

ĐIỀU KHIỂN TELE-MANIPULATOR

Từ Diệp Công Thành

Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 01 tháng 06 năm 2010, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 27 tháng 10 năm 2010)

TÓM TẮT: Hiện nay trên thế giới, hầu hết các vấn đề tương tác giữa con người và các môi trường nguy hiểm, độc hại, lây nhiễm hoặc vô trùng đều được giải quyết bằng kỹ thuật robot. Trong đó, một trong những giải pháp mang tính khả thi, ổn định và trực quan nhất là kỹ thuật Tele-Manipulator. Bằng cách sử dụng tay máy tương tự để ghi nhận các chuyển động và hành vi của người điều khiển trong môi trường an toàn, sau đó truyền các thông số này qua mạng LAN cho tay máy chính thực hiện đúng theo hành vi của người điều khiển trong môi trường độc hại và nguy hiểm hoặc vô trùng là hướng nghiên cứu đề xuất trong bài báo này.

Từ khoá: Tele-Manipulator, mạng LAN, điều khiển.

1. GIỚI THIỆU

Tele-Manipulator (TM) là hệ thống được điều khiển từ xa gồm 2 cánh tay máy: master và slave. Tay máy slave sẽ được điều khiển để thực hiện các chuyển động giống hệt như tay máy master. Để thực hiện điều khiển này, tay máy master sẽ được con người điều khiển. Các chuyển động mong muốn của con người sẽ được tay máy master ghi nhận bằng các cảm biến đo góc chuyển động. Và các giá trị này sẽ được truyền qua vi mạch điện tử ghi nhận, xử lý và gửi đến bộ điều khiển tay máy slave.

Tay máy slave hay còn gọi là tay máy thực thi thực hiện các chuyển động theo cánh tay master. Sự chuyển động này thực hiện tức thời dựa vào các giá trị chuyển động mà tay máy master ghi nhận được. Thông thường các giá trị này được truyền qua từ xa bằng nhiều phương pháp khác nhau như: mạng Lan, internet, sóng vô tuyến v.v...nên toàn bộ hệ thống tay máy và điều khiển được gọi là Tele-Manipulator.

Năm 1898, Nikola Tesla đã đưa ra mô hình thuyền điều khiển bằng sóng radio đầu tiên ở NewYork thì đến nay TM đã có lịch sử phát triển hơn một thế kỷ [1]. Hệ thống TM thực sự đầu tiên dạng master - slave được chế tạo là một cơ cấu thuần cơ khí được R.Goertz phát triển vào cuối năm 1940 tại Phòng thí nghiệm quốc gia Argone [2]. Năm 1954, R.Goertz phát triển hệ thống thao tác điện cơ đầu tiên với bộ điều khiển servo. Với sự phát triển của kỹ thuật ngày càng hiện đại thì hệ thống TM xuất hiện trong nhiều lĩnh vực phục vụ hiệu quả nhiều cho con người như: tay máy phẫu thuật từ xa trong y tế [3], cánh tay dò tìm chất nổ trong quốc phòng, tay máy trên các tàu thám hiểm, chinh phục không gian [4], tay máy gấp chất đốt hạt nhân trong công nghiệp điện nguyên tử, tay máy trên các tàu lặn nghiên cứu đáy biển [5], v.v...

Để thực thi điều khiển TM cũng như khả năng giám sát và đáp ứng thời gian thực, một số nghiên cứu liên quan đến thuật toán và mô hình

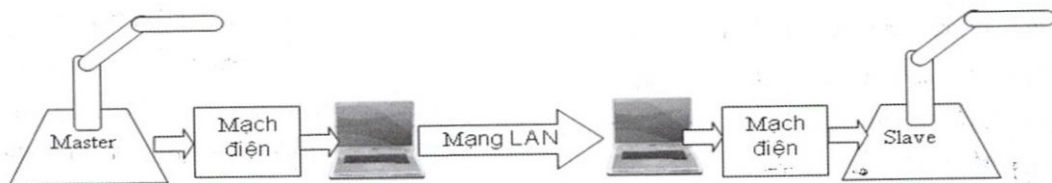
điều khiển hệ thống được trình bày như: điều khiển thích nghi sử dụng thuật toán điều khiển trượt được trình bày bởi Platon [6], kỹ thuật giảm thời gian truyền qua mạng trong điều khiển TM được đề nghị bởi Lee [7], Sano đề xuất kỹ thuật bù thời gian trễ trong điều khiển TM [8], Towhidkhal với mô hình hoá và điều khiển tuyến tính [9], và điều khiển trợ với sự trễ ngẫu nhiên của thời gian được đề xuất bởi Prokopiou [10], v.v...

Trong phạm vi giới hạn của bài báo, thuật toán tự thay đổi hệ thống điều khiển PID theo hướng tính toán của mạng thần kinh nhân tạo được đề xuất để điều khiển tay máy 3 bậc tự do thông qua mạng LAN. Kết quả đạt được từ mô hình hệ thống Tele-Manipulator và thực thi điều khiển sẽ được trình bày thông qua thực nghiệm điều khiển hệ thống.

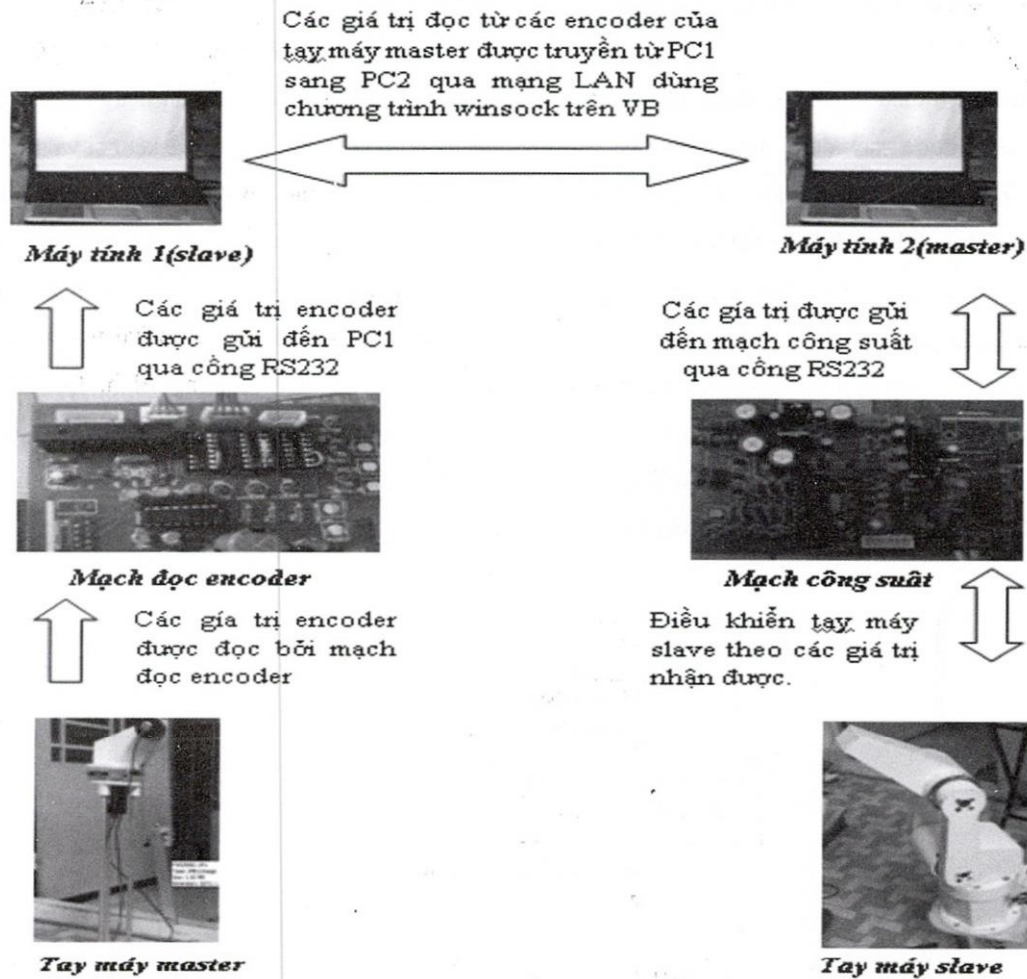
2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Hệ thống điều khiển tổng quan được trình bày trên hình 1. Hệ thống bao gồm tay máy

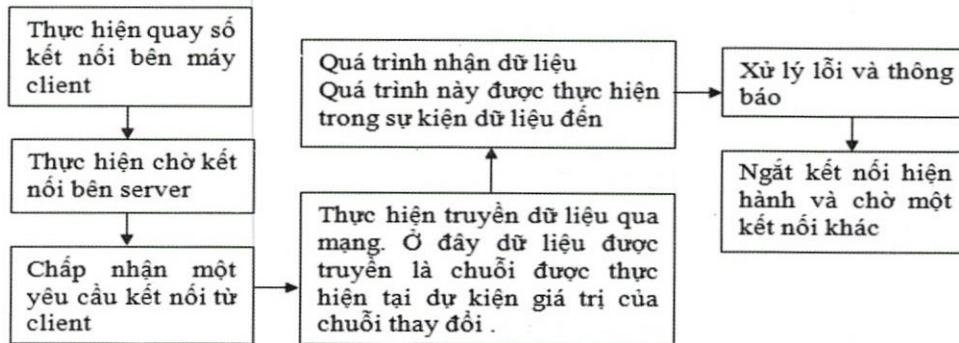
master được điều khiển bởi con người và tay máy slave thực thi các chuyển động bắt chước theo tay máy master. Các thông số về chuyển động của tay máy master được ghi nhận bởi các encoder (Omron E6C-CWZ1C 1000R/P) và gửi đến máy tính 1 (Pentium IV 2.4 Ghz) thông qua các mạch vi xử lý hỗ trợ (DSPIC-2010). Máy tính 1 truyền các thông tin này qua mạng LAN đến máy tính 2 (Pentium IV 2.4 Ghz). Sau đó máy tính 2 thực hiện các giải thuật điều khiển cần thiết để điều khiển hành vi của tay máy slave sử dụng động cơ DC (Hitachi DC Motor 24VDC, hộp giảm tốc 15 lần, đĩa xung 100xung/vòng) sao cho đáp ứng đúng với các yêu cầu từ tay máy master. Các mạch điện hỗ trợ và điều khiển được thực hiện và sử dụng vi điều khiển DSPIC-2010. Phần mềm điều khiển và truyền thông qua mạng LAN được thực hiện trên nền phần mềm Visual Basic. Sơ đồ khối của hệ thống được trình bày trên hình 2.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống



Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống



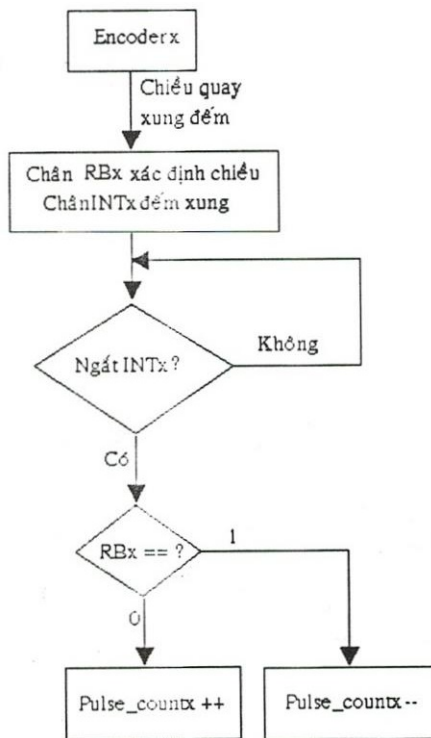
Hình 3. Qui trình truyền nhận và kết nối giữa 2PC

3. ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG

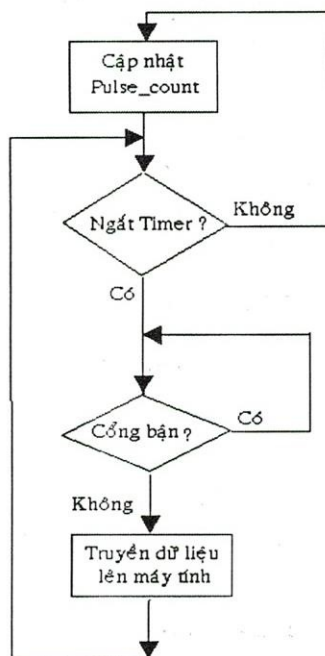
3.1. Nghi thức giao tiếp truyền nhận qua mạng LAN

Phần mềm điều khiển và truyền nhận qua mạng LAN được xây dựng trên nền Visual Basic. Để truyền nhận qua mạng LAN, Winsock Control được đi kèm với Visual Basic dùng để phát triển các ứng dụng cho phép truy xuất các chức năng TCP/IP. Winsock là một chuẩn đã được triển khai bởi Microsoft dựa trên một tập tin thủ tục truyền dữ liệu trên TCP/IP. Các thủ tục này nằm trong các thư viện liên kết động (DLL) và chạy trên Windows. Chúng ta sẽ

tạo ra hai chương trình một ở client và một ở server, hai chương trình này sẽ tương tác với nhau để truyền dữ liệu qua lại. Client sẽ gửi yêu cầu lên server, server sẽ lấy dữ liệu từ Database và trả dữ liệu về cho client. Để kết nối và truyền dữ liệu qua mạng LAN, trước tiên phải điều chỉnh các thông số của windows và đặt hai máy tính cùng một workgroup, điều chỉnh IP tĩnh cho hai máy, sau khi kiểm tra hai máy đã kết nối, tiến hành chạy chương trình. Qui trình truyền nhận, kết nối giữa 2PC được trình bày trên hình 3.



Hình 4. Lưu đồ giải thuật đọc encoder



Hình 5. Lưu đồ giải thuật truyền nhận dữ liệu từ vi điều khiển lên máy tính thứ nhất

3.2. Lưu đồ giải thuật điều khiển

Sau khi đã kết nối thành công 2 máy tính, chương trình thực hiện quá trình điều khiển như sau:

- Mạch đọc encoder thực hiện đọc giá trị vị trí các góc của tay máy master. Lưu đồ giải thuật đọc encoder được trình bày trên hình 4

- Thực hiện gửi giá trị encoder về máy tính thứ nhất thông qua chuẩn giao tiếp RS232 và lưu đồ truyền nhận được trình bày trên hình 5.

- Máy tính thứ nhất thực hiện gửi giá trị encoder cho máy tính thứ 2

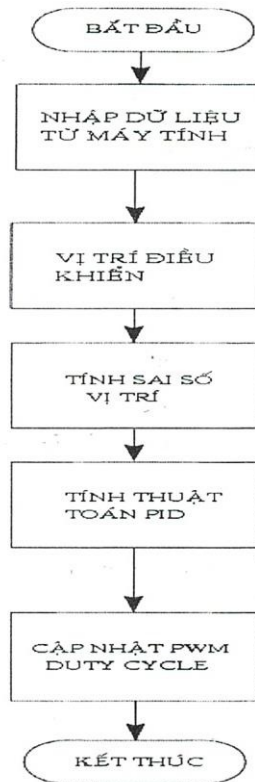
- Máy tính thứ 2 thực hiện gửi giá trị encoder xuống vi điều khiển PIC để điều khiển

tay máy slave. Quy trình tương tự như gửi/nhận dữ liệu từ vi điều khiển về máy tính thứ 1.

- PIC thực hiện tính toán giải thuật điều khiển PID theo hướng tính toán của mạng thần kinh nhân tạo và xuất giá trị điều khiển theo dạng PWM để điều khiển động cơ. Lưu đồ giải thuật điều khiển động cơ của tay máy slave được trình bày trên hình 6.

- Cập nhật giá trị góc tay máy slave và gửi về máy tính thứ 2

- Máy tính thứ 2 gửi vị trí tay máy slave cho máy tính số 1 và hiển thị lên đồ thị



Hình 6. Lưu đồ giải thuật điều khiển động cơ dùng PIC

3.3. Thuật toán điều khiển động cơ

Những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của lý thuyết điều khiển hiện đại như điều khiển thích nghi (Adaptive Control), điều khiển mờ (Fuzzy Logic Control), mạng nơron nhân tạo (Artificial Neural Network), đã mang đến những giải pháp tốt hơn cho các bài toán thiết kế trong thực tế. Tuy nhiên, PID vẫn là bộ điều khiển được sử dụng rộng rãi (nhất là trong công nghiệp, PID có thể đáp ứng tương đối tốt với các yêu cầu điều khiển của các hệ thống không quá nghiệp), bởi giá thành của nó rẻ và đơn giản trong thiết kế.

Về mặt lý thuyết điều khiển, PID là sự kết hợp của ba khâu: tỉ lệ (P), tích phân (I), vi phân

(D). Phương trình vi phân của bộ điều khiển PID là:

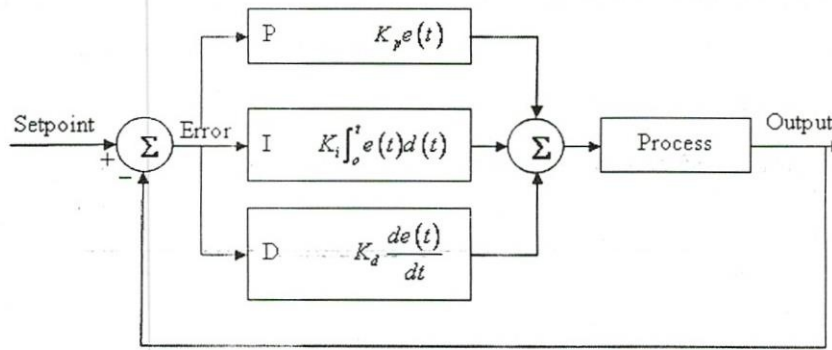
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{de(t)}{d(t)} \quad (1)$$

$u(t)$ là tín hiệu điều khiển (ngõ ra của PID).

$e(t)$ là sai số giữa tín hiệu tham chiếu và tín hiệu thực.

K_p là hệ số khuếch đại tỉ lệ, K_d là hệ số khuếch đại của khâu vi phân, K_i là hệ số khuếch đại của khâu tích phân nhằm triệt tiêu sai số ở chế độ xác lập.

Sơ đồ khối bộ điều khiển PID được trình bày trên hình 7



Hình 7. Sơ đồ khối của bộ điều khiển PID

Ngày nay, mạng nơron được chứng minh là một phương pháp hứa hẹn để giải quyết vấn đề điều khiển phi tuyến phức tạp. Vì vậy, ta kết hợp mạng nơron với điều khiển PID. Bộ điều khiển này sẽ kết hợp tính đơn giản của điều khiển PID và khả năng học, khả năng thích nghi, và khả năng giải quyết sự phi tuyến của mạng nơron.

Cấu trúc của thuật toán điều khiển PID phi tuyến dựa trên mạng nơron được thể hiện ở hình 8. Đây là một thuật toán điều khiển mới và có những đặc tính như là cấu trúc đơn giản và thời gian tính toán ít. Bộ điều khiển PID kết hợp với mạng nơron có thể giải quyết được những vấn đề của hệ thống, đó là sự phi tuyến của nó. Tín

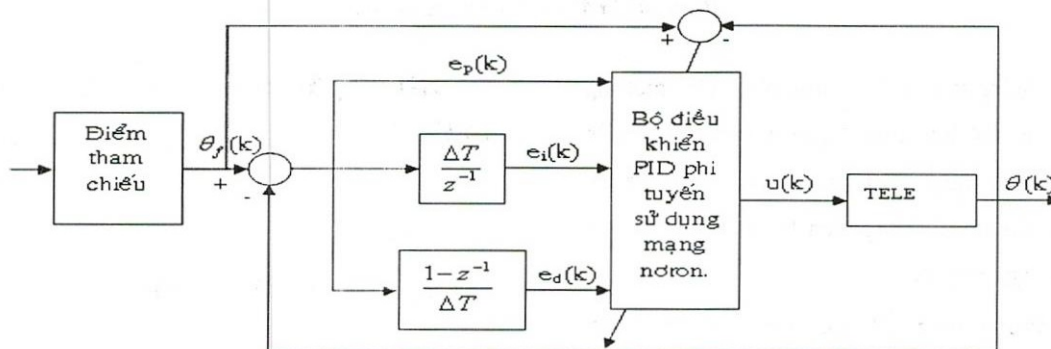
hiệu vào điều khiển u có thể thu được từ phương trình như sau:

$$u(x) = f(x) \quad (2)$$

Trong đó x là tín hiệu vào của hàm sigmoid $f(x)$

$$f(x) = \frac{2(1 - e^{-x.Y_g})}{Y_g(1 + e^{-x.Y_g})} \quad (3)$$

Ở đây, Y_g là thông số xác định hình dạng của hàm sigmoid. Hình 9 trình bày hình dạng hàm sigmoid với biến Y_g . Như đã trình bày trong (3), hàm sigmoid $f(x)$ trở thành hàm tuyến tính khi Y_g trở thành 0.

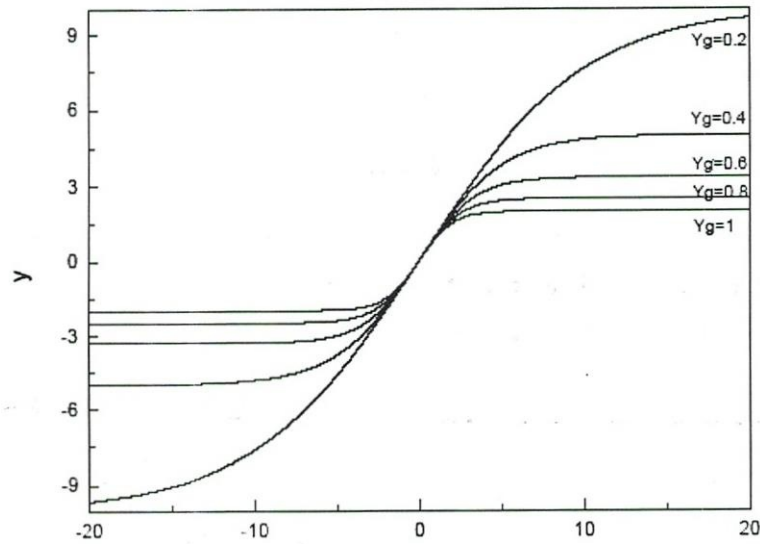


Hình 8. Cấu trúc của bộ điều khiển PID phi tuyến sử dụng mạng nơron

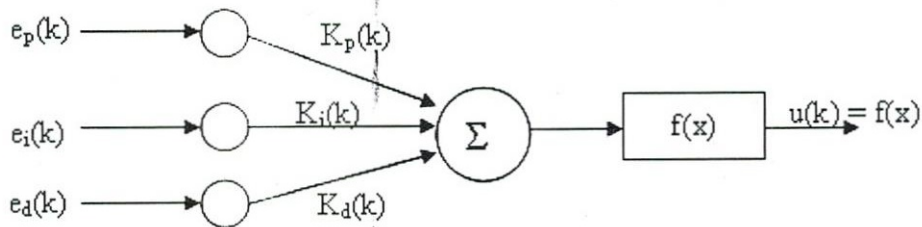
Giản đồ khối của mạng nơron được thể hiện trong hình 4.

Ở đây, $K_p, K_i, K_d, e_p, e_i, e_d$ là độ lợi tỷ lệ, tích phân, vi phân, sai số giữa tín hiệu tham

chiều và tín hiệu thực, tích phân của sai số hệ thống và vi phân của sai số hệ thống.



Hình 9. Hình dạng của hàm Sigmoid



Hình 10. Sơ đồ khối của mạng nơron.

Chúng ta có 2 lớp nơron phi tuyến, một lớp vào và một lớp xuất. Mạng nơron được huấn luyện bởi thuật toán lan truyền ngược để tối thiểu sai số hệ thống giữa tín hiệu thực và tín hiệu tham chiếu.

Trong hình 10, tín hiệu vào của hàm Sigmoid trong lớp xuất, x trở thành :

$$x(k) = K_p(k) e_p(k) + K_i(k) e_i(k) + K_d(k) e_d(k) \quad (4)$$

Với

$$e_p(k) = \theta_f(k) - \theta(k)$$

$$e_i(k) = \sum_{n=1}^k e_p(n) \Delta T \quad (5)$$

$$e_d(k) = \frac{e_p(k)(1-z^{-1})}{\Delta T}$$

ΔT : thời gian lấy mẫu.; k : bước thứ k .

$\theta_f(k), \theta(k)$ là giá trị tham chiếu của tín hiệu ra và tín hiệu ra thực. Để chỉnh những độ lợi của bộ điều khiển PID, sử dụng phương pháp giảm dốc nhất, ta có:

$$\begin{aligned} K_p(k+1) &= K_p(k) - \eta_p \frac{\partial E(k)}{\partial K_p} \\ K_i(k+1) &= K_i(k) - \eta_i \frac{\partial E(k)}{\partial K_i} \\ K_d(k+1) &= K_d(k) - \eta_d \frac{\partial E(k)}{\partial K_d} \end{aligned} \quad (6)$$

Với η_p, η_i, η_d là tốc độ học, và $E(k)$ là sai số được định nghĩa bởi phương trình sau:

$$E(k) = \frac{1}{2} (\theta_f(k) - \theta(k))^2 \quad (7)$$

Từ (6), sử dụng quy tắc chuỗi, chúng ta được phương trình sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(k)}{\partial K_p} &= \frac{\partial E(k)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial x} \frac{\partial x(k)}{\partial K_p} \\ \frac{\partial E(k)}{\partial K_i} &= \frac{\partial E(k)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial x} \frac{\partial x(k)}{\partial K_i} \\ \frac{\partial E(k)}{\partial K_d} &= \frac{\partial E(k)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial x} \frac{\partial x(k)}{\partial K_d} \end{aligned} \quad (8)$$

Những phương trình sau được suy ra từ những phương trình (2), (4), (7)

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \theta} = -(\theta_f(k) - \theta(k)) = -e_p(k)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial \theta} = f'(x(k))$$

$$\frac{\partial x(k)}{\partial K_p} = e_p(k) \quad (9)$$

$$\frac{\partial x(k)}{\partial K_i} = e_i(k)$$

$$\frac{\partial x(k)}{\partial K_d} = e_d(k)$$

Và những biểu thức theo sau có thể tìm thấy được từ những phương trình (8), (9).

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(k)}{\partial K_p} &= \frac{\partial E(k)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial x} \frac{\partial x(k)}{\partial K_p} \\ &= -e_p(k) \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} f'(x(k)) e_p(k) \\ &= -\frac{\partial \theta(k)}{\partial u} f'(x(k)) e_p(k) e_p^2(k) \\ \frac{\partial E(k)}{\partial K_i} &= \frac{\partial E(k)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial x} \frac{\partial x(k)}{\partial K_i} \\ &= -e_p(k) \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} f'(x(k)) e_i(k) \\ &= -\frac{\partial \theta(k)}{\partial u} f'(x(k)) e_p(k) e_i(k) \\ \frac{\partial E(k)}{\partial K_d} &= \frac{\partial E(k)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} \frac{\partial u(k)}{\partial x} \frac{\partial x(k)}{\partial K_d} \\ &= -e_p(k) \frac{\partial \theta(k)}{\partial u} f'(x(k)) e_d(k) \\ &= -\frac{\partial \theta(k)}{\partial u} f'(x(k)) e_p(k) e_d(k) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{Và } f'(x) = 4 \frac{e^{-x.Yg}}{(1+e^{-x.Yg})^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta(k)}{\partial u} = 1$$

Để thuận lợi, ta giả sử Sau đó, công thức (6) được viết lại như sau:

$$K_p(k+1) = K_p(k) + \eta_p e_p(k) e_p(k) \frac{4e^{-x.Yg}}{(1+e^{-x.Yg})^2}$$

$$K_i(k+1) = K_i(k) + \eta_i e_p(k) e_i(k) \frac{4e^{-x.Yg}}{(1+e^{-x.Yg})^2} \quad (12)$$

$$K_d(k+1) = K_d(k) + \eta_d e_p(k) e_d(k) \frac{4e^{-x.Yg}}{(1+e^{-x.Yg})^2}$$

Kết quả điều khiển trong phần tiếp theo sẽ minh họa cho thuật toán điều khiển đề xuất.

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Kết quả thực nghiệm được xem xét trên nhiều điều kiện khác nhau. Hình 11 và hình 12 trình bày kết quả thực nghiệm lần lượt với điều kiện tay máy không tải và tay máy mang tải 1 kg. Kết quả thực nghiệm và sai số được chỉ rõ lần lượt trong bảng 1 và bảng 2.

Chương trình lấy ngẫu nhiên 10 điểm để kiểm tra sai lệch điều khiển và trung bình sai lệch điều khiển vào khoảng 0.2^0 trong trường hợp không tải và 0.3^0 trong trường hợp có tải. Ngoài ra, sai số lớn nhất trong trường hợp không tải nhỏ hơn 0.5^0 và 1^0 đối với trường hợp có tải. Kết quả từ hình 10 và hình 11 cho thấy

hiệu quả đáp ứng của bộ điều khiển và tay máy slave hoạt động với đáp ứng không có độ trễ lớn trong điều khiển qua mạng LAN.

Kết quả thực nghiệm minh chứng khả năng của hệ thống điều khiển đề xuất và giải thuật điều khiển tính toán theo hướng mạng thần kinh nhân tạo, đặc biệt là trong điều kiện điều khiển mà giá trị đầu vào - quỹ đạo làm việc không được cho trước và tay máy hoạt động trong các điều kiện tải bên ngoài khác nhau.

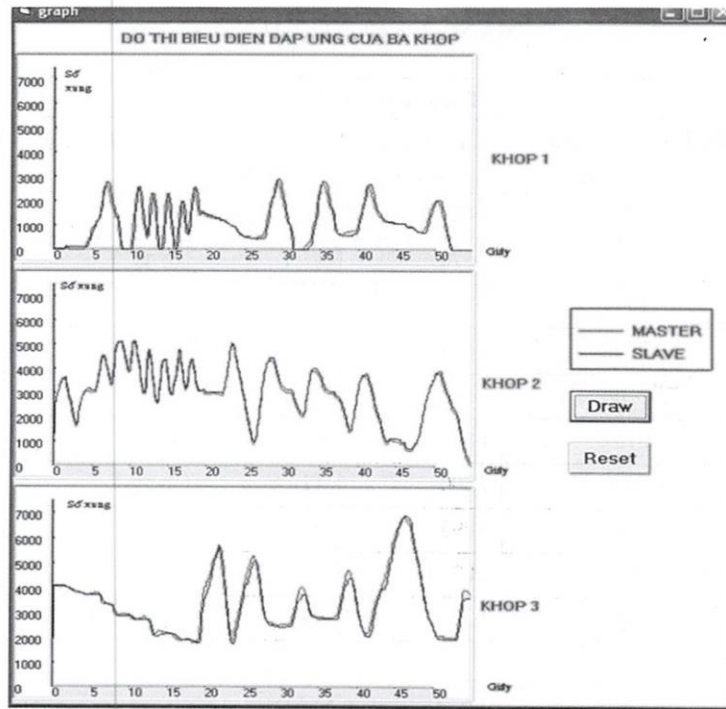
5. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất mô hình điều khiển tay máy 3 bậc tự do qua mạng LAN và giải thuật điều khiển tay máy được đề xuất tính toán theo hướng kết hợp bộ điều khiển PID và sự thích nghi của mạng thần kinh nhân tạo.

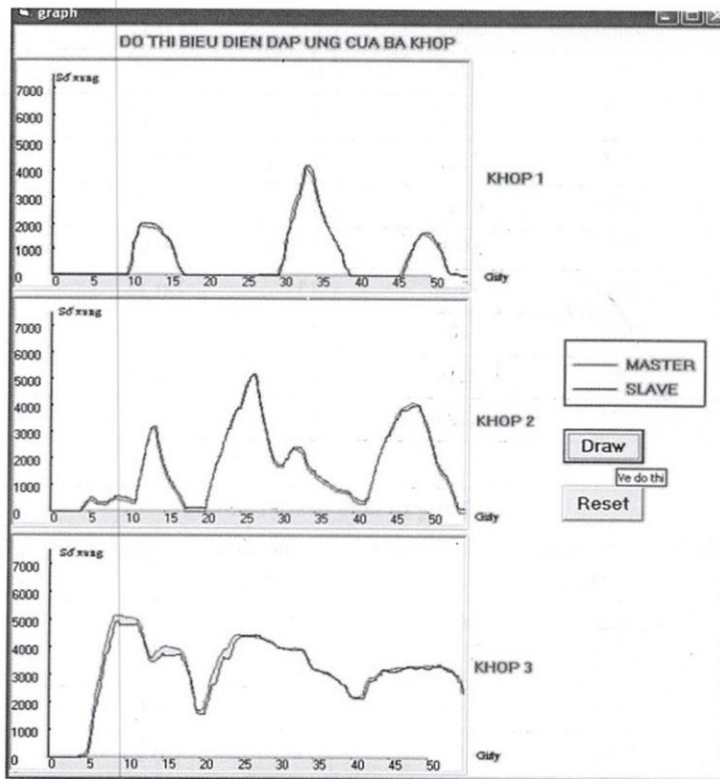
Với hệ thống điều khiển mà giá trị đầu vào - quỹ đạo làm việc không được biết trước, bộ điều khiển đề xuất cho thấy sự thích ứng của tay máy trong các điều kiện làm việc khác nhau, và sai số thấp.

Kết quả thực nghiệm minh chứng cho khả năng ứng dụng và phát triển hệ thống này trong các ứng dụng thực tế mà không đòi hỏi độ chính xác quá cao như các thử nghiệm về hoá chất, các môi trường có nhiệt độ cao, độc hại và nguy hiểm cho con người.

Những nghiên cứu nâng cao độ chính xác trong điều khiển đối với các tay máy có số bậc tự do cao hơn là hướng nghiên cứu tiếp theo.



Hình 11. Kết quả thực nghiệm không tải



Hình 11. Kết quả thực nghiệm có tải 1kg

BẢNG 1. KHÔNG TẢI

Khớp 1	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
1	950	942	8	0.15
2	2553	2570	17	0.31
3	13	0	13	0.24
4	2700	2698	2	0.04
5	2100	2100	0	0
6	675	684	9	0.16
7	2488	2500	12	0.22
8	1087	1093	6	0.11
9	507	502	5	0.09
10	927	937	10	0.18

Khớp 2	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
1	2997	3003	6	0.11
2	3205	3205	0	0
3	3925	3933	8	0.15
4	4325	4317	8	0.15
5	3998	4011	13	0.24
6	3097	3076	21	0.4
7	2995	3008	13	0.24
8	4011	4000	11	0.20
9	2203	2219	16	0.30
10	4125	4129	4	0.07

Khớp 3	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
1	3625	3623	2	0.04
2	3176	3163	13	0.24
3	2979	2995	16	0.3
4	2891	2879	12	0.22
5	2100	2100	0	0
6	1993	1982	11	0.20

Khớp 3	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
7	3885	3900	15	0.27
8	3420	3420	0	0
9	3985	3973	12	0.22
10	2907	2899	8	0.15

BẢNG 2. CÓ TÀI 1KG

Khớp 1	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
1	0	5	5	0.09
2	2533	2560	27	0.5
3	1600	1612	12	0.22
4	1320	1331	11	0.20
5	2178	2200	22	0.40
6	3885	3900	15	0.27
7	2488	2500	12	0.22
8	1081	1093	12	0.22
9	450	468	18	0.33
10	327	347	20	0.37

Khớp 2	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
1	0	27	27	0.5
2	2500	2450	50	0.92
3	4000	4000	0	0
4	3980	4000	20	0.37
5	1600	1612	12	0.22
6	2425	2450	25	0.46
7	1320	1331	11	0.20
8	825	837	12	0.22
9	457	469	12	0.22
10	1023	1023	0	0

Khớp 3	Bảng so sánh Master - Slave			
	Số xung Master	Số xung Slave	Sai lệch xung	Quy đổi ra góc [°]
1	1675	1650	25	0.46
2	3525	3450	25	0.46
3	4215	4223	8	0.15
4	4221	4233	12	0.22
5	4032	4025	7	0.13
6	3976	3992	16	0.3
7	3102	3102	0	0
8	2921	2925	4	0.07
9	2103	2100	3	0.05
10	2931	2912	19	0.35

CONTROL TELE-MANIPULATOR

Tu Diep Cong Thanh

University of Technology, VNU-HCM

ABSTRACT: Most interactive problems between humans and the environment such as Handling of toxic materials, working in infectious or sterile environment can be solved by robot technology. In particular, one feasible and stable solution is Tele-Manipulator Technology. By using the master arm to record the movements and behavior of the driver in a safe environment, then transmits these parameters over a LAN to the slave arm which is operated in the toxic, hazardous or sterile environment. The operation of the slave arm is strictly compatible with behaviour of the operator.

Keywords: Tele-Manipulator, LAN, control.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1].N. Tesla. *Method of and Apparatus for, Controlling Mechanism of Moving Vessels or Vehicles*, <http://www.pbs.org/tesla/res/613809.html>, (1898).
- [2].Raymond Goertz and R. Thompson. *Electronically Controlled Manipulator*, Nucleonics, (1954).
- [3].A.Bejczy, G. Bekey, R. Taylor, and S. Rovetta. *A Research Methodology for Tele- Surgery with Time Delays*, In First

- Int. Sym. on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Sept (1994).
- [4].K. Bejczy. *Sensors, Controls, and Man-Machine Interface for Advanced Teleoperation*, Science, (1980).
- [5].R. D. Ballard. *A last long look at Titanic*. National Geographic, Vol 170, No.6, December (1986).
- [6].Platon A. Prokopiou, Spyros G. Tzafestas, William S. Harwin, *A Novel Scheme for Human-Friendly and Time-Delays Robust Neuropredictive Teleoperation*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.25, No.4, pp.311-340, August (1999).
- [7].Lee, S. and Lee, H. S.: *Modeling, design and evaluation of advanced teleoperator control systems with short time delay*, IEEE Trans. Robotics Automat. Vol.9, pp. 607-623, (1993).
- [8].Sano, A., Fujimoto, H., and Tanaka, M.: *Gain-scheduled compensation for time delay of bilateral teleoperation*, in: Proc. of IEEE Internat. Conf. on Robot. Automat., Leuven, Belgium, pp. 1916-1923, (1998).
- [9].Towhidkhal, F., Gander, R. E., and Wood, H. C.: *Model predictive control: A model for joint movement*, J. Motor Behavior, Vol 29, No 3 pp., 209-222, (1997).
- [10].Prokopiou, P. A., Harwin, W. S., and Tzafestas, S. G.: *Variable-time-delays-robust telemanipulation through master state prediction*, AIM '99: 1999 IEEE/ASME Internat. Conf. on Advan. Intel. Mechatr., Atlanta, USA, September 19-22, (1999).