

NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC VÀ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG TELEOPERATION

Đặng Ngọc Trung*

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực điều khiển từ xa việc thực thi chính xác các tác vụ là điều cần thiết. Với mục đích đó, bài báo này tập trung xem xét về điều khiển vị trí của hệ Teleoperation gồm hệ thống Master (chủ động) và hệ thống Slave (bị động) – Hệ SMSS. Hệ thống SMSS có sử dụng luật điều khiển PID kinh điển, đảm bảo được vị trí của robot Slave chuyển động theo quỹ đạo cho trước của robot Master. Đây là một đề tài mới và đang được sự quan tâm rất lớn từ phía các nhà khoa học trên khắp thế giới, tiêu biểu như ở Nhật và châu Âu...

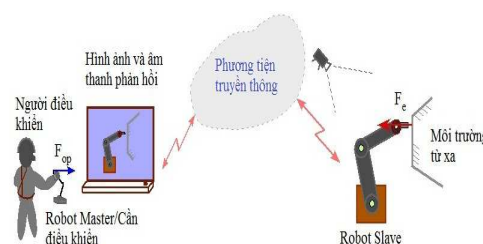
Từ khóa: Điều khiển hệ robot Master - Slave

ĐẶT VẤN ĐỀ

Teleoperation là một hệ thống thiết bị có sự tương tác ở khoảng cách khác nhau tương tự như một hệ thống “điều khiển từ xa” thường gặp trong học thuật và môi trường kỹ thuật. Các thiết bị trong hệ thống Teleoperation thường liên quan đến lĩnh vực robot (cố định hoặc di động) và có rất nhiều ứng dụng trong khoa học kỹ thuật và trong cuộc sống hàng ngày. Các thiết bị này thường được điều khiển từ xa bởi con người thông qua một trong các thiết bị thuộc hệ thống.

Hệ thống Teleoperation là một hệ thống cho phép con người sử dụng sự hiểu biết, khả năng tư duy và hoạt động chân tay của mình thông qua sự cộng tác điều khiển các robot khi điều hành làm việc ở các môi trường nguy hiểm độc hại. Trong trường hợp này, con người sử dụng hoạt động của mình để điều khiển robot Master và các thao tác của robot Slave được thực hiện theo sự điều khiển của robot Master và robot Slave này mới là robot trực tiếp có những tương tác với môi trường làm việc. Trong vài thập niên gần đây, hệ thống Teleoperation đã được phát triển với nhiều ứng dụng khác nhau như là được sử dụng ở ngoài vũ trụ, dưới đáy biển, trong các thiết bị hạt nhân, trong hoạt động phẫu thuật, trong điều khiển lái xe từ xa, trong cứu hộ... và các loại ứng dụng của hệ thống Teleoperation và các nghiên cứu về hệ thống này vẫn đang được các nhà khoa học theo đuổi [5].

Trong Teleoperation song phương, robot Master và robot Slave được sử dụng như một cặp thiết bị được bố trí ở hai phía và được kết nối với nhau qua kênh truyền thông, nơi mà các thông tin về vị trí, vận tốc, gia tốc hoặc lực được truyền. Trong quá trình truyền dữ liệu giữa robot Master và robot Slave có hiện tượng trễ trong kênh truyền thông. Trễ trong hệ thống vòng kín có thể làm mất tính ổn định và làm sai lệch việc thực hiện các hoạt động thao tác và làm giảm tính đồng nhất của hệ thống Teleoperation. Để phân tích sự ổn định Teleoperation song phương, nhiều nghiên cứu căn cứ trên tính thụ động để thành lập sự ổn định cho toàn hệ thống bằng cách sử dụng một hàm Lyapunov có liên quan đến các thông số của hệ thống.

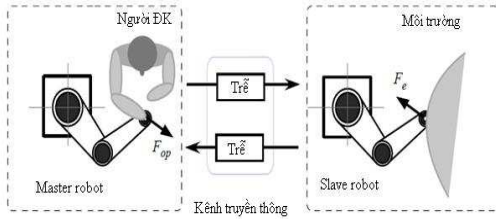


Hình 1. Hệ thống Teleoperation song phương ĐỘNG LỰC HỌC CHO HỆ SMSS

Giới thiệu

Xét một cặp của hệ thống robot của hệ thống SMSS được liên kết thông qua đường liên lạc với thời gian trễ biến thiên. Cấu hình của hệ thống này được thể hiện trong hình dưới.

* Email: trungcsktd@gmail.com



Hình 2. Hệ thống điều khiển từ xa một robot Master một robot Slave (SMSS)

Giả sử bỏ qua tác dụng của ma sát, các nhiễu khác và trọng lực, phương trình động lực học của robot Master và robot Slave với n bậc tự do được mô tả như sau [3], [4]:

$$\begin{cases} M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m = \tau_m + J_m^T F_{op} \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s = \tau_s - J_s^T F_e \end{cases} \quad (2.1)$$

Trong đó: m, n biểu thị chỉ số robot Master và Slave tương ứng.

$q_m, q_s \in R^{n \times 1}$ là vector góc của khớp.

$\dot{q}_m, \dot{q}_s \in R^{n \times 1}$ là vector vận tốc của khớp.

$\ddot{q}_m, \ddot{q}_s \in R^{n \times 1}$ là vector gia tốc của khớp.

$\tau_m, \tau_s \in R^{n \times 1}$ là vector momen đầu vào.

$F_{op} \in R^{n \times 1}$ là vector lực tác dụng lên robot Master bởi người điều khiển.

$F_e \in R^{n \times 1}$ là vector lực phản hồi lên robot Slave từ môi trường.

$M_m, M_s \in R^{n \times n}$ là ma trận quán tính xác định dương.

$C_m, C_s \in R^{n \times n}$ là ma trận Coriolis.

$J_m, J_s \in R^{n \times n}$ là ma trận Jacobi.

Xét hệ số cho biết tọa độ tay máy q_i , với $i = m, s$, hệ tọa độ đề các có quan hệ với hệ tọa độ này theo:

$$z = h(q(t)) \quad (2.2)$$

Trong đó: h_i là hàm chuyển tọa độ từ không gian khớp tới không gian làm việc.

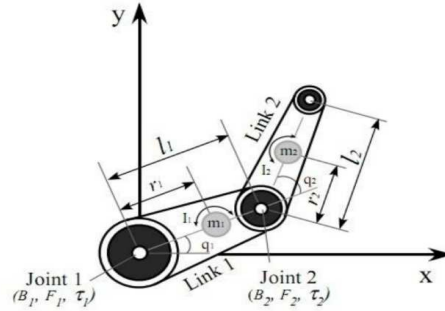
z_i là vị trí làm việc cuối của robot trong không gian làm việc.

Đạo hàm biểu thức trên thu được ma trận Jacobi như sau:

$$\dot{z} = J(q)\dot{q} \quad (2.3)$$

Phương trình động lực học robot

Ta có sơ đồ động học của 2 Robot Master và Robot Slave, 2 Robot này trong hệ thống SMSS có kết cấu giống nhau. Nên ta tính toán cho Robot Master



Hình 3. Robot 2 bậc tự do dạng tay nối tiếp

Trong đó :

q_i : góc quay khớp i .

m_i : khối lượng khâu i .

l_i : chiều dài khâu i .

I_i : momen quán tính với tâm đi qua trọng tâm của khâu i .

r_i : là khoảng cách từ tâm khớp đến trọng tâm của khâu i .

τ_i : là momen tác động vào khớp i .

F_i : là ngoại lực đặt tại khớp i .

B_i : là độ giảm chấn của khớp i .

Áp dụng định nghĩa hàm Lagrange ta có:

$$L = K - \Pi$$

Trong đó: L là hàm Lagrange

K là tổng động năng của hệ thống

Π là tổng thế năng

Đối với khâu 1: $\Pi_1 = 0$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2 = \frac{1}{2} (m_1 r_1^2 + I_1) \dot{q}_1^2$$

Đối với khâu 2: $\Pi_2 = 0$.

Về tọa độ: $x_2 = l_1 \cos q_1 + r_2 \cos(q_1 + q_2)$

$$y_2 = l_1 \sin q_1 + r_2 \sin(q_1 + q_2)$$

Về vận tốc: $v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} m_2 [l_1^2 \dot{q}_1^2 + r_2^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + 2l_1 r_2 \cos q_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2)] + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2$$

Áp dụng hàm Lagrange, ta có :

$$L = (K_1 + K_2) - (\Pi_1 + \Pi_2)$$

$$L = \frac{1}{2} (m_1 r_1^2 + I_1) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 [l_1^2 \dot{q}_1^2 + r_2^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + 2l_1 r_2 \cos q_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2)] + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2$$

Xét khâu 1:

$$F_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} - \frac{\partial L}{\partial q_1} = (m_1 r_1^2 + m_2 l_1^2 + I_1 + I_2) \ddot{q}_1 + (m_2 r_2^2 + 2m_2 l_1 r_2 \cos q_2) \ddot{q}_1 + (m_2 r_2^2 + m_2 l_1 r_2 \cos q_2 + I_2) \ddot{q}_2 - m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 r_2 \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \dot{q}_2$$

Xét khâu 2 :

$$F_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} - \frac{\partial L}{\partial q_2} = (m_2 r_2^2 + I_1) (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + m_2 l_1 r_2 \cos q_2 \ddot{q}_1 + m_2 l_1 r_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2$$

Đặt : $M_{m1} = m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + r_2^2) + I_1 + I_2$
 $M_{m2} = m_2 r_2^2 + I_1$
 $R_m = m_2 l_1 r_2$

Ta có:

$$F_1 = (M_{m1} + 2R_m \cos q_2) \ddot{q}_1 + (M_{m2} + R_m \cos q_2) \ddot{q}_2 - R_m \sin q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - R_m \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \dot{q}_2$$

$$F_2 = (M_{m2} + R_m \cos q_2) \ddot{q}_1 + M_{m2} \ddot{q}_2 + R_m \sin q_2 \dot{q}_1^2$$

Phương trình động lực học của robot Master được viết lại dưới dạng sử dụng hàm Lagrange như sau:

$$M_m(q) \ddot{q} + C_m(q, \dot{q}) \dot{q} = \tau + J_m^T F \tag{2.4}$$

Trong đó: $q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$

$$M_m = \begin{bmatrix} M_{m1} + 2R_m \cos q_2 & M_{m2} + R_m \cos q_2 \\ M_{m2} + R_m \cos q_2 & M_{m2} \end{bmatrix}$$

$$C_m = \begin{bmatrix} -R_m \sin q_2 \dot{q}_2 & -R_m \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ -R_m \sin q_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matrận Jacobi :

$$J_m = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

Tương tự tính toán cho Robot Slave

$$M_s(q) \ddot{q} + C_s(q, \dot{q}) \dot{q} = \tau + J_s^T F \tag{2.5}$$

Động lực học của hệ Teleoperation trong miền không gian làm việc

Giả thiết 2.3.1 J_m và J_s là khả đảo và không kỳ dị ở tất các thời điểm hoạt động.

Chú ý: số bậc tự do của robot Slave lớn hơn của robot Master $n_i > m$

Ta có z là vị trí khâu cuối, đạo hàm z theo thời gian ta có mối quan hệ giữa vận tốc trong không gian làm việc với vận tốc góc:

$$\dot{z}(t) = J(q_k) \dot{q}(t) \quad k = m, s \tag{2.6}$$

Đạo hàm tiếp theo thời gian ta có :

$$\ddot{z}(t) = J(q_k) \ddot{q}(t) + \dot{J}(q_k) \dot{q}^2(t) \quad k = m, s \tag{2.7}$$

Với \ddot{z} là vecto gia tốc khâu cuối. Thay (2.6),

(2.7) vào (2.1) chúng ta có thể nhận được hệ động lực học trong không gian làm việc như

$$\text{sau: } \begin{cases} \tilde{M}_m(q_m) \ddot{z}_m + \tilde{C}_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{z}_m = \tau'_m + F_{op} \\ \tilde{M}_s(q_s) \ddot{z}_s + \tilde{C}_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{z}_s = \tau'_s - F_e \end{cases} \tag{2.8}$$

Trong đó : $\tilde{M}_k = J_k^{-T} M_k J_k^{-1}$

$$\tilde{C}_m = J_k^{-T} (C_k - M_k J_k^{-1} \dot{J}_k) J_k^{-1}$$

$$\tau'_k = J_k^{-T} \tau_k \quad (k = m, s)$$

Giả thiết 2.3.2 Lực tác động của người F_{op} và lực môi trường F_e là bị giới hạn

Giả thiết 2.3.3 Người tác động và môi trường có thể được mô hình như những hệ thống thụ động tương ứng.

Với giả thiết này người tác động được mô tả như sau:

$$\int_0^t -F_{op}^T(\xi) \dot{z}_m(\xi) d\xi \geq 0 \tag{2.9}$$

và môi trường từ xa được mô tả như sau:

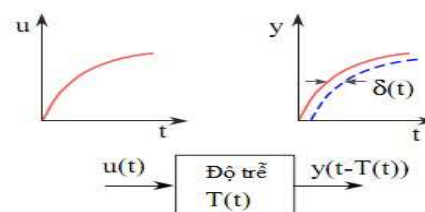
$$\int_0^t F_e^T(\xi) \dot{z}_s(\xi) d\xi \geq 0 \tag{2.10}$$

Trong đó \dot{z}_m, \dot{z}_s là các vận tốc của Robot Master và Robot Slave.

Độ trễ trên kênh truyền thông

Đặt $T_i : R \rightarrow R^+, i = m, s$ là thời gian phụ thuộc thời gian trễ trên kênh truyền thông đi ($i=m$) và về ($i=s$) tương ứng.

Mô hình độ trễ được đưa ra trong hình dưới, $u(t)$ là đầu vào, $y(t-T(t))$ là đầu ra trễ, $\delta(t)$ là sai số điều chỉnh của hệ thống.



Hình 4. Mô hình thời gian trễ

Nếu vị trí và vận tốc của Master và Slave truyền tới nhau với độ trễ $T_{m/s}$, các tín hiệu trễ được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \hat{z}_m(t) &= z_m(t - T_m(t)); \dot{\hat{z}}_m(t) = \dot{z}_m(t - T_m(t))\dot{T}_m(t) \\ \hat{z}_s(t) &= z_s(t - T_s(t)); \dot{\hat{z}}_s(t) = \dot{z}_s(t - T_s(t))\dot{T}_s(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Trong đó: $T_m(t)$ và $T_s(t)$ được giả thiết là thời gian trễ biến thiên.

THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ SMSS

Mục tiêu điều khiển

Ta sẽ thiết kế τ_m và τ_s để đạt được sự đồng bộ trong không gian làm việc cho hệ teleoperation với cấu hình robot Master, Slave khác nhau và có độ trễ trên kênh truyền thông.

Ta xác định sai lệch vị trí của khâu chấp hành cuối như sau [1], [2]:

$$\begin{cases} e_m(t) = z_s(t - T_s) - z_m(t) \\ e_s(t) = z_m(t - T_m) - z_s(t) \end{cases} \quad (2.12)$$

Trong đó: T_m và T_s là thời gian trễ

z_m, z_s là vị trí của khâu chấp hành cuối.

Thiết kế điều khiển

Ta thiết bộ điều khiển cho robot Master và Slave theo luật PD như

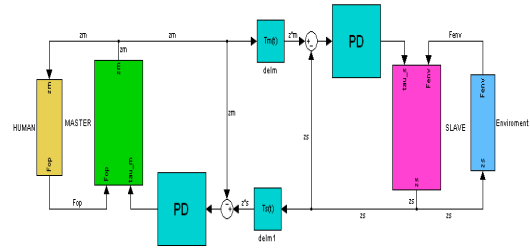
$$\begin{cases} \tau'_m = K_P^m(-z_m + \hat{z}_s) + K_D^m(-\dot{z}_m + \dot{\hat{z}}_s) \\ \tau'_s = K_P^s(-z_s + \hat{z}_m) + K_D^s(-\dot{z}_s + \dot{\hat{z}}_m) \end{cases} \quad (2.13)$$

Với: $\hat{z}_s = z_s(t - T_s)$
 $\hat{z}_m = z_m(t - T_m)$
 T_m, T_s là thời gian trễ (= const)

Thay vào (2.8) ta có hệ như sau:

$$\begin{cases} \tilde{M}_m(q_m)\ddot{z}_m + \tilde{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{z}_m = K_P^m(-z_m + \hat{z}_s) + K_D^m(-\dot{z}_m + \dot{\hat{z}}_s) + F_{op} \\ \tilde{M}_s(q_s)\ddot{z}_s + \tilde{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{z}_s = K_P^s(-z_s + \hat{z}_m) + K_D^s(-\dot{z}_s + \dot{\hat{z}}_m) + F_e \end{cases} \quad (2.14)$$

Sử dụng phản hồi thụ động (Feedback Passivation) như phương trình (2.13), động lực học robot Master và Slave bị động, có các đầu ra chứa cả thông tin về vị trí và vận tốc khâu chấp hành cuối. Do đó hệ thống Teleoperation có thể được điều khiển trong cơ cấu bị động cho những tín hiệu vị trí và vận tốc khâu chấp hành cuối bằng những đầu ra mới.



Hình 5. Sơ đồ khối điều khiển 2 kênh

Phân tích tính ổn định của hệ thống

+ Xét Robot Master :

Vecto trạng thái đầu vào $z_m = (z_m^T, \dot{z}_m^T)^T$,

kích thích $u = (\hat{z}_s, \dot{\hat{z}}_s)^T$

Xét hàm $V_m = \frac{1}{2} \dot{z}_m^T \tilde{M}_m \dot{z}_m + \frac{1}{2} z_m^T K_P^m z_m -$

$$\int_0^t F_{op}^T(\xi) \dot{z}_m(\xi) d(\xi)$$

Ta có: \tilde{M}_s, K_P^m là các ma trận xác định dương.

Do đó: $V_m \geq 0$

$$\dot{V}_m = -\dot{z}_m^T (K_D^m - \theta_m) \dot{z}_m - \dot{z}_m^T (\theta_m \dot{z}_m - K_P^m \hat{z}_s - K_D^m \dot{\hat{z}}_s)$$

Với điều kiện :

$$\forall |\dot{z}_m| \geq (K_P^m |\hat{z}_s| + K_D^m |\dot{\hat{z}}_s|) \theta_m^{-1}$$

Chọn: $K_D^m \geq \theta_m$

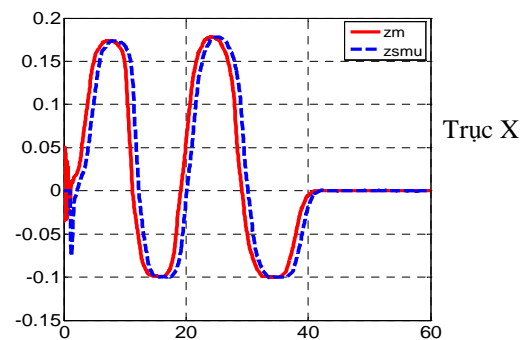
Suy ra: $\dot{V}_m \leq -\dot{z}_m^T (K_D^m - \theta_m) \dot{z}_m \leq 0$

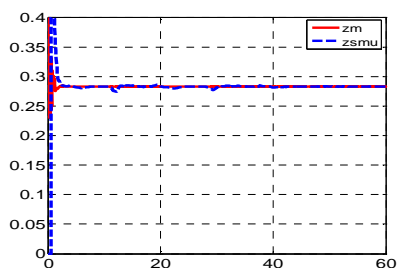
Do đó hệ thống Master là “ đầu vào đến trạng thái ổn định” cục bộ

Tương tự chứng minh tính ổn định cho Robot Slave ta cũng có kết quả ổn định.

Kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển SMSS

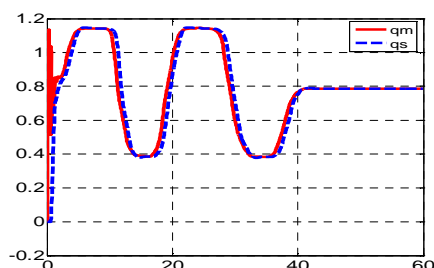
Với $T_m = T_s = 0.5$



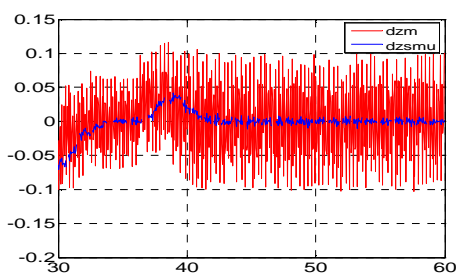


Trục Y

Hình 6. Vị trí Master và Slave có trễ



Hình 7. Góc quay của Master và Slave



Hình 8. Vận tốc của Master và Slave

Nhận xét : Từ các đồ thị trên cho thấy quỹ đạo của robot Master và Slave trong trường hợp robot Slave không tương tác với môi trường, quỹ đạo và vận tốc của robot Slave bám tương đối sát với quỹ đạo và vận tốc của robot Master. Tuy nhiên, hệ thống mất ổn định trong vài giây đầu, nhưng phương pháp điều khiển này đã đưa hệ thống tiến đến trạng thái ổn định. Độ trễ trên kênh truyền thông có ảnh hưởng rất lớn đến sai lệch về vị trí giữa Robot Master và Robot Slave

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nguyễn Doãn Phước, Phan Xuân Minh, Hán Thành Trung (2003), *Lý thuyết điều khiển phi tuyến*, Nxb Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
 [2]. Nguyễn Thương Ngô (1999), *Lý thuyết điều khiển tự động hiện đại*, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật.
 [3]. Nguyễn Văn Khang (2007), *Động lực học hệ nhiều vật (Dynamics of Multibody Systems)*, Nxb Khoa học Kỹ thuật.
 [4]. Nguyễn Thiện Phúc (2006), *Robot công nghiệp*, Nxb Khoa học Kỹ thuật.
 [5]. Nam D. D. And T. Namerikawa: Four-channel Force-Reflecting Teleoperation with Impedance Control, *Int. Journal of Advanced Mechatronic Systems*, Vol.2, No.5/6, pp.318-329,2010.

SUMMARY

A RESEARCH ON DYNAMICS AND CONTROL OF TELEOPERATION SYSTEM

Dang Ngọc Trung*
College of Technology - TNU

In the field of remote control, the task of the correct execution is essential. For that purpose, this paper focuses on the position control system of the Teleoperation system with Master (active) and Slave system (passive) - SMSS system using classical PID control law ensures the position of the slave robot to move following the Master robot's trajectory. This is a new topic and is great interest of the scientists around the world, especially, in Japan and Europe ...etc.

Keywords: Control robot Master - Slave system

Ngày nhận bài:15/3/2013, ngày phản biện:16/4/2013, ngày duyệt đăng:24/4/2013

* Email: trungcsktd@gmail.com