

KENDALI ADAPTIF TANGGUH TERDESENTRALISIR UNTUK MANIPULATOR ROBOT

Indrawanto⁽¹⁾, J. Swevers⁽²⁾ and H. Van Brussel⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Lab. Otomasi dan Sistem Produksi, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

E-mail: indrawanto@tekprod.ms.itb.ac.id

⁽²⁾Mechanical Engineering Department, PMA Division, Katholieke Universiteit Leuven
Celestijnenlaan 300B, 3001-Heverlee, Belgium

Ringkasan

Tulisan ini menyajikan pengendali adaptif tangguh terdesentralisir untuk manipulator robot. Pengendali yang diusulkan tidak memerlukan pengetahuan khusus tentang model dinamika robot. Setiap sambungan manipulator dikendalikan dengan pengendali PD adaptif dan umpan maju percepatan dengan penguatan adaptif. Sinyal tambahan diberikan untuk memperbaiki laju konvergensi dan memperbaiki ketangguhan terhadap gangguan torsi dan terhadap suatu kelas dinamika yang tak termodelkan. Untuk memastikan kestabilan global kesalahan *tracking* digunakan kendali adaptif referensi model berdasarkan kestabilan Lyapunov. Hasil-hasil percobaan pada robot industri ditunjukkan untuk membuktikan unjuk-kerja *tracking* pengendali yang diusulkan.

Abstract

This paper presents a robust decentralized adaptive controller for robot manipulators. The proposed controller does not require special knowledge of the robot dynamics model. Each joint of the manipulator is controlled by using an adaptive PD feedback controller and an adaptive gain acceleration feedforward. An auxiliary input is introduced to improve the convergence rate and to improve the robustness to torque disturbances and to a class of unmodelled dynamics. Lyapunov-based Model Reference Adaptive Control is used to establish the global stability of the tracking errors. Experimental results on an industrial robot are presented to verify the tracking performance of the proposed controller.

Kata Kunci: Control design, Model reference adaptive control, Decentralized adaptive control, Robot control, Saturation control.

1. PENDAHULUAN

Robot industri umumnya dikendalikan dengan kendali terpisah dimana setiap sambungan dikendalikan oleh servo posisi/kecepatan sederhana dengan penguatan tetap. Kendali-kendali tersebut memadai untuk melakukan tugas-tugas sederhana seperti tugas ambil dan taruh (*pick-and-place*) yang hanya memerlukan gerak titik-ke-titik saja. Untuk tugas-tugas dimana diperlukan *tracking* cepat yang teliti dengan beban yang

berbeda-beda, kendali tersebut di atas tidak akan memadai.

Untuk mengurangi keterbatasan-keterbatasan kendali robot saat ini, banyak penelitian-penelitian yang telah dilakukan untuk mengembangkan sistem kendali lanjut untuk manipulator. Sebagai hasil dari kegiatan penelitian ini banyak metoda kendali untuk manipulator yang telah diusulkan. Beberapa metoda dapat dikelompokkan dalam Metoda Torsi Terhitung (*Computed Torque Methods*) (Craig *et al.*, 1987; Spong and Ortega, 1990), yang berdasarkan atas perlawanan terhadap komponen tak-linier dalam dinamika robot. Sebagai konsekuensinya, metoda ini memerlukan model sistem yang lengkap dan akurat. Dalam praktik, metoda tersebut sulit untuk diterapkan karena

¹ Staf pengajar Jur. Mesin ITB

² Peneliti Senior dengan dana F.W.O. (Fund for Scientific Research, Flanders, Belgia)

³ Professor di KU Leuven, Belgia

model manipulator biasanya tidak diketahui atau sulit didapat. Lebih jauh lagi, metoda tersebut memiliki struktur kendali terpusat yang memerlukan komputasi yang intensif.

Untuk mengurangi kesulitan-kesulitan dalam mendapatkan suatu model robot yang teliti, algoritma kendali adaptif untuk manipulator robot telah dikembangkan. Tetapi, sebagian besar kendali-kendali adaptif tersebut dikembangkan berdasarkan struktur terpusat yang memerlukan komputasi yang intens (Craig *et al.*, 1987; Spong and Ortega, 1990).

Untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan kendali adaptif terpusat, banyak peneliti telah memberikan perhatiannya kepada kendali adaptif terdesentralisir. Beberapa keuntungan kendali adaptif tersentralisasi adalah: pertama, pengetahuan tentang dinamika manipulator lengkap tidak diperlukan, serta kendali adaptif terdesentralisir dapat secara umum diterapkan pada berbagai jenis robot tanpa memerlukan perubahan yang berarti. Kedua, karena struktur terdesentralisirnya dan kesederhanaan perhitungannya prosedur kendali ini dapat diterapkan dengan laju cuplik yang tinggi.

Beberapa kendali adaptif terdesentralisir untuk manipulator robot telah diusulkan dalam tulisan berikut (Gavel and Hsia, 1987; Seraji, 1989; Fu, 1992). Prosedur adaptif yang dideskripsikan dalam (Gavel and Hsia, 1987) menjamin kesalahan *tracking* yang terbatas lokal. Analisis kestabilan prosedur kendali ini berdasarkan penerapan umpan balik penguatan tinggi yang dapat menyebabkan aksi kendali yang berlebihan dan dapat mengeksitasi dinamika yang tak-termodelkan. Dalam tulisan ini (Seraji, 1989), prosedur kendali adaptif terdesentralisir dirancang dengan asumsi bahwa lengan robot bergerak pelan sehingga komponen interkoneksi tak-linier karena gaya Coriolis dan sentrifugal berubah pelan terhadap waktu. Untuk mengikuti lintasan cepat, asumsi tersebut dilanggar dan kemungkinan terjadi ketidakstabilan. Prosedur kendali terdesentralisir yang ditulis dalam (Fu, 1992), tidak secara eksplisit memerlukan asumsi bahwa lengan robot bergerak pelan, walaupun begitu pembuktian kestabilannya tetap berdasarkan penerapan penguatan tinggi.

Tulisan ini menyajikan kendali adaptif terdesentralisir tangguh. Kendali yang diusulkan dikembangkan berdasarkan teknik kendali adaptif referensi model digabung dengan teknik kendali adaptif jenuh. Tulisan ini disusun sebagai berikut. Dalam bagian 2 diuraikan dinamika manipulator robot dan sifat-sifatnya yang digunakan dalam perancangan kendali. Dalam bagian 3, prosedur kendali adaptif dan kestabilan globalnya diinvestigasi. Bagian 4 menyajikan unjuk kerja *tracking* pengendali yang diusulkan didemonstrasikan de-

ngan hasil percobaan. Akhirnya bagian 5 menyajikan kesimpulan.

2. DINAMIKA MANIPULATOR ROBOT

Dinamika sebuah robot kaku dengan derajat kebebasan n dapat dinyatakan sebagai berikut (Spong and Vidyasagar, 1989):

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + F_v\dot{q} + F_c(\dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

dimana q adalah vektor $n \times 1$ variabel posisi sambungan, τ adalah vektor torsi input $n \times 1$, $M(q)$ adalah matrix inersia $n \times n$ yang simetri dan positif terbatas, $C(q, \dot{q})$ adalah vektor $n \times 1$ percepatan Coriolis dan centripetal, F_v adalah matrik diagonal $n \times n$ koefisien gesek viscous, $F_c(\dot{q})$ adalah vektor $n \times 1$ gesekan Coulomb, dan $G(q)$ adalah vektor $n \times 1$ gaya gravitasi.

Misalkan q_d adalah lintasan yang diinginkan yang berupa fungsi halus (*smooth function*) terhadap waktu sehingga \dot{q}_d dan \ddot{q}_d ada dan terbatas, dan keduanya kontinyu terhadap waktu. Kendali PD (*proportional differential*) klasik memiliki bentuk sebagai berikut

$$u = K_v \dot{e} + K_p e \quad (2)$$

dimana $K_v = \text{diag}[k_{v_1}, \dots, k_{v_n}]$, $K_p = \text{diag}[k_{p_1}, \dots, k_{p_n}]$, $e = q_d - q$ adalah kesalahan *tracking*. Dengan mensubstitusikan hukum kendali Pers. 2 ke dinamika robot Pers. 1 menghasilkan sistem kesalahan

$$\dot{e} = Ae + Bu \quad (3)$$

dimana

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \\ a_{21} &= -M^{-1}(q)(K_p + \alpha C(q, \dot{q})), \\ a_{22} &= -M^{-1}(q)(K_v + C(q, \dot{q}) + \alpha M(q)), \\ e &= \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(q) \end{bmatrix}, \quad \alpha = k_p k_v^{-1}, \\ u &= M(q)(\ddot{q}_d + \alpha \dot{e}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \alpha e) + F_v \dot{q} \\ &\quad + F_c(\dot{q}) + G(q), \end{aligned} \quad (4)$$

Bila parameter sistem dinamika dalam Pers. 1 tidak diketahui dengan pasti, maka Pers. 4 mewakili ketidakpastian untuk suatu kendali. Tetapi diasumsikan bahwa terdapat fungsi skalar positif h yang dapat digunakan sebagai batas ketidakpastian

$$h \geq \|u\|. \quad (5)$$

Seperti diuraikan dalam (Dawson *et al.*, 1990), dengan menggunakan sifat-sifat fisik dari manipulator robot dapat ditunjukkan bahwa h dalam Pers. 5 dapat dipilih sebagai berikut

$$h = \beta_1 + \beta_2 \|e\| + \beta_3 \|e\|^2 \quad (6)$$

dimana β_1, β_2 , dan β_3 adalah konstanta positif batas yang harganya diperkirakan berdasarkan kemungkinan massa, koefisien gesek, gangguan terbesar, dan sebagainya. Fungsi skalar h ini, Pers. 6, dapat digeneralisir menjadi

$$h \leq \beta^* \sum_{k=0}^2 \|e\|^k \quad (7)$$

dimana $\beta^* = \max\{\beta_1, \beta_2, \beta_3\}$. Pernyataan dalam Pers. 7 akan digunakan untuk merancang pengendali dalam bagian selanjutnya dari tulisan ini.

3. KENDALI ADAPTIF TANGGUH TERDESENTRALISIR

Bagian ini menguraikan perancangan algoritma kendali adaptif tangguh terdesentralisir dan analisis perilaku *loop* tertutupnya dengan dinamika robot yang dinyatakan oleh Pers. 1. Dalam pengembangan algoritma kendali terdesentralisir, setiap sambungan manipulator diperlakukan sebagai subsistem. Subsistem-subsistem tersebut tersambungkan oleh "torsi kopling" yang mewakili kopling inersia, Corioli, centrifugal, dan gaya gravitasi. Seperti pada (Seraji, 1989), dinamika manipulator Pers. 1 dapat dinyatakan sebagai suatu kumpulan sebanyak n persamaan diferensial skalar orde dua taklinier.

$$\begin{aligned} \ddot{m}_{ii}(q)\ddot{q}_i + \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n m_{ij}(q)\ddot{q}_j \right] + c_i(q, \dot{q}) + f_{vi}\dot{q}_i \\ + f_{ci}(\dot{q}_i) + g_i(q) = \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (8)$$

dimana subskrip i merujuk pada subsistem ke- i , m_{ii} adalah inersia yang berubah terhadap waktu dilihat dari sambungan ke- i . Diasumsikan bahwa gesekan Coulomb f_{ci} memiliki bentuk

$$f_{ci}(\dot{q}_i) = k_{ci} \text{sign}(\dot{q}_i) \quad (9)$$

dimana k_{ci} adalah koefisien gesek Coulomb. Dinamika setiap subsistem pada Pers. 8 dapat juga dinyatakan dengan

$$m_{ii}(q)\ddot{q}_i + z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

dimana $z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \left[\sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij}(q)\ddot{q}_j(t) \right] + c_i(q, \dot{q}) + f_{vi}\dot{q}_i + f_{ci}(\dot{q}_i) + g_i(q)$. Komponen z_i dalam Pers. 10 diperlakukan sebagai "torsi gangguan" oleh pengendali sambungan ke- i .

Misalkan suatu sambungan manipulator diperlakukan untuk mengikuti lintasan yang diinginkan q_{di} yang berupa fungsi halus terhadap waktu. Vektor kesalahan *tracking* sambungan i didefinisikan sebagai

$$e_i = \begin{bmatrix} q_{di} - q_i \\ \dot{q}_{di} - \dot{q}_i \end{bmatrix}$$

Kendali adaptif terdesentralisir yang diusulkan untuk dinamika manipulator pada Pers. 8 adalah

$$\tau_i(t) = \hat{\theta}_i^T v_i + f_i \quad (11)$$

dimana $v_i = [e_i^T, \dot{q}_{di}]^T$ adalah vektor regresi, $\hat{\theta}_i = [k_{1i}, k_{2i}, k_{0i}]$ adalah vektor penguatan adaptif, dan f_i adalah sinyal tambahan untuk memperbaiki respon transient dan menkompensasi sebagian kopling antar sambungan. Gambar 1 menunjukkan prosedur kendali yang diusulkan dalam tulisan ini.

Sinyal tambahan f_i tersebut terdiri atas tiga komponen

$$f_i = f_{0i} + f_{1i} + f_{2i} \quad (12a)$$

$$f_{0i} = \hat{k}_{ci} \text{sign}(\dot{q}_{di}) \quad (12b)$$

$$f_{1i} = \hat{g}_i \quad (12c)$$

$$f_{2i} = \frac{\hat{h}_i^2 b_{mi}^T P e_i}{\hat{h}_i \|b_{mi}^T P e_i\| + \epsilon_i} \quad (12d)$$

dimana \hat{k}_{ci} dan \hat{g}_i adalah perkiraan koefisien gesek Coulomb dan beban gravitasi. P adalah matriks positif terhingga, $\epsilon_i > 0$ dan b_{mi} adalah matriks input model referensi yang akan ditentukan nanti. \hat{h}_i adalah fungsi skalar yang didefinisikan sebagai

$$\hat{h}_i = \hat{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|e_i\|^k, \quad (13)$$

dimana $\hat{\beta}_i$ adalah perkiraan konstanta batas β^* dalam Pers. 7 dilihat dari sambungan i . Parameter-parameter kira tersebut yang ditandai dengan " $\hat{\cdot}$ " dipekirakan secara langsung dengan hukum-hukum adaptasi yang akan diuraikan dibawah ini.

Masing-masing komponen dalam sinyal tambahan tersebut memiliki fungsi sebagai berikut:

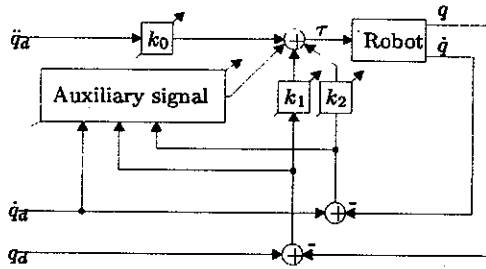
- (1) Komponen f_{0i} adalah kompensasi gaya gesek Coulomb dengan koefisien gesek Coulomb adaptif \hat{k}_{ci} .
- (2) Komponen f_{1i} digunakan untuk mengkompensasi gangguan step atau beban gravitasi.
- (3) Komponen f_{2i} mengkompensasi sebagian kopling antar sambungan. Kompensasi kopling adaptif ini adalah jenis kendali adaptif jenuh (Corless and Leitmann, 1983).

Dengan menggabung Pers. 11 dan Pers. 12a maka akan dihasilkan hukum kendali berikut ini:

$$\tau_i = \hat{\theta}_i^T v_i + \hat{\rho}_i^T w_i + \frac{\hat{h}_i^2 b_{mi}^T P e_i}{\hat{h}_i \|b_{mi}^T P e_i\| + \epsilon_i} \quad (14)$$

dimana $\hat{\rho}_i^T = [\hat{k}_{ci}, \hat{g}_i]^T$, $w_i = [\text{sign}(\dot{q}_{di}), 1]^T$.

Catatan 1. : Untuk menghindari ketidakkontinyuan torsi karena fungsi signum dalam kompensasi gaya gesek Coulomb f_{0i} , fungsi signum diganti dengan fungsi jenuh yang memiliki bentuk



Gambar 1. Prosedur kendali adaptif terdesentralisir

$$\text{sat}(\dot{q}_{d_i}) = \begin{cases} \dot{q}_{d_i}/\kappa & |\dot{q}_{d_i}| < \kappa, \\ \text{sign}(\dot{q}_{d_i}) & \text{bila tidak.} \end{cases} \quad (15)$$

dimana κ adalah lapisan batas yang harganya ditentukan secara percobaan ▲

Dengan memasukkan Pers. 11 dan Pers. 12a ke dalam dinamika robot pada Pers. 8 akan dihasilkan persamaan *state space* kesalahan *tracking*

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_{1i} & -k_{2i} \end{bmatrix} e_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left(\begin{aligned} & [m_{ii} - k_{0i}] \dot{q}_{d_i}(t) + [f_{c_i} - f_{0i}] \\ & + [g_i - f_{1i}] + [h_i - f_{2i}] \end{aligned} \right), \\ &= A_i e_i(t) + b_i \left[(m_{ii} - k_{0i}) \dot{q}_{d_i}(t) \right. \\ & \quad \left. + (f_{c_i} - f_{0i}) + (g_i - f_{1i}) + (h_i - f_{2i}) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{dimana } h_i = \left[\sum_{j \neq i}^n m_{ij}(q) \ddot{q}_j(t) \right] + c_i(q, \dot{q}) + f_{v_i} \dot{q}_i.$$

Unjuk kerja kesalahan *tracking* yang diinginkan dinyatakan dengan e_{m_i} dan diberikan oleh model referensi orde dua sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{m_i}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\xi\omega_i \end{bmatrix} e_{m_i}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} 0. \\ &= A_{m_i} e_{m_i}(t) + b_{m_i} 0, \end{aligned} \quad (17)$$

dimana ξ_i adalah faktor redaman, ω_i adalah frekuensi pribadi, dan $e_{m_i}(t) = [e_{m_i}(t), \dot{e}_{m_i}(t)]^T$ adalah vektor 2×1 kesalahan posisi dan kesalahan kecepatan yang diinginkan. Model referensi Pers. 17 dipilih berupa sistem yang stabil, sehingga ada matriks 2×2 konstan simetrik positif terhingga P dan suatu matriks positif terhingga Q yang memenuhi persamaan Lyapunov sebagai berikut:

$$A_{m_i}^T P + P A_{m_i} = -Q. \quad (18)$$

Dengan mengasumsikan bahwa kondisi awal *state* referensi untuk setiap subsistem adalah nol

$$e_{m_i}(0) = [e_{m_i}(0), \dot{e}_{m_i}(0)]^T = 0,$$

maka penyelesaian Pers. 17 akan tetap nol; yakni $e_{m_i}(t) \equiv 0$ untuk semua waktu t .

Hukum adaptasi yang diusulkan untuk memperkirakan parameter pengendali dalam Pers. 14 adalah (Indrawanto, 1998):

$$\dot{\hat{\theta}}_i = -\Gamma_i [(b_{m_i}^T P E_i) v_i + \sigma_i \hat{\theta}_i], \quad \hat{\theta}_i(0) > 0, \quad (19a)$$

$$\dot{\hat{\rho}}_i = -\Gamma_i [(b_{m_i}^T P E_i) w_i + \sigma_i \hat{\rho}_i], \quad \hat{\rho}_i(0) \geq 0, \quad (19b)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_i = \Gamma_i \left[\|b_{m_i}^T P E_i\| \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k - \sigma_i \hat{\beta}_i \right], \quad \hat{\beta}_i(0) > 0, \quad (19c)$$

dimana

$$E_i(t) = e_{m_i}(t) - e_i(t) \quad (20)$$

adalah vektor kesalahan adaptasi, $\Gamma_i > 0$ adalah penguatan adaptasi, $\sigma_i > 0$ adalah "modifikasi σ " untuk memperbaiki ketangguhan adaptasi karena dinamika yang taktermodelkan (Ioannou and Kokotovic, 1984).

Dengan mengurangkan Pers. 16 dari Pers. 17 maka akan dihasilkan dinamika kesalahan *tracking* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\xi\omega_i \end{bmatrix} E_i + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_{1i} & k_{2i} \\ m_{ii} & m_{ii} \end{bmatrix} e_i \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left(\begin{aligned} & [k_{0i} - m_{ii}] \dot{q}_{d_i} + [f_{0i} - f_{c_i}] \\ & + [f_{1i} - g_i] + [f_{2i} - h_i] \end{aligned} \right), \\ &= A_{m_i} E_i + b_i (\tilde{\theta}_i^T v_i + \tilde{\rho}_i^T w_i + f_{2i} - h_i), \end{aligned} \quad (21a)$$

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = \Gamma_i [-\sigma_i \tilde{\theta}_i - (b_{m_i}^T P E_i) v_i - \sigma_i \theta_i^*], \quad (21b)$$

$$\dot{\tilde{\rho}}_i = \Gamma_i [-\sigma_i \tilde{\rho}_i - (b_{m_i}^T P E_i) w_i - \sigma_i \rho_i^*], \quad (21c)$$

$$\dot{\tilde{\beta}}_i = \Gamma_i [-\sigma_i \tilde{\beta}_i - \|b_{m_i}^T P E_i\| \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k + \sigma_i \beta_i^*], \quad (21d)$$

dimana $\tilde{\theta}_i(t)$, $\tilde{\rho}_i(t)$, and $\tilde{\beta}_i(t)$ adalah kesalahan adaptasi parameter subsistem *ith* yang didefinisikan sebagai

$$\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i^*, \quad (22a)$$

$$\tilde{\rho}_i = \hat{\rho}_i - \rho_i^*, \quad (22b)$$

$$\tilde{\beta}_i = \hat{\beta}_i - \beta_i^*. \quad (22c)$$

dimana $\theta_i^* = [k_{1i}^*, k_{2i}^*, k_{0i}^*]$ adalah vektor parameter *matching* dengan $k_{1i}^* = \omega_i^2 m_{ii}$, $k_{2i}^* = 2\xi\omega_i m_{ii}$, dan $k_{0i}^* = m_{ii}$. Bila $\hat{\theta}_i$ tepat sama dengan θ_i^* , maka pasangan (A_i, b_i) dalam Pers. 16 sama dengan pasangan (A_{m_i}, b_{m_i}) dalam Pers. 17. $\rho_i^* = [k_{c_i}, g_i]$ adalah harga sesungguhnya dari koefisien gesek Coulomb dan beban gravitasi atau gangguan pada sambungan *i*, dan β_i^* adalah kontanta batas β^* Pers. 7 dilihat dari sambungan *i*.

Dalam menurunkan Pers. 21 diasumsikan bahwa m_{ii} dan $g_i(q)$ adalah "berubah pelan terhadap

waktu" dibandingkan dengan penguatan pengendali $\{k_1, k_2, k_0, f_1\}$, sehingga $\dot{\theta}_i^* \approx 0$ dan $\dot{\rho}_i^* \approx 0$.

Theorema: Penyelesaian $(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) (t; t_0, E_0, \bar{\theta}_0, \bar{\rho}_0, \bar{\beta}_0)$ dinamika kesalahan loop-tertutup Pers. 21 adalah terbatas *ultimate global (globally ultimately bounded)*.

Bukti: Pilih kandidat fungsi Lyapunov (Indrawanto, 1998)

$$V(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) = \sum_{i=1}^n \left[k_{0i}^* E_i^T P E_i + \bar{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \bar{\theta}_i + \bar{\rho}_i^T \Gamma_i^{-1} \bar{\rho}_i + \bar{\beta}_i^T \Gamma_i^{-1} \bar{\beta}_i \right]. \quad (23)$$

Adalah nyata bahwa $V(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) \geq 0$. Turunan fungsi ini terhadap dinamika kesalahan Pers. 21 adalah

$$\begin{aligned} \dot{V}(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) = & \sum_{i=1}^n \left[-k_{0i}^* E_i^T Q E_i - 2\sigma_i (\bar{\theta}_i + \theta_i^*)^T \bar{\theta}_i \right. \\ & - 2\sigma_i (\bar{\rho}_i + \rho_i^*)^T \bar{\rho}_i - 2\sigma_i (\bar{\beta}_i - \beta_i^*)^T \bar{\beta}_i \\ & \left. - 2 \|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k + 2 b_{m_i}^T P E_i (f_{2i} - h_i) \right]. \quad (24) \end{aligned}$$

Mengganti h_i dalam Pers. 24 dengan $\beta_i^* \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k$ yakni batas ketidakpastian yang didefinisikan dalam Pers. 7, dilihat dari sambungan i menghasilkan

$$\begin{aligned} \dot{V}(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) \leq & \sum_{i=1}^n \left[-k_{0i}^* E_i^T Q E_i - 2\sigma_i (\bar{\theta}_i + \theta_i^*)^T \bar{\theta}_i \right. \\ & - 2\sigma_i (\bar{\rho}_i + \rho_i^*)^T \bar{\rho}_i - 2\sigma_i (\bar{\beta}_i - \beta_i^*)^T \bar{\beta}_i \\ & - 2 \|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k \\ & \left. + 2 \|b_{m_i}^T P E_i\| \beta_i^* \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k + 2 b_{m_i}^T P E_i f_{2i} \right]. \quad (25) \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan Pers. 12d dan Pers. 22c kedalam Pers. 25 dan menggunakan kenyataan bahwa e dalam Pers. 20 adalah sama dengan $-E_i$, maka didapatkan:

$$\begin{aligned} \dot{V}(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) \leq & \sum_{i=1}^n \left[-k_{0i}^* E_i^T Q E_i - 2\sigma_i (\bar{\theta}_i + \theta_i^*)^T \bar{\theta}_i \right. \\ & - 2\sigma_i (\bar{\rho}_i + \rho_i^*)^T \bar{\rho}_i - 2\sigma_i (\bar{\beta}_i - \beta_i^*)^T \bar{\beta}_i \\ & + 2 \|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k \\ & \left. - 2 \frac{(b_{m_i}^T P E_i)^T (\bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k) (b_{m_i}^T P E_i)}{\|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k + \epsilon_i} \right]. \quad (26) \end{aligned}$$

Menyamakan penyebut kedua komponen terakhir Pers. 26 akan menghasilkan

$$\begin{aligned} \dot{V}(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) \leq & \sum_{i=1}^n \left[-k_{0i}^* E_i^T Q E_i - 2\sigma_i (\bar{\theta}_i + \theta_i^*)^T \bar{\theta}_i \right. \\ & - 2\sigma_i (\bar{\rho}_i + \rho_i^*)^T \bar{\rho}_i - \sigma_i (\bar{\beta}_i - \beta_i^*)^T \bar{\beta}_i \\ & \left. + \frac{\epsilon_i \|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k}{\|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k + \epsilon_i} \right]. \quad (27) \end{aligned}$$

Dengan menggunakan hubungan $2\theta_i^* \bar{\theta}_i \leq \|\theta_i^*\|^2 + \|\bar{\theta}_i\|^2$ dalam Pers. 27 maka akan dihasilkan:

$$\begin{aligned} \dot{V}(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) \leq & \sum_{i=1}^n \left[-k_{0i}^* E_i^T Q E_i - \sigma_i \|\bar{\theta}_i\|^2 + \sigma_i \|\theta_i^*\|^2 \right. \\ & - \sigma_i \|\bar{\rho}_i\|^2 + \sigma_i \|\rho_i^*\|^2 - \sigma_i \|\bar{\beta}_i\|^2 + \sigma_i \|\beta_i^*\|^2 \\ & \left. + \frac{\epsilon_i \|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k}{\|b_{m_i}^T P E_i\| \bar{\beta}_i \sum_{k=0}^2 \|E_i\|^k + \epsilon_i} \right], \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \leq & \sum_{i=1}^n \left[-k_{0i}^* E_i^T Q E_i - \sigma_i \|\bar{\theta}_i\|^2 + \sigma_i \|\theta_i^*\|^2 - \sigma_i \|\bar{\rho}_i\|^2 \right. \\ & \left. + \sigma_i \|\rho_i^*\|^2 - \sigma_i \|\bar{\beta}_i\|^2 + \sigma_i \|\beta_i^*\|^2 + \epsilon_i \right], \quad (29) \end{aligned}$$

$$\leq \sum_{i=1}^n \left[-\mu_i V_i(E_i, \bar{\theta}_i, \bar{\rho}_i, \bar{\beta}_i) + \eta_i \right], \quad (30)$$

$$\leq -\mu V(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) + \eta, \quad (31)$$

dimana $\mu_i = \min\{\lambda_{\min}^{-1}(P)\lambda_{\min}(Q), \lambda_{\min}(\Gamma_i)\sigma_i\}$, $\mu = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} \{\mu_i\}$, $\eta_i = \sigma_i \{\|\theta_i^*\|^2 + \|\rho_i^*\|^2 + \|\beta_i^*\|^2\} + \epsilon_i$, $\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i$, $\lambda_{\max}(\cdot)$ dan $\lambda_{\min}(\cdot)$ menunjukkan harga maksimum dan minimum matriks yang bersangkutan.

Dari Pers. 31, adalah nyata bahwa $V(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta})$ mengecil secara monoton sepanjang solusi dinamika kesalahan Pers. 21 sampai solusi tersebut mencapai set yang kompak

$$\Omega_f = \left\{ (E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) : V(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) \leq V_f \right\} \quad (32)$$

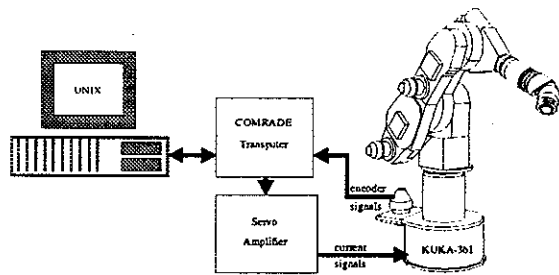
dimana

$$V_f = \mu^{-1} \eta. \quad (33)$$

Maka dapat disimpulkan bahwa solusi $(E, \bar{\theta}, \bar{\rho}, \bar{\beta}) (t; t_0, E_0, \bar{\theta}_0, \bar{\rho}_0, \bar{\beta}_0)$ dinamika kesalahan *tracking* Pers. 21 adalah terbatas secara *ultimate global (globally ultimately bounded)* dengan batas V_f .

Catatan 2. : Dari Pers. 33, set residu Ω_f dapat diperkecil sekecil mungkin dengan mengecilkan σ_i, ϵ_i dan membesarkan Γ_i . Tetapi dalam praktik, penguatan adaptasi yang besar Γ_i dapat menimbulkan osilasi yang pada perkiraan parameter dan mengecilkan $\epsilon_i \rightarrow 0$ akan menyebabkan komponen terakhir dari Pers. 14 menjadi fungsi signum yang dapat mengakibatkan perilaku *chatter*. Jadi, perancang dapat menentukan perimbangan antara ukuran set residu, penguatan adaptasi dan kemungkinan perilaku *chatter* ▲

Catatan 3. Dalam penurunan hukum adaptasi pengendali Pers. 21, diasumsikan bahwa $m_i(q)$ dan $g_i(q)$ bervariasi terhadap waktu secara pelan $\dot{\theta}_i^* \approx 0$ dan $\dot{\rho}_i^* \approx 0$. Asumsi ini tidak selalu membatasi bahwa lengan robot bergerak pelan, karena dalam penerapannya lengan robot dapat bergerak dengan cepat tetapi perubahan $m_{ii}(q)$ dan $g_i(q)$ adalah pelan. Suatu perubahan beban mendadak nyata-nyata melanggar asumsi tersebut. Tetapi, walaupun asumsi tersebut dilanggar, ada sinyal tambahan $f_{2i} = \frac{k_i^2 b_{m_i}^T P e_i}{h_i \|b_{m_i}^T P e_i\| + \epsilon_i}$ dalam



Gambar 2. Set-up percobaan dengan KUKA IR-361 hukum kendali Pers. 14 yang akan mempertahankan kestabilan sistem terhadap gangguan yang terbatas (Corless and Leitmann, 1983) ▲

4. HASIL PERCOBAAN

Dalam bagian ini, hasil-hasil teoritis yang dikembangkan dalam bagian tiga diterapkan pada tiga sambungan pertama robot industri KUKA-361 untuk uji dan evaluasi. Prosedur kendali diterapkan pada *platform* piranti lunak COMRADE⁴ (Witvrouw, 1996) dengan frekuensi cuplik 120 Hz.

Gambar 2 menunjukkan set-up percobaan. Dalam penerapannya, umpan maju percepatan tidak digunakan untuk menurunkan waktu perhitungan langsung, sehingga hukum kendali adaptif menjadi:

$$\tau_i = k_{1i}[q_{d_i} - q_i] + k_{2i}[\dot{q}_{d_i}(t) - \dot{q}_i(t)] + f_i \quad (34)$$

Lintasan sambungan yang diinginkan untuk setiap sambungan, seperti ditunjukkan Gambar 3, dibangkitkan berdasarkan *spline* orde 9 yang memiliki *jerk* \ddot{q}_{d_i} halus. Posisi sambungan robot KUKA-361 awalnya berada pada $q(0) = [-40^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$, dan diperintahkan untuk bergerak ke $q_d = [0^\circ, 40^\circ, 40^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$ dan kemudian diperintahkan bergerak kembali ke posisi awal.

Model referensi dalam Pers. 17 untuk setiap sambungan diberikan oleh

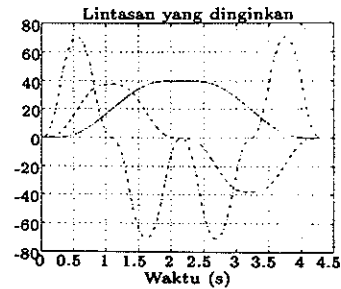
$$A_{m_i} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, b_{m_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3. \quad (35)$$

Dengan $Q = 2I_2$, dimana I_2 adalah matriks identitas 2×2 , dan solusi persamaan Lyapunov Pers. 18 adalah

$$P = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, b_{m_i}^T P = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T, i = 1, 2.$$

Gambar 4 menunjukkan hasil *tracking* menggunakan pengendali yang diusulkan setelah adaptasi

⁴ COMRADE (Compliant Motion Research And Development, piranti lunak yang dikembangkan di Mech. Eng. Dept., PMA Div., KU-Leuven, Belgium, untuk mengembangkan dan tuning tugas gerak tertahan pada robot)



Gambar 3. Lintasan yang diinginkan: garis penuh - posisi dalam derajat, garis putus - kecepatan deg/s, dan garis putus titik - percepatan dalam deg/s².

selama 20 detik. Dari Gambar 4, dapat ditunjukkan bahwa pengendali yang diusulkan berperilaku lebih baik (kesalahan *tracking* lebih kecil) dibandingkan dengan pengendali PD yang ada pada robot. Patut diperhatikan bahwa unjuk kerja *tracking* dari pengendali yang diusulkan masih dapat diperbaiki dengan menaikkan laju cuplik dan menambahkan umpan maju percepatan

5. KESIMPULAN

Suatu pengendali adaptif tangguh terdesentralisir untuk manipulator robot telah diuraikan. Pengembangan pendali tersebut berdasarkan kendali adaptif referensi model yang dikombinasikan dengan teknik kendali adaptif jenuh.

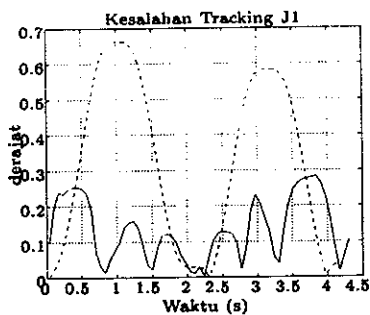
Pengendali yang diusulkan tidak memerlukan pengetahuan tentang model dinamika dari robot dan hanya menggunakan informasi lokal. Kestabilan global kesalahan *tracking* terjamin. Struktur kendali terdesentralisir yang diusulkan memiliki perhitungan sederhana sehingga prosedur tersebut dapat diterapkan pada mikroprosesor paralel dengan laju cuplik yang tinggi yang akan meningkatkan unjuk kerja sistem. Keandalan pengendali yang diusulkan telah ditunjukkan pada percobaan dengan robot industri KUKA 361.

6. PENGHARGAAN

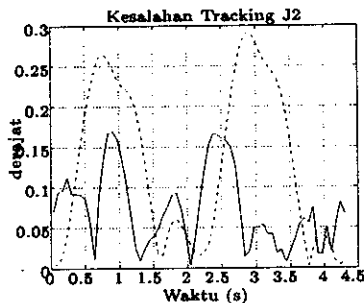
Terima kasih kepada Prof. H. Van Brussel dan Prof. J. Swevers, dari Afdeling PMA, Werktuigkunde, KU-Leuven Belgie, atas saran dan bantuan kepada penulis selama melakukan penelitian ini. Tulisan ini merupakan hasil penelitian pada program *Interuniversity Poles of attraction* (IUAP) pemerintah Belgia. Tanggungjawab *scientific* ada pada penulis.

7. PUSTAKA

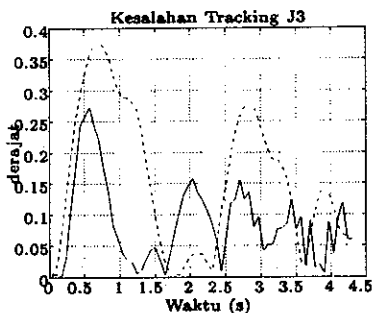
Corless, M J and G Leitmann (1983). Adaptive control for systems containing uncertain functions and unknown functions with uncertain bounds. *Journal of optimization theory applications* 41(1), 155-168.



4.1: Sambungan ke-satu J1



4.2: Sambungan ke-dua J2



4.3: Sambungan ke-tiga J3

Gambar 4. Kesalahan absolut *tracking* posisi, garis penuh kedali yang diusulkan, garis putus-putus kendali PD eksisting

Craig, John J, Ping Hsu and S Shankar Sasstry (1987). Adaptive control of mechanical manipulator. *The International Journal of Robotics Research* 6(2), 16-28.

Dawson, D M, Z Qu, F L Lewis and J F Dorsey (1990). Robust control for the tracking of robot motion. *International Journal of Control* 52, 581-595.

Fu, Li-Chen (1992). Robust adaptive decentralized control of robot manipulator. *IEEE Transactions on Automatic Control* 37(1), 106-110.

Gavel, Donald T and T C Hsia (1987). Decentralized adaptive control of robot manipulators. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. pp. 1230-1235.

Indrawanto (1998). Decentralized Adaptive Control for Robot Manipulators. PhD thesis. Me-

chanical Engineering Department, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Ioannou, Petros A and Petar V Kokotovic (1984). Robust redesign of adaptive control. *IEEE Transactions on Automatic Control* AC-29, 202-211.

Seraji, Homayoun (1989). Decentralized adaptive control of manipulators: Theory, simulation, and experimentation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5(2), 183-201.

Spong, Mark W and M Vidyasagar (1989). *Robot Dynamics and Control*. John Wiley & Sons. New York.

Spong, Mark W and R Ortega (1990). On adaptive inverse dynamics control of rigid robots. *IEEE Transactions on Automatic Control* 35(1), 92-95.

Witvrouw, Wim (1996). Development of Experiments and Environment for Sensor Controlled Robot Tasks. PhD thesis. Mech.Eng.Dept., Katholieke Universiteit Leuven - Belgium.