

PENGATURAN ANTI SWING PADA GANTRY CRANE DENGAN MENGGUNAKAN *PID-SLIDING MODE CONTROL*

Ismail Rokhim, Mochammad Rameli, Ali Fathoni

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Keputih Sukolilo, Surabaya -60111

Phone : 031-5994251

Email: ismailrokhim@yahoo.com, mrameli@indo.net.id, fatoni@ee.its.ac.id

Abstrak

Gantry crane banyak digunakan di industri atau pelabuhan untuk keperluan handling muatan. Efisiensi handling muatan dilakukan melalui pengaturan posisi trolley sehingga beban dapat dipindahkan secara cepat dengan ayunan beban yang minimal. Diperlukan dua controller untuk mengatasi permasalahan sistem, yaitu controller anti-swing untuk mereduksi sudut ayunan beban dan controller tracking untuk memandu pergerakan trolley. Dalam paper ini dipilih skema PID-sliding mode control (SMC) karena memiliki karakteristik robust dan sederhana dalam algoritmanya sehingga mudah untuk diimplementasikan pada plant riil. Beberapa metode dibandingkan untuk mengetahui performansi sistem. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa metode PID-SMC memberikan maksimum overshoot paling kecil dalam mengatasi ayunan beban dibanding metode pengaturan PID maupun SMC.

Kata Kunci: *gantry crane, PID, sliding mode control, PIDSMC, anti-swing, tracking.*

1. Pendahuluan

Gantry crane secara luas dipakai di industri, pelabuhan, galangan kapal, instalasi nuklir, maupun pada konstruksi bangunan tinggi untuk memindahkan barang yang berukuran besar, sangat berat dan berbahaya. *Gantry crane* dilengkapi dengan *trolley* yang membawa barang dalam bidang horisontal. Beban dihubungkan ke *trolley* melalui tali/kawat dengan panjang tali bisa diatur melalui mekanisme derek [3].

Siklus kerja crane dibagi menjadi 5 tahap, yaitu mencekam beban (*gripping*), mengangkat beban (*lifting*), memindahkan beban dari satu titik ke titik yang lain (*moving*), menurunkan beban (*lowering*), dan melepaskan beban (*ungridding*) [9]. *Moving* adalah tahapan yang memerlukan waktu paling lama dari siklus kerja crane, umumnya pada proses *moving* ini dilakukan pada kecepatan konstan. Ketika proses *moving*, terjadi ayunan beban seperti gerakan pendulum karena beban tergantung bebas dan ada percepatan atau perlambatan gerak. Ayunan beban saat pengoperasian crane harus dihilangkan untuk mempercepat proses pemindahan beban dan menghindari terjadinya kecelakaan. Umumnya crane dioperasikan secara manual oleh seorang operator yang memiliki *skill* yang tinggi untuk mengantisipasi timbulnya

ayunan. Operator mengatur pergerakan crane secara hati-hati dan operator lain mengamati proses pemindahan barang, karenanya hal ini dipandang tidak efisien.

Problem ayunan pada sistem crane telah mengundang perhatian banyak peneliti untuk dicarikan solusinya. Strategi pengaturan sistem crane dikelompokkan menjadi dua pendekatan [6]. Pertama, operator dilibatkan dalam lup dan dinamika beban yang diubah sedemikian hingga pekerjaan operator menjadi lebih mudah, caranya dengan menambahkan redaman, filter, delay, dsb. Kedua, operator tidak dilibatkan dalam lup dan operasi crane dilakukan secara otomatis. Pendekatan ini dilakukan dengan banyak metode atau teknik. Teknik pertama didasarkan pada pembangkitan trayektori untuk memindahkan beban ke titik tujuan dengan minimum *swing*. Trayektori-trayektori ini ditentukan baik melalui teknik kontrol optimal maupun teknik *input shaping*. Teknik kedua didasarkan pada umpan balik posisi dan sudut ayunan. Teknik ketiga didasarkan pada pembagian problem desain controller, yang terbagi menjadi dua bagian : controller *anti-swing* dan controller *tracking*. Masing-masing dirancang secara terpisah kemudian digabungkan untuk mendapatkan performansi dan kestabilan sistem yang diinginkan secara keseluruhan.

Dalam paper ini dibahas skema pengaturan *PID-Sliding Mode Control* yang memiliki karakteristik *robust* dan *simple* dalam algoritmanya. Kontroller dibagi menjadi dua bagian, kontroller *PID* digunakan untuk *tracking* dan *PID-SMC* untuk *anti-swing*.

Paper ini dibahas dengan susunan sebagai berikut. Model sistem dan metode pengaturan dibahas pada seksi 2, hasil desain dan simulasi dibahas pada seksi 3 dan kesimpulan pada seksi 4.

2. Model Sistem dan Metode Pengaturan

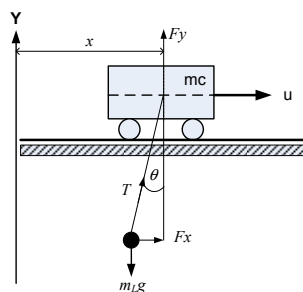
2.1. Model Sistem

Model skematik sistem *gantry crane* diilustrasikan oleh Gambar 1. Sistem dilengkapi dengan sebuah *trolley* dengan massa m_c . *Trolley* digerakkan oleh sebuah motor dc sejauh x terhadap sumbu referensi Y dengan sinyal kontrol u . Karena konstanta waktu motor lebih kecil dibanding konstanta waktu sistem mekanik *crane*, maka gaya yang ditimbulkan oleh motor dc dapat dipandang sebagai *gain* dan dapat dinyatakan sebagai,

$$u = K_m E_a \tag{1}$$

Dimana E_a adalah tegangan motor dc.

Trolley ini akan memindahkan sebuah beban dengan massa m_L yang terikat dengan tali pada ujungnya. Sudut ayunan beban yang terjadi pada *trolley* dinyatakan dengan θ .



Gambar 1: Model Skematik Sistem Gantry Crane.

Dengan menggunakan hukum Newton kedua, didapatkan persamaan *gantry crane* sebagai berikut [3],

$$(m_L + m_c) \ddot{x}_1 + m_L l (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) = u \tag{2}$$

$$m_L \ddot{x}_1 \cos \theta + m_L l \ddot{\theta} = -m_L g \sin \theta \tag{3}$$

$$\ddot{x}_1 \cos \theta + l \ddot{\theta} = -g \sin \theta \tag{4}$$

Dengan memandang sudut ayunan beban sangat kecil, maka dapat diasumsikan :

$$\cos \theta \cong 1; \sin \theta \cong \theta; \sin^2 \theta \cong 0; \dot{\theta}^2 \cong 0 \tag{5}$$

Dengan mendefinisikan variabel *state* sebagai :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{posisi trolley} \\ \text{kecepatan trolley} \\ \text{sudut ayunan} \\ \text{kecepatan sudut ayunan} \end{bmatrix}$$

maka dapat ditulis persamaan *state*-nya :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_L}{m_c} g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{m_L + m_c}{l m_c} g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_c} \\ 0 \\ -\frac{1}{l m_c} \end{bmatrix} u \tag{6}$$

dan keluarannya,

$$y = [x_1 \quad x_3] \tag{7}$$

2.2. Sliding Mode Controller

Sliding mode control merupakan jenis khusus dari kontrol *on-off* yang menerapkan *high-speed switching feedback control* untuk sistem *non linier*. Kelebihan kontroller ini adalah kemampuan aksi kontrolnya untuk mengarahkan sistem menuju *sliding surface* (*sliding phase*) ketika sistemnya menyimpang dari nilai yang diinginkan. Secara umum, gerakan *sliding* dibagi menjadi dua fase, yaitu *reaching phase* dan *sliding phase*. Pada *sliding phase*, sistem *robust* terhadap gangguan, namun pada *reaching phase* sistem masih sensitif terhadap perubahan parameter dan gangguan eksternal.

Untuk menentukan kontroller yang menjamin sistem pada $S(x) = 0$, digunakan fungsi Lyapunov,

$$V(x) = \frac{S^2(x)}{2} \tag{8}$$

Dimana $S(x)$ merupakan *switching surface* sistem. Kontroller dirancang sedemikian rupa sehingga,

$$\dot{V}(x) < 0 \tag{9}$$

untuk semua t. Dengan demikian respon sistem dijamin menuju *switching surface*. Sinyal kontrol pada struktur *sliding mode* tersusun atas dua bagian, yaitu kontrol ekivalen (u_1) dan kontrol diskontinyu (u_2) yang mempunyai karakteristik *robust*, dituliskan sebagai,

$$u = u_e + u_s \tag{10}$$

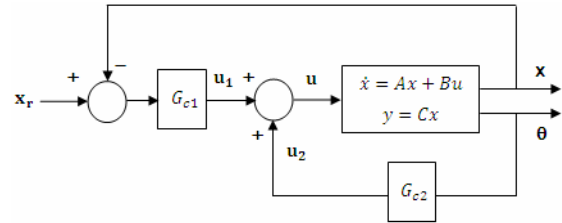
dimana $u_1 s = -k \cdot \text{sat}(S, \Delta)$ dan Δ adalah konstanta yang menyatakan ketebalan dari *boundary layer*. $\text{sat}(S, \Delta)$ adalah fungsi saturasi yang didefinisikan sebagai,

$$\text{sat}(S, \Delta) = \begin{cases} S/\Delta & |S| \leq \Delta \\ \Delta/S & S > \Delta \\ -\Delta/S & S < -\Delta \end{cases} \tag{11}$$

Pada mode *sliding* $S \equiv 0$ dan $\dot{S} = 0$.

2.3. Desain Kontroller

Metode yang digunakan dalam perancangan kontroller sistem gantry crane ini adalah membagi kontroller menjadi dua bagian, yaitu kontroller *anti-swing* dan kontroller *tracking*. Jenis kontroller yang digunakan pada bagian tracking adalah kontroller *Proportional-Derivatif*, sedangkan pada bagian *anti-swing* digunakan *Sliding Mode Controller* (SMC). Masing-masing kontroller dirancang secara terpisah kemudian digabungkan untuk mendapatkan performansi yang diinginkan. Diagram blok sistem pengaturan *gantry crane* ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2: Diagram blok sistem.

2.3.1 Kontroller Tracking

Sinyal kontrol yang dihasilkan dari kontroller *proportional-derivatif* pada bagian *tracking* adalah :

$$u_1 = (K_p + K_d s)(x_r - x_1) \tag{12}$$

Nilai K_p dan K_d dipilih sedemikian hingga dicapai *tracking* trayektori tanpa menimbulkan *overshoot* (memiliki respon *critically damped*).

2.3.2 Kontroller Anti-Swing

- Tiga tahap yang dilakukan dalam merancang *sliding mode controller* adalah :
- Menentukan *sliding surface* dalam *state-space*.
 - Merancang kontroller untuk mencapai *sliding surface* dalam waktu tertentu (*finite time*).
 - Merancang *controller law* untuk menjamin bahwa variabel *state* tetap berada pada *sliding surface*.

Dari persamaan (6), persamaan *state* yang mempengaruhi sudut ayunan beban dapat disusun sebagai berikut :

$$\dot{x}_3 = x_4 \tag{13}$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{x}_3 = - \left[\frac{m_L + m_C}{l \cdot m_C} \cdot g \right] x_3 - \frac{1}{l \cdot m_C} u \tag{14}$$

Dan persamaan keluarannya,

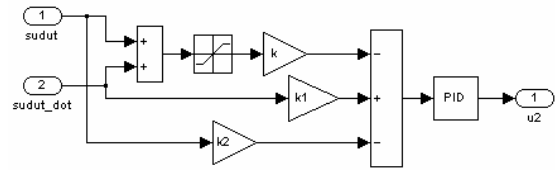
$$y = x_3 = \theta \tag{15}$$

Karena sinyal kontrol u yang muncul pada persamaan keluarannya adalah orde-2, maka fungsi *sliding surface* dinyatakan dengan,

$$S = x_1^3 + (x_1^3) \quad (16)$$

Sehingga,

$$S' = -[(m_1L + m_1C)/(l \cdot m_1C) \cdot g] x_1^3 - 1/(l \cdot m_1C) u + (x_1^4), \quad (> 0) \quad (17)$$



Gambar 3: SMC dengan Kompensator PID.

Dalam *sliding mode* $S = 0$ dan $\dot{S} = 0$. Sinyal kontrol ekuivalen u_e yang membuat $\dot{S} = 0$ adalah:

$$u_{1e} = -[(m_1L + m_1C)g] x_1^3 + (l \cdot m_1C \cdot x_1^4) \quad (18)$$

Dan sinyal kontrol diskontinyu yang menjamin variabel *state* tetap berada pada *sliding surface* adalah:

$$u_s = -k \cdot \text{sgn}(S) \quad (20)$$

atau

$$u_{1s} = -k \cdot \text{sat}(S, 0) \quad (21)$$

jika menggunakan *sliding surface* dengan *boundary layer*. Dengan demikian *control law* dari *sliding mode control* ini dapat dinyatakan sebagai,

$$u_2 = u_e + u_s \quad (22)$$

Sinyal kontrol yang menggerakkan sistem *gantry crane* merupakan gabungan dari dua controller dan dapat dituliskan sebagai,

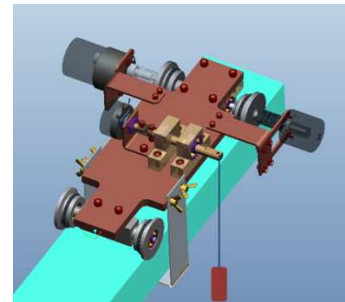
$$u = u_1 + u_2 \quad (23)$$

dimana u_1 adalah keluaran sinyal kontrol *tracking* (G_1C1) dan u_2 adalah keluaran sinyal kontrol *anti-swing* (G_1C2). Implementasi berikutnya dilakukan dengan menggabungkan *sliding mode control* dengan kompensator PID, dalam hal ini digunakan proporsional integral. Struktur *sliding mode control* dengan kompensator PID ditunjukkan Gambar 3.

3. Hasil dan Pembahasan

Model *crane* dan controller *anti-swing* dalam gerakan translasi disimulasikan dalam Matlab-Simulink. Parameter model sistem *crane* diambil dari prototipe *gantry crane* yang telah dibuat, yaitu :

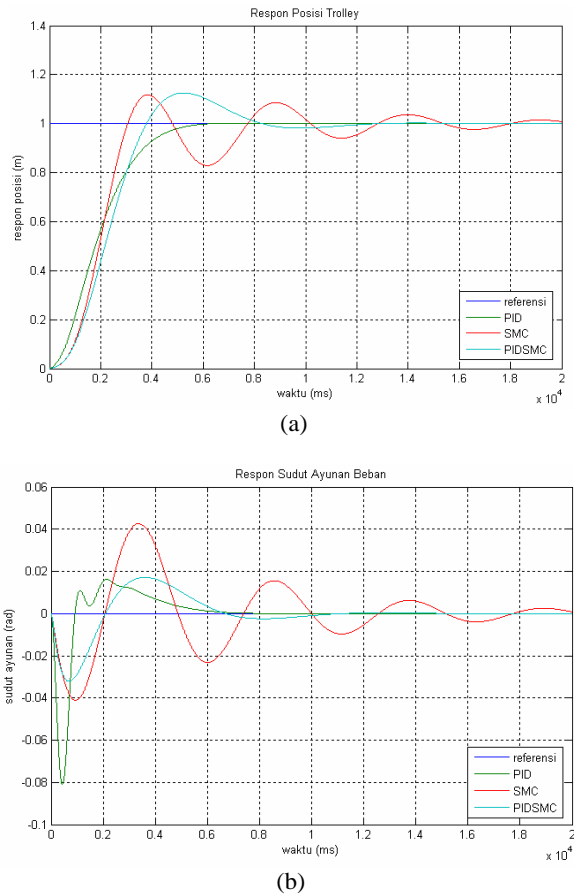
$$\begin{aligned} m_c &= 1 \text{ Kg} \\ m_L &= 0.225 \text{ Kg} \\ l &= 30 \text{ cm} \\ g &= 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{aligned}$$



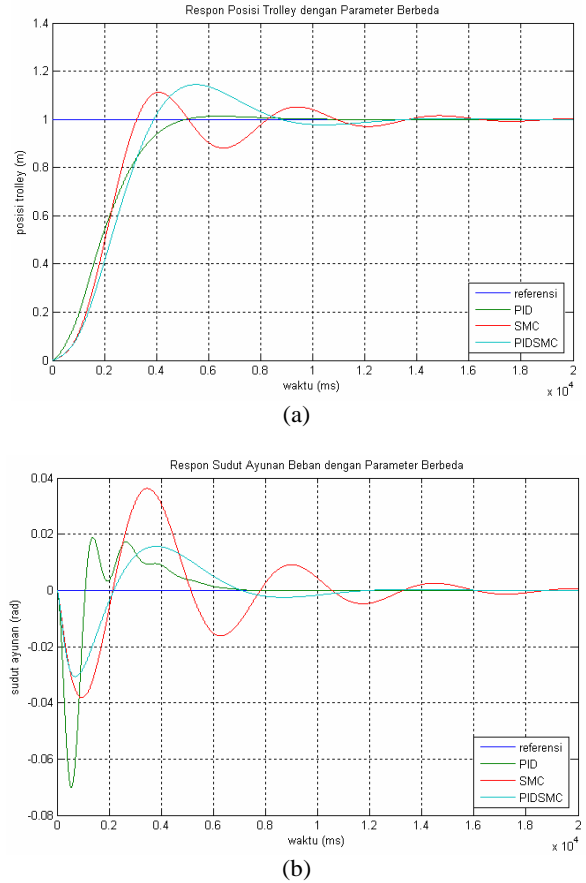
Gambar 4: Prototipe *gantry crane*.

Simulasi dilakukan dengan mengatur controller *tracking* hingga dicapai respon posisi *critically damped*, kemudian diterapkan controller *anti-swing*. Untuk mendapatkan respon *critically damped* diatur nilai K_p dan K_d masing-masing 1 dan 2. Tiga metode diterapkan pada controller *anti-swing*, yaitu controller *PID* dengan mengatur nilai K_p , K_i , dan K_d masing-masing 2, 0, dan 1, kemudian *Sliding Mode Control (SMC)* dan *PID-SMC* dengan pengaturan nilai kompensator $K_p = 0,75$, $K_i = 1$ dan $K_d = 0$. Untuk mengetahui performansi sistem, simulasi berikutnya dilakukan dengan memberikan perubahan parameter, yaitu mengubah massa beban menjadi 450 gr dan panjang tali menjadi 60 cm, hasilnya ditunjukkan Gambar 6 serta gangguan diskontinyu pada sinyal masukan, hasilnya ditunjukkan Gambar 7.

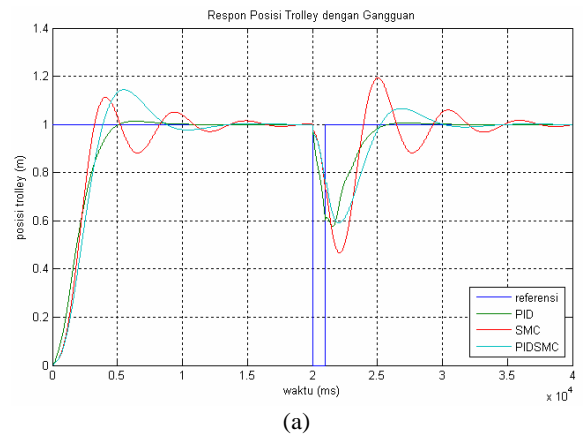
Dari hasil simulasi yang ditunjukkan Gambar 5(a), didapatkan bahwa metode *PID* yang diterapkan pada kontroller *anti-swing* memberikan respon posisi *trolley* paling baik dengan *setling time* sekitar 6 detik tanpa menimbulkan *overshoot*, tetapi sebaliknya pada Gambar 5(b), metode *PID* menghasilkan maksimum *overshoot* ayunan beban paling besar yaitu -0.07 rad pada respon sudut ayunan. Sedangkan metode *PID-sliding mode* memberikan maksimum *overshoot* sudut ayunan beban paling kecil yaitu sekitar -0.03 rad meskipun terjadi penurunan *rise-time* sekitar 12 detik pada respon posisi *trolley*. Performansi yang sama juga diperlihatkan Gambar 6 dan Gambar 7, ketika dilakukan perubahan parameter dan gangguan diskontinyu pada masukan.

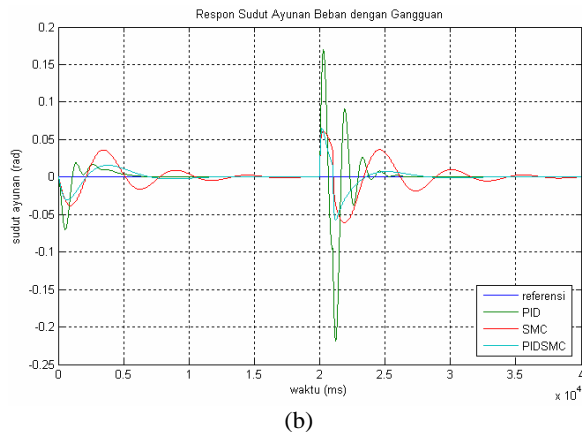


Gambar 5: Hasil simulasi (a) Posisi trolley (b) Sudut ayunan beban.



Gambar 6: Hasil simulasi dengan perubahan massa beban dan panjang tali (a) Posisi trolley (b) Sudut ayunan beban.





Gambar 7: Hasil Simulasi dengan Gangguan (a) Posisi Trolley (b) Sudut Ayunan Beban

4. Kesimpulan

Sistem pengaturan *gantry crane* dengan gerakan translasi *trolley* dilakukan dengan memisahkan kontroller *tracking* dan kontroller *anti-swing*. Kontroller jenis *PID*, *SMC*, dan *PID-SMC* masing-masing diterapkan pada kontroller *anti-swing* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sudut ayunan beban. Dari ketiga jenis kontroller tersebut, kontroller *anti swing* dengan menggunakan *PID-SMC* menghasilkan maksimum *overshoot* paling kecil dalam mengatasi permasalahan ayunan beban yaitu -0.03 rad.

Referensi/Daftar Pustaka

- [1] Altafini, C. Freza, "Galic, Observing the Load Dynamic of an Overhead Crane with Minimal Sensor Equipment", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000.
- [2] Barbot J.P, "Sliding Mode Control in Engineering", Marcel Deccer Inc., 2002, New York.
- [3] B. Zainal, "Modeling and Vibration Control of a Gantry Crane", *Master Thesis, Electrical Mechatronics & Automatic Control*, Mar 2005, Universiti Teknologi Malaysia, Johor.
- [4] C.Y. Chang, "Adaptive Fuzzy Controller of the Overhead Cranes with Nonlinier Disturbance", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, May 2007, Vol. 3, No. 2, pp. 164-172.
- [5] G. Giorgio, A. Giua, G. Usai, "An Implicit Gain-Scheduling Controller for Cranes", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Jan 1998, Vol. 6, No. 1, pp. 15-20.
- [6] H.M. Omar, "Control of Gantry and Tower Cranes", *PhD Dissertation*, Jan 2003, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [7] Z. Wang, B.W. Surgenor, "A Problem With The LQ Control of Overhead Cranes", *Trans. of the ASME Conf. Dynamics Systems, Measurement and Control*, Jun 2006, Vol. 128, pp. 436-440.
- [8] Fallahi M., Azadi S., Robust Control of DC Motor Using Fuzzy Sliding Mode Control with PID Compensator, "IMECS, Mar 2009, Hongkong, Vol. II.
- [9] W.J. O'Connor, Gantry Crane Control : A Novel Solution Explore and Extended, *Proc. of the American Control Conference*, 2002, pp.250-255,.