



Optimasi Pengontrolan *Internal Model Controller* dengan *Extremum Seeking Control* dan *Newton-Based Extremum Seeking Control*

Dessy Novita*, Muhammad Taufik, Nendi Suhendi Syafei

Departemen Teknik Elektro, Universitas Padjadjaran, Bandung

*E mail: d.novita@unpad.ac.id

Abstrak

Tuning parameter secara otomatis dengan minimum cost function adalah salah satu cara optimasi pada sistem kontrol. Penelitian ini merupakan pengembangan metoda untuk gain otomatis dan penyetelan optimal dalam waktu nyata. Tujuan penelitian ini adalah untuk menemukan parameter *Internal Model Control* (IMC) dengan minimum *cost function* menggunakan *Extremum Seeking Control* (ESC), *Newton Extremum Seeking Control* dan diupdate dengan *Exact Line Search* (ESL). Algoritma *Newton Extremum Seeking* diterapkan untuk estimasi gradient dan ESL untuk minimum cost function. Hasil penelitian ini adalah didapatkan parameter-parameter optimal di ilustrasikan dengan simulasi numerik

Kata kunci: Optimasi, *Internal Model Controller*, Tuning parameter IMC, *Extremum Seeking Control*, *Newton Extremum Seeking Control*

Abstract

Automatically tuning parameter by using minimum cost function of control system is one of the optimisation. We want to extend a method for automatic gain and optimal tuning in real time. The aim of the paper is to find the IMC Parameters with minimum cost function by Extremum Seeking Control (ESC), Newton Extremum Seeking Control and updating by Exact Line Search (ELS). We apply the Newton Extremum Seeking algorithm for estimation gradient and updating by ELS for minimum cost function. The optimal parameter is illustrated by numerical simulations.

Keywords: Optimization, *Internal Model Controller*, Tuning parameters IMC, *Extremum Seeking Control*, *Newton Extremum Seeking Control*

1. Pendahuluan

Penelitian ini dimotivasi oleh bagaimana membuat penyetelan parameter pengontrol secara otomatis dan mengembangkan metoda untuk penyetelan optimal dalam waktu nyata. Perkembangan riset baru-baru ini dalam optimasi waktu nyata pada penyetelan parameter pengontrol adalah *extremum seeking control* (ESC) (Choi dkk, 2002; Ariyur, Krstic, 2012). *Proportional Integrative Derivative* (PID) berdasarkan *extremum seeking control* telah dikembangkan penyetelan oleh Killigsworth dan Krstic, 2006. Mereka menggunakan estimasi parameter dengan gradient yang diketahui parameter awalnya dan mengoptimalkan performans. Chan dkk, 2011 telah melakukan metoda penyetelan parameter secara otomatis dengan modifikasi *extremum seeking control* dan diaplikasikan pada robot multi-joint. Metoda modifikasi ESC adalah dengan menggunakan *peak filter* pada output *cost function* dan menggunakan *non-linear programming* untuk meminimumkan *cost function*. Modifikasi ESC telah dilakukan juga oleh Kong dkk, 2008. Hasil modifikasi didapatkan parameter gain secara otomatis penyetelannya dengan menggunakan suatu gradient untuk meminimumkan *cost function*. Disain ESC untuk mendapatkan performans yang baik adalah estimasi gradient dengan filter yang tepat dan

sinyal perturbation parameter kemudian di perbaharui parameter pengontrol sampai hasilnya optimal.

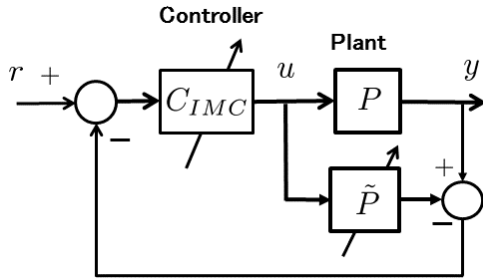
Selanjutnya, tujuan penelitian ini adalah menemukan parameter-parameter *internal model controller* (IMC) dengan minimum *cost function* dimana penyetelannya menggunakan ESC dan dibandingkan dengan Newton-based ESC. Newton-based ESC telah dikembangkan dengan menggunakan matrik perturbation untuk estimasi hessian dan persamaan Riccati untuk estimasi inverse hessian (Ghaffari dkk, 2011). Tipe ESC yang digunakan adalah ESC oleh Krstic dengan menggunakan *high-pass filter* dan *low-pass filter* dan ESC oleh Kong dengan *peak filter* dan *low-pass filter*. ESC oleh Kong dimodifikasi dari ESC Krstic. Kemudian kami mengimprovisasi ESC Kong dan di update dengan *exact line search*. Setelah itu penyetelan parameter IMC dilakukan dengan *Newton-based ESC*.

Paper ini disusun terdiri atas bagian pertama pendahuluan, kedua adalah metoda terdiri atas formulasi masalah, *extremum seeking control*, tuning IMC dengan ESC, *Newton-based extremum seeking control*, tuning IMC dengan Newton-based ESC. Bagian kelima Hasil dan pembahasan mengilustrasikan simulasi numerik dan terakhir bagian keempat kesimpulan.

2. Metoda

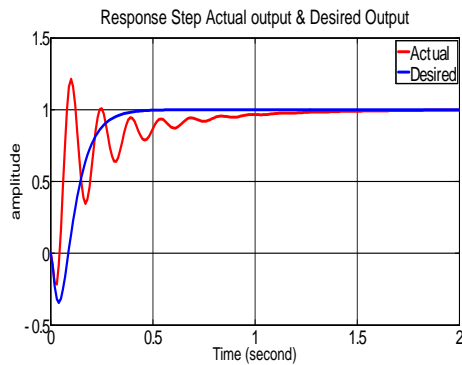
2.1. Formulasi Masalah

Konfigurasi sistem *internal model control* dengan *tunable* parameter ditampilkan pada Gambar 1 terdiri atas *feedback controller* C_{IMC} , *Internal mathematical model* \tilde{P} dan *plant* P (Kaneko dkk, 2012).



Gambar 1. Konfigurasi blok diagram *Internal Model Control* dengan *tunable* parameter

Ketika sinyal referensi r adalah fungsi step sebagai input ke sistem IMC, maka output respon step y diilustrasikan pada Gambar 2. Hal ini dapat dilihat sinyal output aktual memiliki vibrasi sedangkan output yang diinginkan adalah sinyal stabil. Oleh karena itu masalahnya bagaimana membuat sinyal aktual sama dengan sinyal yang diinginkan stabil dengan menyetel parameter pengendalian secara otomatis.



Gambar 2. Response step dari output y dengan sinyal aktual dan sinyal yang diinginkan

Model plant yang digunakan dalam penelitian ini diasumsikan *linear*, *time-invariant*, *single-input single-output*, *strictly proper*, *stable* dan *non-minimum phase*. Fungsi alih dari plant dinotasikan pada Persamaan 1 (Kaneko dkk, 2012).

$$P(z) = P_m(z)P_n(z) = \frac{N_m(z)N_n^\#(z)N_n(z)}{D(z)N_n^\#(z)} \quad (1)$$

dimana $P(z)$ adalah fungsi alih dari suatu plant, $P_m(z)$ adalah bagian minimum phase dari $P(z)$, $P_n(z)$ adalah bagian non-minimum phase dari $P(z)$ dan

suatu inner function. $D(z)$ adalah denominator dari $P(z)$, $N_m(z)$ dan $N_n(z)$ adalah polynomial yang memiliki akar-akar stabil dan unstable nol dari $P(z)$.

$N_n^\#(z)$ adalah *reciprocal polynomial* dari $N_n(z)$. *Internal mathematical model* $\tilde{P}(z)$ pada IMC diberikan pada Persamaan 2, 3 dan 4 (Kaneko dkk, 2012).

$$\tilde{P}(\rho_m, \rho_n, z) := \tilde{P}_m(\rho_m, \rho_n, z)\tilde{P}_n(\rho_n, z) \quad (2)$$

$$\tilde{P}(\rho_m, \rho_n, z) = \frac{(\sum_{i=0}^{\mu} b_i z^i)(\sum_{i=0}^d c_d - i z^i)}{\sum_{i=1}^v a_i z^{i+1}} \quad (3)$$

$$\tilde{P}(\rho_n, z) = \frac{(\sum_{i=0}^d c_i z^i)}{(\sum_{i=0}^d c_d - i z^i)} \quad (4)$$

dimana vektor parameter yang tidak diketahui adalah pada Persamaan 5 dan 6.

$$\rho_m := [a_1 \dots a_v b_0 \dots b_\mu]^T \in \mathbb{R}^{v+\mu+1} \quad (5)$$

$$\rho_n := [c_0 \dots c_d]^T \in \mathbb{R}^{d+1} \quad (6)$$

Feedback controller C_{IMC} ditampilkan pada Persamaan 7

$$C_{IMC}(\rho_c) = \frac{(\sum_{i=0}^{\mu_c} g_i z^i)}{(\sum_{i=1}^{v_c} f_i z^{i+1})} \quad (7)$$

dimana vektor parameter yang tidak diketahui adalah pada Persamaan 8 dan 9.

$$\rho_c := [f_1 \dots f_{v_c} g_0 \dots g_{\mu_c}]^T \in \mathbb{R}^{v_c+\mu_c+1} \quad (8)$$

$$\rho := [\rho_n^T \rho_m^T \rho_c^T]^T \quad (9)$$

Bagaimanapun pada penelitian ini diinginkan performans optimal dengan penyetelan parameter IMC sehingga meminumkan *cost function* dalam waktu nyata.

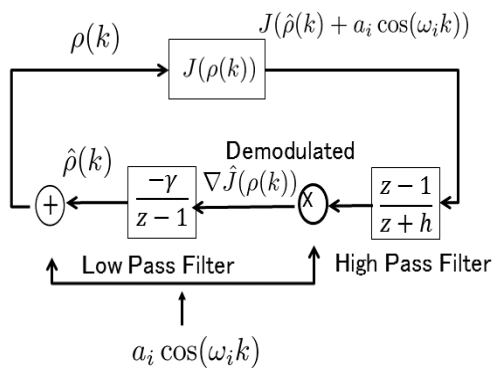
2.2. Extremum Seeking Control

Extremum seeking control adalah metoda control adaptif yang secara otomatis mengoptimalkan fungsi objektif yang tidak diketahui dari pengukuran performans dalam waktu nyata. Ketika ESC diaplikasikan, tidak dibutuhkan diketahui secara detil relasi antara plant dinamik dengan objektif hanya yang diamati performans pengukuran plant (Choi dkk, 2002; Haring dkk, 2013). *Extremum seeking control* secara umum menggunakan sinyal *perturbation*, *low-pass filter*, *high-pass filter* dan *integrator* (Ariyur, Krstic, 2012; Krstic dan Wang, 2000; Tan dkk, 2010). Untuk kasus *discrete-time*

lihat (Choi dkk, 2002; Tan dkk, 2010) dan multivariabel (Ariyur dan Krstic, 2002). Perkembangan terbaru, *extremum seeking control* adalah pada kasus *periodic steady-state*, yang menggunakan *moving average filter* untuk estimasi gradient dari *cost function* (Novita, Yamamoto, 2015; Haring dkk, 2013; Ariyur, Krstic, 2002) tetapi *extremum seeking control* masih pada *continuous-time control* (Hunneken dkk, 2012).

2.3. ESC Diskrit oleh Krstic

Skema ESC Diskrit oleh Krstic dideskripsikan pada Gambar 3 (Choi dkk, 2002; Killigsworth dan Krstic, 2006). Skema ini menggunakan *high-pass filter* dan *low-pass filter* untuk estimasi gradient *cost function*.



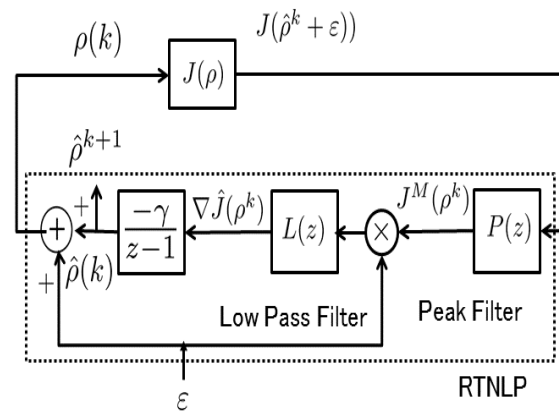
Gambar 3. Skema ESC Diskrit oleh Krstic (Choi dkk, 2002)

2.4. ESC Diskrit Modifikasi oleh Kong

Skema ESC diskrit modifikasi ditampilkan pada Gambar 4 (Kong dkk, 2008; Chan dkk, 2011). Estimasi gradient dari *cost function* menggunakan *peak filter* dan *low-pass filter*, kemudian updating variabel diaplikasi pada *real time nonlinear programming* (RTNP). RTNP secara detail dideskripsikan pada (Kong dkk, 2008) terdiri atas sinyal perturbation, cost function, low pass filter dan *peak filter*. Pada penelitian ini RTNP dengan *Low-pass filter 2nd order*. *Peak filter* mengekstrak informasi yang relevan dengan hanya menggunakan komponen frekuensi pada Persamaan 10 (Chan dkk, 2011).

$$P_i(z) = \frac{b_{0,i}(z-1)}{z^2 + a_{1,i}z + a_{0,i}} \quad (10)$$

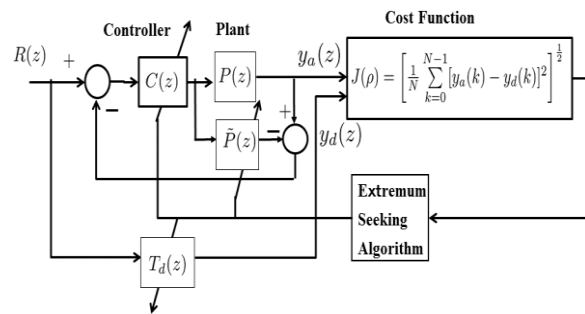
Peak filter secara detail dijelaskan pada (Chan dkk, 2011) dan (Kong dkk, 2008).



Gambar 4. Skema Diskrit Modifikasi ESC (Kong dkk, 2008)

2.5. Tuning IMC dengan ESC

Dalam penelitian ini, tuning IMC parameter diaplikasikan pada algoritma *Extremum Seeking* (ES). Konfigurasi dari parameter *internal model control tuning* dengan ES ditampilkan Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi dari parameter internal model control tuning dengan ES

$\rho = [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \rho_4]^T$ adalah 4 variabel IMC parameter.

$\varepsilon = [a_1 \sin(\omega_1 k) \ a_2 \sin(\omega_2 k) \ a_3 \sin(\omega_3 k) \ a_4 \sin(\omega_4 k)]^T$ adalah sinyal perturbation yang independen $\omega_{C_i} \neq \omega_{C_j} + \omega_{C_k}$ and $\omega_{C_i} \neq \omega_{C_j}$ dimana $i, j, k = 1, \dots, n$.

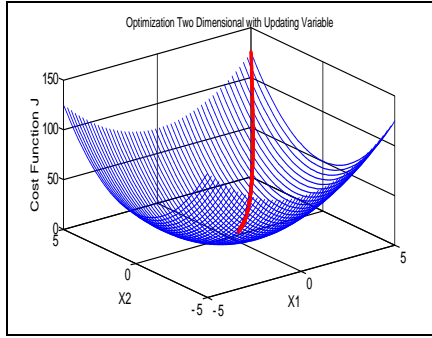
Updating variabel adalah

$$\rho(k+1) = \rho_k - \gamma \nabla J(\rho(k)) \quad (11)$$

dimana γ adalah updating step dipilih dengan *exact line search* pada Persamaan 12, $\nabla J(\rho(k))$ adalah gradient dari cost function $J(\rho(k))$.

$$\gamma = \operatorname{argmin}_{\gamma > 0} J(\rho - \gamma \nabla J(\rho)) \quad (12)$$

Exact line search diilustrasikan pada Gambar 6 dengan optimasi dua dimensi.



Gambar 6. Optimisasi dua dimensi dengan exact line search

2.6. Newton-Based Extremum Seeking Control

Metoda Newton berdasarkan Extremum seeking control telah dilakukan (Ghaffari dkk, 2011). Blok diagram Newton-based ESC untuk system dinamik dapat ditampilkan pada Gambar 7. Algoritma Newton-based ES untuk kasus scalar dan memperkenalkan suatu estimator dinamik dari matrik Hessian yang menghilangkan kesulitan pada singularity dari estimasi matrik. Bagian penting dari metoda ini adalah perturbation matrik (N) untuk estimasi Hessian (H) dan persamaan Riccati untuk estimasi inverse Hessian. Kestabilan lokal menggunakan averaging dan singular perturbation. Sinyal S -perturbation adalah Persamaan 13, Sinyal M -perturbation adalah Persamaan 14, Sinyal N -perturbation Persamaan 15 dan 16 (Ghaffari dkk, 2011).

$$S(t) = [a_1 \sin(\omega_1 t) \dots a_n \sin(\omega_n t)]^T \quad (13)$$

$$M(t) = \left[\frac{2}{a_1} \sin(\omega_1 t) \dots \frac{2}{a_n} \sin(\omega_n t) \right]^T \quad (14)$$

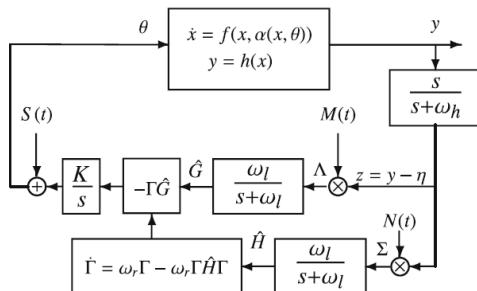
$$N_{i,i} = \frac{16}{a_i^2} (\sin^2(\omega_i t) - \frac{1}{2}) \quad (15)$$

$$N_{i,j} = \frac{4}{a_i a_j} \sin(\omega_i t) \sin(\omega_j t), \quad i \neq j \quad (16)$$

Riccati estimator ditunjukkan pada Persamaan 17. Estimasi rho derivative dinotasikan pada Persamaan 18.

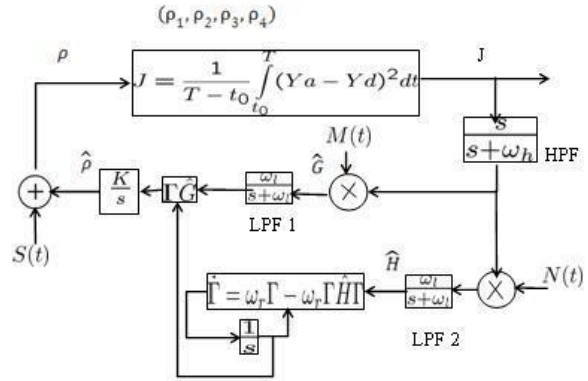
$$\dot{\Gamma} = \omega_r \Gamma - \omega_r \Gamma \hat{H} \Gamma \quad (17)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = -\Gamma \hat{G} \quad (18)$$



Gambar 7. Blok diagram Newton-based ESC (Ghaffari dkk, 2011).

Tuning IMC dengan Newton-Based ESC ditampilkan pada blok diagram Gambar 8.



Gambar 8. Konfigurasi dari parameter internal model control tuning dengan Newton-Based ESC

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini disimulasikan secara numerik dengan model IMC (Kaneko dkk, 2012) yang ditampilkan pada Gambar 9. Plant diberikan pada persamaan 19.

$$P = \frac{z-1.5}{z^2-z+0.16} \quad (19)$$

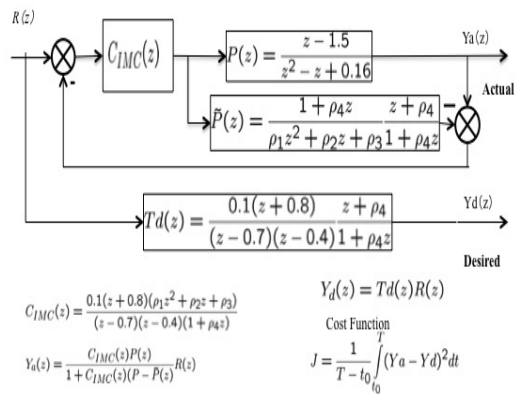
Internal model ditampilkan pada Persamaan 20.

$$\tilde{P}(\rho) = \left(\frac{1 + \rho_4 z}{\rho_1 z^2 + \rho_2 z + \rho_3} \right) \left(\frac{z + \rho_4}{1 + \rho_4 z} \right) \quad (20)$$

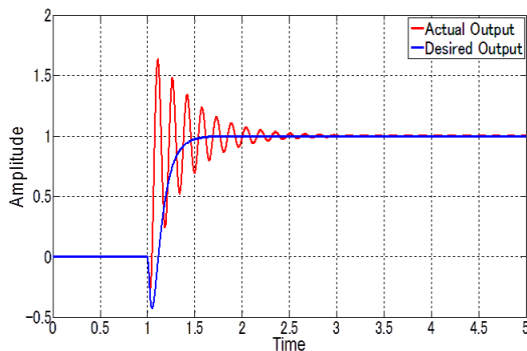
dimana $\rho_m := [\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3]^T$ dan $\rho_n := \rho_4$ adalah parameter yang tidak diketahui. Model referensi yang diinginkan meliputi bagian non-minimum phase $\tilde{P}_n(\rho_n)$ diberikan pada Persamaan 21.

$$T_d(\rho_n) = T_{dm} \tilde{P}_n(\rho_n) = \left(\frac{0.1(z+0.8)}{(z-0.7)(z-0.4)} \right) \left(\frac{z + \rho_4}{1 + \rho_4 z} \right) \quad (21)$$

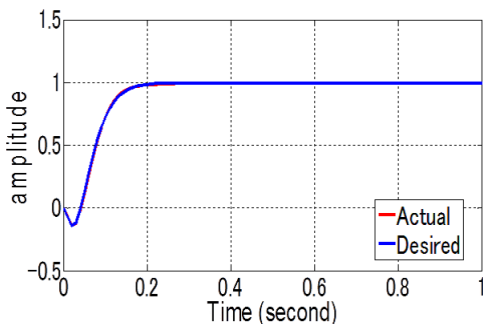
Setting inisial parameter-parameter IMC adalah $\rho_m^0 = [1 - 0.8 - 0.1]^T$ and $\rho_n^0 = \rho_4 = -1.1$ (Kaneko dkk, 2012). Blok diagram dari contoh sistem IMC dideskripsikan pada Gambar 9. Response step dari parameter-parameter inisial IMC adalah ditampilkan pada Gambar 10. Setting dari frekuensi-frekuensi perturbation adalah $\rho_1 = 50\text{Hz}$, $\rho_2 = 100\text{Hz}$, $\rho_3 = 250\text{ Hz}$, $\rho_4 = 500\text{Hz}$. Hasil simulasi dari penyetelan parameter-parameter IMC dengan ESC Krstic ditampilkan dengan respons step output aktual dan diinginkan pada Gambar 11.



Gambar 9. Blok diagram dari contoh numerik sistem IMC



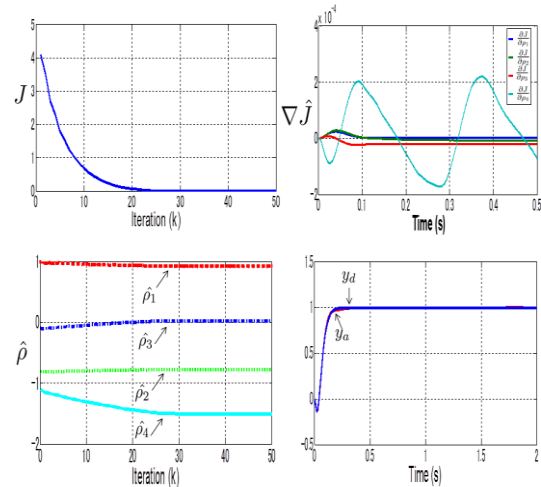
Gambar 10. Response step actual and desired output initial IMC parameters



Gambar 11. Respon step aktual dan diinginkan output optimal IMC parameter oleh ESC Krstic

Frequency cut-off HPF 500 Hz dari 0 detik sampai 250 detik setelah itu cost function tetap. Kemudian HPF diubah 0.5 Hz sampai 1150s. Optimal IMC parameter adalah $\rho^*(t = 1150s) = [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4]$, $\rho_1 = 0.9218$, $\rho_2 = -0.8292$, $\rho_3 = 0.06708$, $\rho_4 = -1.505$ dan cost function $J(\rho^*) = 0.0008759$. Tuning IMC parameter dengan gradient ES Krstic didapatkan performans yang baik untuk step response tetapi butuh waktu yang lama dan variasi frekuensi cut-off HPF. Hasil simulasi dari tuning parameter IMC oleh ESC Kong ditampilkan pada response step pada Gambar 12. Hal ini dapat terlihat *cost function* dan estimasi parameter-parameter IMC dengan updating *exact line search* sampai iterasi k=50 juga estimasi

gradient dan response step actual dan output yang diinginkan.



Gambar 12. Cost function, estimasi parameter IMC dengan updating exact line search, estimation gradient, response step actual dan desired output

Tuning parameter-parameter IMC dengan Newton-based ESC untuk kasus numerik yang digunakan pada Gambar 8 tidak menghasilkan simulasi yang bagus dan masih mencari parameter filter yang tepat.

4. Kesimpulan

Parameter-parameter *Internal Model Controller* dapat di setel secara optimal dengan *extremum seeking control*. Metoda telah diuji dengan simulasi numerik dan dapat dihasilkan parameter-parameter optimal IMC dimana output aktual sama dengan output yang diinginkan dengan penyetelan parameter pengontrol secara otomatis.

Metoda Newton-based ESC belum bisa diaplikasikan tuning IMC pada sistem numerik yang diberikan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis pertama ucapkan terima kasih pada Prof. Shigeru Yamamoto dan Prof. Osamu Kaneko dari Kanazawa University atas diskusinya. Terima-kasih pada UNPAD atas fasilitas laboratorium.

Daftar Pustaka

- J. Y. Choi, M. Krstic, K. B. Ariyur, J. S. Lee, (2002) Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 47, No. 2, pp. 318-323.
- K. B. Ariyur, M. Krstic, (2003). Real-time optimization by Extremum-seeking Control, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience,.
- N. J. Killingsworth, M. Krstic, (2006). PID tuning using extremum seeking, IEEE Control System Magazine, pp. 70-79 February 2006.
- M. Chan, K. Kong, M. Tomizuka, (2011). Automatic controller gain tuning of a multiple



- joint robot based on modified extremum seeking control, The 18th IFAC world congress, pp. 4131-4136, Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011.
- K. Kong, K. Inaba, M. Tomizuka, (2008). Real-time nonlinear programming by amplitude modulation, Proceedings of DSCC2008 ASME Dynamic Systems and Control Conference, pp. 1-8, Ann Arbor, Michigan, USA, October 20-22, 2008.
- A. Ghaffari, M. Krstic & D. Nesic, (2011). Multivariable Newton-Based Extremum Seeking, IEEE CDC-ECC, December 12-15, 2011
- O. Kaneko, H.T. Nguyen, Y. Wadagaki, S. Yamamoto, (2012). Fictitious reference iterative tuning for non-minimum phase systems in the IMC architecture: simultaneous attainment of controllers and models, SICE *Journal of Control Measurement and System Integration*, Vol. 1, No. 1, pp. 001-008.
- D. Novita, S. Yamamoto, (2015). "Extremum Seeking for Dead-Zone Compensation and Its Application to a Two-Wheeled Robot", *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 265-269.
- M. Haring, N. V. de Wouw, and D. Nesic, (2013). "Extremum-seeking control for nonlinear systems with periodic steady-state outputs," *Automatica*, vol. 49, no. 6, pp. 1883-1891.
- M. Krstic and H.-h. Wang, (2000). "Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems," *Automatica*, vol. 36, pp. 595-601.
- Y. Tan, W. Moase, and C. Manzie, (2010). "Extremum seeking from 1922 to 2010," in *Proceedings of The 29th Chinese Control Conference*, Beijing (China), December 10-13, 2010, pp. 14-26.
- P. Frihauf, M. Krstic, and T. Bas, (2012). "Finite-Horizon LQ Control for Unknown Discrete-Time Linear Systems via Extremum Seeking," in *Proceedings of The 51st IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii (USA), December 10-13, 2012, pp. 5717-5722.
- K. B. Ariyur and M. Krstic, (2002). "Analysis and Design of Multivariable Extremum Seeking," in *Proceedings of The American Control Conference*, Anchorage, AK, May 8-10, 2002, pp. 2903-2908.
- B. Hunnekens, M. Haring, N. V. D. Wouw, and H. Nijmeijer, (2012). "Steady-state performance optimization for variable-gain motion control using extremum seeking," in *Proceedings of The 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Maui, Hawaii (USA), December, 10-13, 2012, pp. 3796-3801.