

Research Article

Pemodelan dan Simulasi *Mobile Robot - 3 Trailers* dengan Kendali PID

Enda Wista Sinuraya

Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstract

The mobile robot and trailer model presents a classic challenge in the field of control theory. Trailers, on the other hand, have been developed and widely used in the industry. The main focus of industrial design is set on reducing tracking error from a reference trajectory. We develop a design theory of trailer systems with passive steering and the steering wheel's angle $-15 < \theta < 15$. From simulation result, The mobile robot with proportional controller shows good result in following the required trajectory.

Keyword : mobile robot and trailer, trajectory, passive steering, proportional controller

Posisi dan orientasi *mobile robot* pada sistem sumbu koordinat dipengaruhi oleh 3 variabel. Pertama adalah Posisi X dan Y yang menunjukkan letak titik tengah poros roda belakang. Kedua adalah θ yang menunjukkan besar sudut *mobile robot* terhadap sumbu X. Dan yang ketiga adalah ϕ menunjukkan besar sudut kemudi *mobile robot*.

Salah satu jenis pengendali yang paling populer dan telah lama digunakan adalah pengendali *Proportional Integrator Differentiator* (PID). Pengendali PID merupakan pengendali konvensional tetapi masih sangat banyak dijumpai pada dunia industri dan bidang-bidang kendali yang lain. Keuntungan pengendali PID sehingga jenis pengendali ini masih dapat bertahan sampai saat ini adalah proses perancangan dan realisasi pengendali ini tidak terlalu sukar sehingga implementasinya masih dapat berkembang. Namun kerugian dari pengendali PID ini adalah pengendali ini kurang cocok dipakai untuk sistem yang memerlukan keakuratan yang tinggi seperti pada sistem kendali posisi.

Pada simulasi *mobile robot* ini, pengendali yang digunakan adalah pengendali *Proportional*.

Tanggapan Waktu Sistem Orde – 1

Hubungan masukan-keluaran sistem orde pertama diberikan oleh:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (1)$$



Gambar 1 Diagram Balok Sistem Orde Pertama

Untuk masukan $R(s)$ berupa masukan input step persamaan (2.2) menjadi:

$$C(s) = \frac{1}{Ts+1} \cdot \frac{1}{s}$$

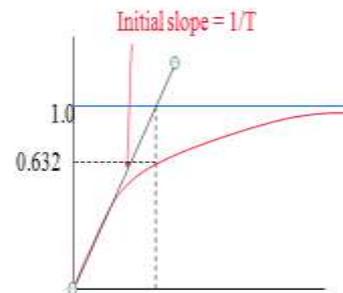
$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts+1}$$

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}}$$

Persamaan di atas apabila di-invers transformasi Laplace-kan menjadi:

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$

Variabel t pada persamaan (2) merupakan konstanta waktu dari suatu sistem orde 1. Konstanta ini merupakan waktu yang dibutuhkan oleh eksponensial $e^{-\frac{t}{T}}$ untuk mencapai 37 % dari *initial value* atau sistem mencapai 63% dari *final value* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4



Gambar 2 Kurva Respons Eksponensial

Pengendali *Proportional Integrator Differentiator*

Di dalam suatu sistem kendali dikenal adanya beberapa macam aksi kendali, diantaranya yaitu aksi kendali *proporsional*, aksi kendali *integral* dan aksi kendali *derivatif*. Kendali *proporsional*, *integral* dan *derivatif* merupakan gabungan dari 2 buah teknik perancangan pengendali yang dimaksudkan untuk meningkatkan galak tunak dan tanggapan *transient* dari suatu sistem secara independent.

Perhitungan pengendali PID menyangkut tiga buah parameter yang terpisah yaitu : nilai *Proportional*, *Integral* dan *Derivative*. Nilai *proportional* menentukan reaksi sistem terhadap kesalahan saat ini, nilai *integral* menentukan reaksi sistem yang didasarkan pada jumlah kesalahan-kesalahan saat ini sedangkan nilai *derivative* menentukan reaksi sistem terhadap kecepatan perubahan kesalahan. Jumlah berbobot dari ketiga aksi ini digunakan untuk menyesuaikan proses sistem melalui elemen pengendali.

Masing-masing nilai *Proportional*, *Integral* dan *Derivative* memiliki parameter tertentu yang harus diset untuk dapat beroperasi dengan baik, yang disebut sebagai konstanta. Setiap jenis memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, hal ini terlihat pada tabel 1 di bawah ini :

Parameter	Rise Time	Overshoot	Settling Time	S.S. Error
K_p	Menurun	Meningkat	Sedikit perubahan	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Dihilangkan
K_d	Sedikit perubahan	Menurun	Menurun	Tidak ada

Tabel 1 Respon kendali PID terhadap perubahan konstanta

Parameter-parameter tersebut tidak bersifat independent sehingga pada saat salah satu nilai konstantanya diubah, maka mungkin sistem tidak akan bereaksi seperti yang diinginkan. Tabel 1 di atas hanya dipergunakan sebagai pedoman jika akan melakukan perubahan konstanta. Untuk merancang suatu kendali PID, biasanya dipergunakan metode trial & error sehingga perancang harus mencoba kombinasi pengatur beserta konstantanya untuk mendapatkan hasil terbaik yang paling sederhana.

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kendali PID dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kendali *proporsional, integral, dan derivatif* (kendali PID). Elemen-elemen kendali PID masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan offset dan menghasilkan perubahan awal yang besar.

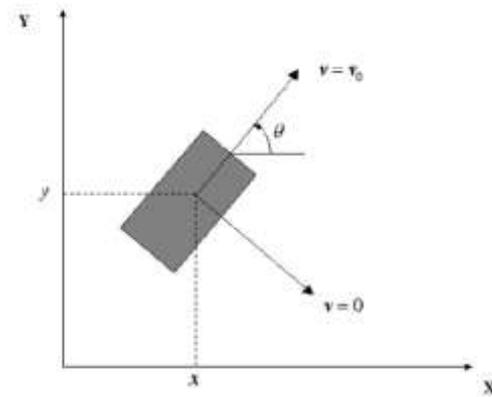
Parameter-parameter *tuning* dari pengendali PID antara lain :

- K_p : *Proportional Gain* : Nilai K_p yang besar menunjukkan tanggapan sistem yang semakin cepat karena peningkatan nilai kesalahan, peningkatan nilai umpan balik untuk dikompensasi. Nilai K_p yang terlalu besar dapat menyebabkan ketidakstabilan proses.
- K_i : *Integral Gain* : Nilai K_i yang besar menunjukkan bahwa galak tunak akan dieleminasi lebih cepat. Akibatnya adalah besarnya nilai *overshoot*, beberapa kesalahan negatif yang terintegrasi selama tanggapan *transient* sistem harus diintegrasikan kembali oleh kesalahan positif sebelum tercapainya keadaan tunak.
- K_d : *Derivative Gain* : Nilai K_d yang besar akan menurunkan *overshoot* tetapi akan memperlambat tanggapan *transient* sistem dan dapat membawa ketidakstabilan sistem.

Model Kinematik Mobile Robot

Salah satu contoh robot aplikasi yang memiliki struktur kinematik *nonholonomic* adalah mobile robot. Mobile robot didefinisikan bergerak dalam kawasan 2D. Kontur medan yang tidak rata tidak dimasukkan sebagai unsur Z (sumbu tegak lurus) karena navigasi (gerak robot) tetap bisa diasumsikan bergerak dalam kawasan sumbu XY saja.

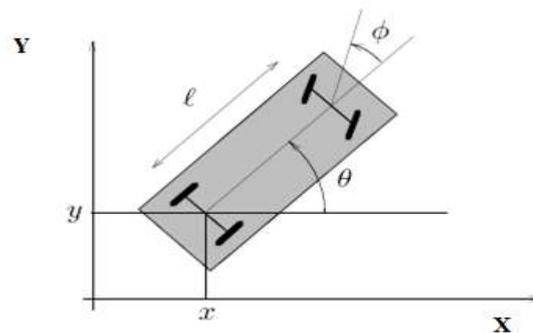
Model yang digunakan dalam tulisan ini adalah model kinematik, oleh sebab itu unsur-unsur dinamik mobile robot seperti berat, gesekan, gravitasi, *slip*, gaya *centrifugal* tidak digunakan dalam pemodel sistem.



Gambar 3 Navigasi kemudi mobile robot dalam kawasan 2D.

Gambar 3 menggambarkan *nonholonomic constraints* dari navigasi kemudi mobile robot. Dapat dilihat bahwa tidak ada pergerakan mobile robot pada arah sumbu tegak lurus.

Posisi dan orientasi mobile robot pada sistem sumbu koordinat dipengaruhi oleh 3 variabel. Gambar 3 menunjukkan komponen-komponen variabel tersebut. Pertama adalah Posisi X dan Y yang menunjukkan letak titik tengah poros roda belakang. Kedua adalah θ yang menunjukkan besar sudut mobile robot terhadap sumbu X. Dan yang ketiga adalah ϕ menunjukkan besar sudut kemudi mobile robot.



Gambar 4 Koordinat sistem mobile robot

Dari gambar 4 dapat dilihat bahwa kecepatan mobile robot terhadap sumbu X dan sumbu Y dirumuskan sebagai berikut:

$$\dot{x} = v \cos \theta \tag{3}$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \tag{4}$$

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \tag{5}$$

Dimana v adalah kecepatan linier mobile robot. \dot{x} adalah kecepatan linier mobile robot terhadap sumbu X dan \dot{y} adalah kecepatan linier mobile robot terhadap sumbu Y.

Posisi tengah poros roda depan mobile robot dirumuskan sebagai berikut:

$$x_f = x + l \cos \theta \tag{6}$$

$$y_f = y + l \sin \theta \tag{7}$$

Dimana x dan y adalah posisi tengah poros roda belakang mobile robot.

Kecepatan poros roda depan diturunkan dari posisi poros roda depan pada persamaan (6) dan persamaan (7), sehingga dapat dirumuskan menjadi:

$$\dot{x}_f = \dot{x} - \dot{\theta} l \sin \theta \tag{8}$$

$$\dot{y}_f = \dot{y} + \dot{\theta} l \cos \theta \tag{9}$$

Nonholonomic constraints untuk poros roda depan dan poros roda belakang adalah:

$$\dot{x}_f \sin(\theta + \phi) - \dot{y}_f \cos(\theta + \phi) = 0$$

0 Frontwheel

(10)

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \text{ (rear wheel)} \quad (11)$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) ke persamaan (10) menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{\theta} = \frac{v}{l} \tan \phi \quad (12)$$

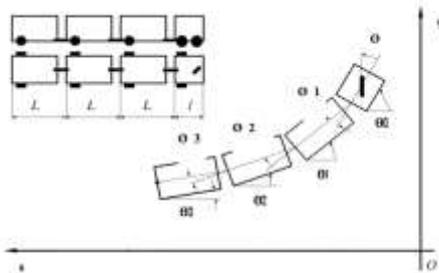
Dari persamaan (12) masukan sudut kemudi (ϕ) mempunyai nilai yang tidak linear. Jika sudut kemudi (ϕ) 90 derajat, nilai θ menjadi tidak terhingga. Fenomena ini disebut *jack-knife*.

Dari hasil simulasi perubahan sudut kemudi (ϕ) mobile robot sangat kecil terhadap fungsi waktu. Sehingga persamaan (12) dapat dirumuskan menjadi:

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \phi \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{l} \phi \end{aligned} \quad (13)$$

Model Kinematik mobile robot-3 Trailers

Jenis *trailer* yang digunakan dalam simulasi adalah jenis pasif, ini berarti *trailer* tidak dapat dikendalikan secara *independent*. Oleh sebab itu, untuk mengendalikan pergerakan trailer hanya dapat dilakukan dengan mengendalikan pergerakan mobile robot.



Gambar 5 Mobile Robot-3 Trailer

Gambar 5 menunjukkan sistem mobile robot dengan 3 buah trailer bergandengan yang bersifat pasif dimana:

- l : Panjang mobile robot
- L : Panjang mobile robot
- ϕ : Sudut kemudi mobile robot (rad)
- θ_0 : Sudut mobile robot terhadap sumbu X
- ϕ_1 : Selisih sudut mobile robot dengan trailer1
- θ_1 : Sudut trailer 1 terhadap sumbu X
- ϕ_2 : Selisih sudut trailer 1 dan trailer 2
- θ_2 : Sudut trailer 2 terhadap sumbu X
- ϕ_3 : Selisih sudut trailer 2 dan trailer 3
- θ_3 : Sudut trailer 3 terhadap sumbu X

Posisi X dan Y masing-masing *trailer* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$x_i = x_{i-1} - l_i \cos \theta_i \quad (14)$$

$$y_i = y_{i-1} - l_i \sin \theta_i \quad (15)$$

Dari persamaan (12) dapat dirumuskan besar sudut masing-masing trailer terhadap sumbu X sebagai berikut:

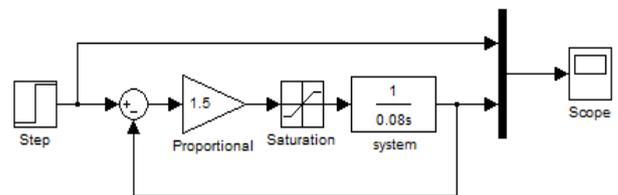
$$\dot{\theta}_{i+1} = \frac{v_{i+1}}{l_{i+1}} \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (16)$$

Uji Coba dan Analisa

Dari persamaan (13) sistem *mobile robot* merupakan sistem orde satu. Pada uji coba ini pengendalian sistem menggunakan kendali *proportional*. Sudut kemudi *mobile robot* dibatasi antara 0° sampai 15°. Pengendali *proportional* digunakan untuk mengendalikan *mobile robot*. Sedangkan trailer tidak dapat dikendalikan karena bersifat pasif. *Trajectory mobile robot* yang dirancang mempunyai pergerakan ke arah sumbu X yang konstan terhadap fungsi waktu. Dalam simulasi ini, *Mobile robot* bergandengan dengan 3 buah trailer. Hasil akhir simulasi yang hendak dicapai adalah kesalahan minimum (θ_p) sudut mobile robot dan trailer dengan sudut trajectory. Kemudian kesalahan minimum (*error*) posisi *mobile robot* dan masing-masing trailer dengan trajectory.

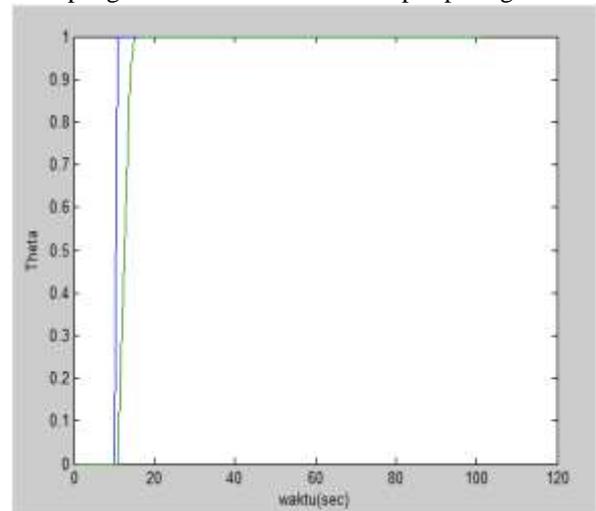
Kendali Proportional Mobile Robot

Simulasi kendali *mobile robot* dengan program simulasi dapat digambarkan seperti gambar (6).



Gambar 6 Simulasi Mobile Robot

Sistem *mobile robot* adalah orde satu. Dari hasil simulasi penguatan 1.5 dan masukan step seperti gambar 6.

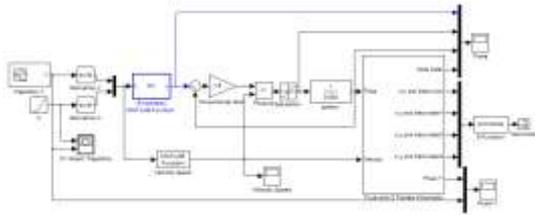


Gambar 7 Step Respon Sistem Mobile Robot

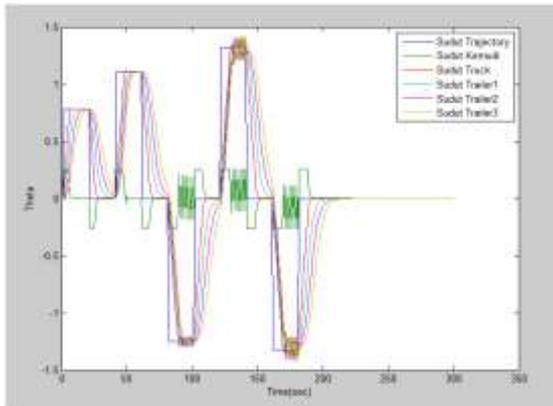
Dari gambar 7 diperoleh nilai delay time sebesar 0.1 detik dan nilai konstanta waktu sistem *mobile robot* 0.29 detik.

Implementasi Kendali Proportional pada mobile robot-3 trailers

Kendali *proportional* yang telah dirancang diterapkan pada sistem *mobile robot-3 Trailers* dengan lintasan yang memiliki sudut yang bervariasi dapat dilihat pada gambar 8 dibawah ini.

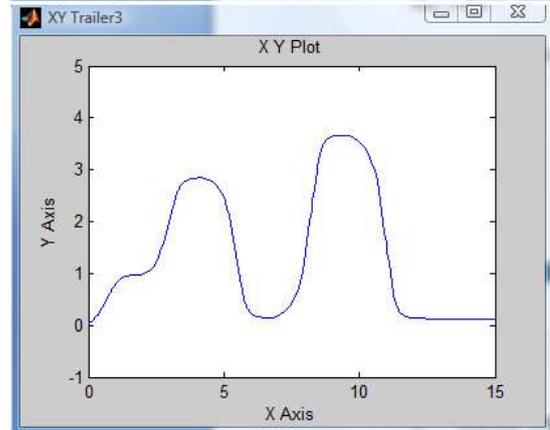
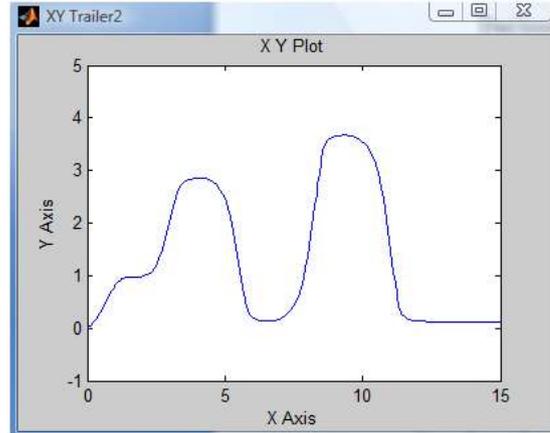
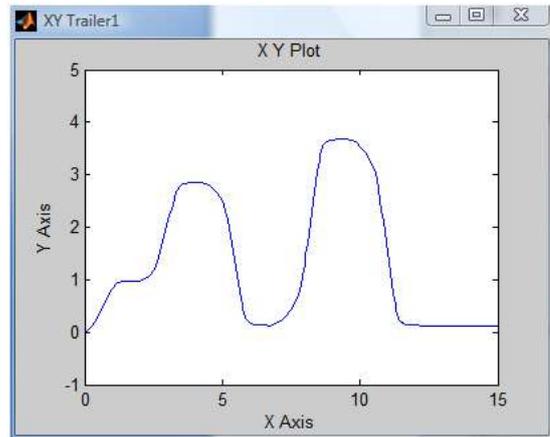
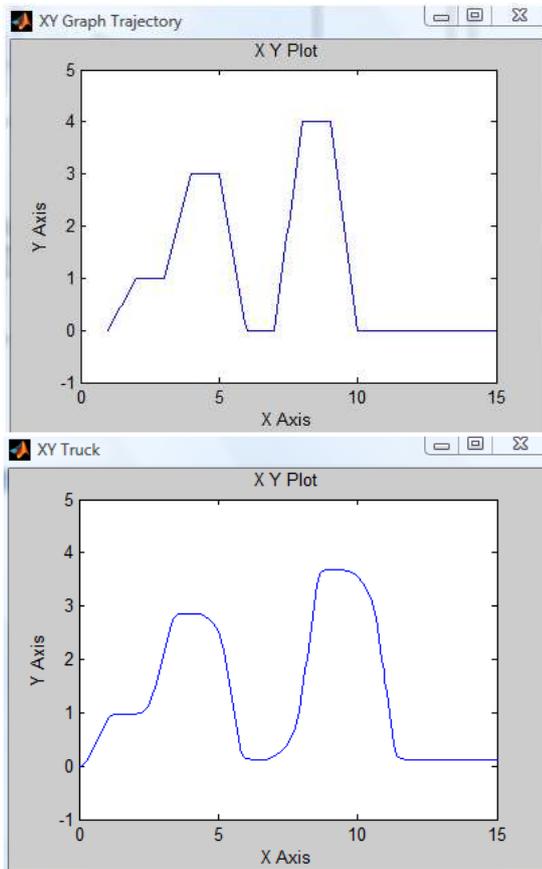


Gambar 8 Simulasi Mobile Robot-3 Trailers



Gambar 9 Sudut Simulasi Mobile Robot-3 Trailers

Dari hasil simulasi sudut kemudi beresilasi ketika sudut putar *mobile robot* lebih besar dari 45° . Hal ini disebabkan oleh karena adanya pembatasan sudut kemudi *mobile robot*. Untuk lintasan dengan sudut yang lebih besar membuat konstanta waktu sistem menjadi lebih lambat.



Gambar 10 Posisi XY Simulasi Mobile Robot-3 Trailers

Gambar 10 menunjukkan grafik posisi *Mobile Robot-3 Trailers*. Kesalahan posisi yang terbesar terhadap *trajectory* dialami oleh Trailer3.

Kesimpulan

1. Sistem *mobile robot* dapat dilinierisasi menjadi fungsi alih orde 1
2. Karena fungsi alih sistem mobil robot merupakan sistem orde 1, pengendali proportional sudah dapat mengendalikan sistem.
3. Pembatasan sudut kemudi *mobile robot* membuat tanggapan transien sistem menjadi lambat.

Saran

Agar dapat diterapkan pada sistem yang sebenarnya, model kinematik harus digabung dengan unsur-unsur dinamik *mobile robot* seperti berat, gesekan, gravitasi, slip.

Daftar Pustaka

- J. Laumond., *Robot Motion Planning and Control*, Springer, 1998.
- Ogata, Katsuhito., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall.2002
- Nise, Norman S., *Control System Engineering*. John Wiley & Sons. 2003.
- G.Oriolo., *Mobile Robotics: Control Problems*.2002
- Pitowarno, Endra., *Robotika*.ANDI Yokyakarta.2006.
- Palmer, Ed., *Introduction to Control System*. School of Electrical & Elektronik System Engineering.
- Wahab, Wahidin., *Diktat Kuliah Dasar Sistem Kendali*. Elektro FTUI, 2001
- Ogata, K. *Solving Control Engineering Problems with MATLAB*, Prentice-Hall.1994
- M. Thoma. M. Morari. *Robot Motion and Control*. Springer. 2006