. GUI ini memberikan informasi kondisi kemiringan robot IPBD pada sumbu *axis-y* pada pergerakan *pitch*.



Gambar 11. Diagram Alir Penerapan Kendali LQR pada Sistem Robot IPBD



Gambar 12. Rancangan GUI Robot IPBD

5. KESIMPULAN

Dari hasil pengamatan, pengujian dan analisis, maka dapat ditarik beberapa simpulan. Perangkat keras sistem robot IPBD telah berhasil dibangun dengan baik memanfaatkan dua roda dan dua Motor DC menggunakan Arduino Uno sebagai *embeded system*-nya. Sensor IMU MPU6050 dan sensor jarak digunakan sebagai kondisi masukan *state* berupa sensor sudut kemiringan dan sensor posisi. Kendali LQR digunakan untuk menentukan nilai *gain* K dalam sistem *closed loop* dengan mempertimbangkan energi yang optimal yang digunakan untuk memindah *pole* pada bidang sebelah kanan (daerah tidak stabil) menuju bidang sebelah kiri (daerah stabil). Dari hasil pengujian diperoleh bahwa dengan membesarkan pembobotan matriks Q menghasilkan respon menuju keadaan *steady* lebih cepat dan mengurangi *overshoot*. Langkah lanjutan pada penelitian ini ialah menambahkan kendali cerdas buatan seperti algoritma genetika yang dapat digunakan untuk *tuning* parameter matriks Q.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro dan Informatika Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada atas dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

DAFTAR RUJUKAN

- Fasola, J., & Matarić, M. J. (2013). A socially assistive robot exercise coach for the elderly. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2(2), 3-32.
- Song, G., Yin, K., Zhou, Y., & Cheng, X. (2009). A surveillance robot with hopping capabilities for home security. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(4).

- Nagatani, K., Kiribayashi, S., Okada, Y., Tadokoro, S., Nishimura, T., Yoshida, T., ... & Hada, Y. (2011, November). Redesign of rescue mobile robot Quince. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on* (pp. 13-18). IEEE.
- Kim, K., Bae, S., & Huh, K. (2010, October). Intelligent surveillance and security robot systems. In *2010 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts* (pp. 70-73). IEEE.
- Zhang, H., Zhang, J., Zong, G., Wang, W., & Liu, R. (2006). Sky cleaner 3: A real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *13*(1), 32-41.
- Kuo, C. H., Zal, F., & Wu, S. L. (2016). Development of Fuzzy Logic Controllers for Controlling Bipedal Robot Locomotion on Uneven Terrains with IMU Feedbacks. *Indian Journal of Science and Technology*, *9*(28).
- Mayub, A., & Fahmizal, F. (2018). Center of Pressure Feedback for Controlling the Walking Stability Bipedal Robots using Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, *8*(6).
- Pratama, D., Binugroho, E. H., & Ardilla, F. (2015, September). Movement control of two wheels balancing robot using cascaded PID controller. In *Electronics Symposium (IES), 2015 International* (pp. 94-99). IEEE.
- Bobby, G., Susanto, E., & Suratman, F. Y. (2015). Implementasi Robot Keseimbangan Beroda Dua Berbasis Mikrokontroler. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, *3*(2), 142.
- Fahmizal, F., Arrofiq, M., & Mayub, A. (2017). Logika Fuzzy pada Robot Inverted Pendulum Beroda Dua. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, *4*(4), 244-252.
- Huang, J., Guan, Z. H., Matsuno, T., Fukuda, T., & Sekiyama, K. (2010). Sliding-mode velocity control of mobile-wheeled inverted-pendulum systems. *IEEE Transactions on robotics*, *26*(4), 750-758.
- Tewari, A. (2002). Modern control design. NY: John Wiley & sons, 283-308.
- Zhou, K., Doyle, J. C., & Glover, K. (1996). *Robust and optimal control* (Vol. 40, p. 146). New Jersey: Prentice hall.