การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14
2-3 พฤศจิกายน 2543 โรงแรม โนโวเทล เชียงใหม่

ระบบควบคุมแบบทำนายโดยประยุกต์เทคนิคการหาเอกลักษณ์

Predictive Control by System Identification Approach

สินชัย ชินวรรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
E-mail : sch@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบการควบคุม แบบทำนายแบบใหม่ หลักการทำนายสัญญาณเอาท์พุท แบบ หลายขั้น (Multi-Steps) ได้ถูกใช้ใน การสร้างเมทริกซ์ของการหาเอกลักษณ์ของระบบ เพื่อที่จะคำนวณหาเวคเตอร์ ควบคุมในรูปของ สัญญาณอินพุทและเอาท์พุท เมทริกซ์ของการหาเอกลักษณ์ของระบบจะถูก สร้างโดยเทคนิควิธีรีเคอซิฟรีสสแควร์ (Recursive least-square) หลักการที่สร้างขึ้นใหม่นี้ สามารถหาเอกลักษณ์ของระบบ และ สร้างตัวควบคุมระบบทำนายได้ในขณะเดียวกัน ซึ่งทำให้ลดขั้นตอน ในการหา เอกลักษณ์ของระบบลง และทำให้ระบบควบคุมมี ประสิทธิ ภาพ ในการปรับตัวมากขึ้น

Abstract

An efficient implementation of setpoint tracking predictive control strategy is presented in this paper. The multi-step output predictor is used to derive the identified matrix in order to calculate the control force in terms of input/output time histories. The identified matrix can be derived recursively by a standard least-square technique. The formulation satisfies simultaneously system identification and predictive controller design requirement for tracking purposes.

บทนำ

แนวความคิดของระบบควบคุมแบบทำนายได้ถูกแนะนำโดย Richalet, Rault, Testud และ Papon [1] ในราวปลายคริสต์ศัตรวรรษที่เจ็ดสิบ การควบคุมแบบ ทำนายนั้นเป็นรูปแบบหนึ่งของระบบควบคุมแบบ โมเดล เบส[2] (Model Base) ซึ่งมีข้อดีหลายๆประการ และมี การใช้งานอย่างแพร่หลาย ในระบบควบคุมกระบวนการ ระบบควบคุมแบบทำนายได้ถูกพัฒนา มาเพื่อการแก้ ปัญหาระบบ แบบ Non-minimum phase โดยมี พารามิเตอร์สาม ประการในระบบควบคุมแบบทำนาย ได้แก่ Control Weight, Predictive Horizon และ Control Horizon ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม และเป็นการรับรอง เสถียรภาพ ของระบบควบคุม เนื่องจากระบบควบคุม แบบทำนาย เป็นรูปแบบหนึ่งของระบบควบคุมแบบ โมเดลเบส ดังนั้นโมเดลที่ถูกต้องของระบบจึงเป็น[3]-[5] สิ่งจำเป็นในการสร้างตัวควบคุมโดยทั่วไปนั้น สามารถ จำแนก การสร้างระบบควบคุมได้สองขั้นตอน คือการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุม[6]-[8] แบบจำลองที่เรียกว่า Auto-Regressive moving average with eXogenous input (ARX) คือแบบจำลองที่นักวิจัย ส่วนมากนิยมใช้เป็น แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่อธิบาย พฤติกรรมของระบบ[9]-[10]

บทความนี้จะได้นำเสนออัลกอริทึม ของระบบควบคุมแบบทำนายแบบใหม่ ที่ประยุกต์วิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ เข้ากับหลักระบบควบคุมแบบทำนาย อัลกอริทึมแบบนี้จะรวมการหาเอกลักษณ์ เข้ากับกฎการควบคุมแบบทำนาย โดยการใช้การทำนายแบบก้าวหน้า กฎการควบคุมจะถูกสร้างจากเมทริกซ์เอกลักษณ์ ด้วยวิธี รีเคอซิฟรีสแควร์[11] เมทริกซ์เอกลักษณ์จะสามารถลดข้อผิดพลาดระหว่าง สัญญาณเอาท์พุทที่แท้จริง และเอาท์พุทแบบประมาณ วิธีการนี้จะ สร้างกฎการควบคุม แบบทำนายจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท โดยตรง โดยมีพารามิเตอร์ควบคุมสองประการ ได้แก่ Control Horizon และ ARX Model Order วิธีการนี้สามารถประยุกต์ ใช้ในการควบคุมระบบในเวลาปัจจุบัน ตัวอย่างการคำนวณ จะนำเสนอในตอนท้ายของบทความ เพื่อตรวจสอบการทำงาน ของระบบ

การสร้างสมการคณิตศาสตร์

แบบจำลองไฟไนต์ดิฟเฟอเรน ที่มีเอาท์พุท $y(k)$ ขนาด $sx1$ และอินพุท $u(k)$ ขนาด $mx1$ ที่เวลา k สามารถอธิบายโดย สมการ

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \cdots + a_p y(k-p) + b_0 u(k)$$
$$+ b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \cdots b_p u(k-p) \qquad (1)$$

ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุท-เอาท์พุท โดยแสดงให้เห็นว่า เอาท์พุทที่เวลาปัจจุบัน สามารถคำนวณ จากข้อมูลอินพุท และเอาท์พุทที่เวลาอดีต โมเดลดังกล่าวเทียบได้กับ ARX โมเดล โดยเมทริกซ์ $a_j (i = 1,2,\ldots,p)$ ขนาด sxs และ $b_j (i = 0,1,2,\ldots,p)$ ขนาด sxm คือ Observer Markov Parameters (OMP) หรือ ARX Parameters เมทริกซ์ b_0 คือเทอมไดเรกทรานมิสชั่น สมการที่ (1) สามารถ จัดอยู่ในรูปตัวทำนายแบบก้าวหน้า ในรูปของความสัมพันธ์

$$y_f(k) = Ru_f(k) + Ay_p(k-p) + Bu_p(k-p) \qquad (2)$$

โดยที่ $u_f(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+q) \\ u(k+q+1) \\ \vdots \\ u(k+r-1) \end{bmatrix}$, $y_p(k-p) = \begin{bmatrix} y(k-p) \\ y(k-p+1) \\ \vdots \\ y(k-1) \end{bmatrix}$,

$$u_p(k-p) = \begin{bmatrix} u(k-p) \\ u(k-p+1) \\ \vdots \\ u(k-1) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} b_p & b_{p-1} & \cdots & b_1 \\ b_p^{(1)} & b_{p-1}^{(1)} & \cdots & b_1^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_p^{(q)} & b_{p-1}^{(q)} & \cdots & b_1^{(q)} \\ b_p^{(q+1)} & b_{p-1}^{(q+1)} & \cdots & b_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_p^{(r-1)} & b_{p-1}^{(r-1)} & \cdots & b_1^{(r-1)} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} a_p & a_{p-1} & \cdots & a_1 \\ a_p^{(1)} & a_{p-1}^{(1)} & \cdots & a_1^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_p^{(q)} & a_{p-1}^{(q)} & \cdots & a_1^{(q)} \\ a_p^{(q+1)} & a_{p-1}^{(q+1)} & \cdots & a_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_p^{(r-1)} & a_{p-1}^{(r-1)} & \cdots & a_1^{(r-1)} \end{bmatrix}$$

โดย r คือจำนวนข้อมูล

เวคเตอร์ $y_f(k)$ แสดงถึง เอาท์พุทในอนาคต ด้วยข้อมูลจำนวณ r จุด จากเวลา k ถึง $k+r-1$ ขณะที่ $y_p(k-p)$ คือเอาท์พุทในอดีต ด้วยข้อมูลจำนวณ p จุด จากเวลา $k-p$ ถึง $k-1$ ในทำนองเดียวกัน เวคเตอร์ $u_f(k)$ แสดงถึง อินพุทในอนาคต ด้วยข้อมูลจำนวณ r จากเวลา k ถึง $k+r-1$ ขณะที่ $u_p(k-p)$ คืออินพุทในอดีต ด้วยข้อมูลจำนวณ p จุด จากเวลา $k-p$ ถึง $k-1$

การออกแบบระบบควบคุมแบบทำนาย

สมมุติว่าการควบคุมป้อนกลับเริ่มทำงานที่เวลา k และสิ้นสุด ที่เวลา $k+q$ สมการ (2) จะอยู่ในรูป

$$y_f(k+q) = R_o u_f(k+q) + R_c \bar{u}_f(k)$$
$$+ A' y_p(k-p) + B' u_p(k-p) \qquad (3)$$

โดยที่

$$y_f(k+q) = \begin{bmatrix} y(k+q) \\ y(k+q+1) \\ \vdots \\ y(k+q+p-1) \end{bmatrix},$$

$$u_f(k+q) = \begin{bmatrix} u(k+q) \\ u(k+q+1) \\ \vdots \\ u(k+q+p-1) \end{bmatrix}, \quad \bar{u}_f(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+q-1) \end{bmatrix},$$

$$R_o = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & b_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_0^{(p-1)} & b_0^{(p-2)} & \cdots & b_0 \end{bmatrix},$$

$$R_c = \begin{bmatrix} b_0^{(q)} & b_0^{(q-1)} & \cdots & b_0^{(1)} \\ b_0^{(q+1)} & b_0^{(q)} & \cdots & b_0^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_0^{(q+p-1)} & b_0^{(q+p-2)} & \cdots & b_0^{(p)} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} b_p^{(q)} & b_{p-1}^{(q)} & \cdots & b_1^{(q)} \\ b_p^{(q+1)} & b_{p-1}^{(q+1)} & \cdots & b_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_p^{(q+p-1)} & b_{p-1}^{(q+p-1)} & \cdots & b_1^{(q+p-1)} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} a_p^{(q)} & a_{p-1}^{(q)} & \cdots & a_1^{(q)} \\ a_p^{(q+1)} & a_{p-1}^{(q+1)} & \cdots & a_1^{(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_p^{(q+p-1)} & a_{p-1}^{(q+p-1)} & \cdots & a_1^{(q+p-1)} \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์ R_o ขนาด $ps \times pm$ และเมทริกซ์ R_c ขนาด $ps \times qm$ ถูกสร้างจาก เพาส์เรสปอนของระบบ (System Markov Parameters) หมายเหตุ s คือ จำนวนเอาท์พุท m คือ จำนวน อินพุท p คือโมเดลออเดอร์ และ q คือ Control Horizon เมทริกซ์ R_o, R_c, A' และ B' สามารถสร้างจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท ในสมการที่ (3) เมทริกซ์ R_c คือ เฮนเคลเมทริกซ์ ซึ่งมีแรงค์ n โดยที่ n คือออเดอร์ของระบบ ในกรณีที่ $qm \rangle ps \rangle n$ สมการจะมี เอาท์พุท $\bar{u}_f(k)$ ขนาด qm จากจำนวน $qm \times 1$ ซึ่งมี n สมการ ที่อิสระต่อกัน

ดังนั้นสมการที่ (3) จะทำให้สร้างคำตอบหลายๆ แบบสำหรับ $\bar{u}_f(k)$ โดยที่ คำตอบที่ มีนอร์มมินนิมัม แสดงได้โดย

$$\bar{u}_f(k) = R_c^* y_f(k+q) - R_c^* R_o u_f(k+q) - R_c^* A' y_p(k-p) - R_c^* B' u_p(k-p) \quad (4)$$

หรือในรูป เมทริกซ์

$$\bar{u}_f(k) = \begin{bmatrix} -R_c^* A' & -R_c^* B' & -R_c^* & -R_c^* R_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_p(k-p) \\ y_f(k+q) \\ u_f(k+q) \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ * หมายถึง pseudo-inverse.

ในกรณีที่ $qm = ps$, สมการ (5) จะให้คำตอบเดียว เพื่อให้เขียนสมการ (5) ได้ง่ายขึ้น กำหนดสัญญลักษณ์

$$P_c = \begin{bmatrix} -R_c^* A' & -R_c^* B' \end{bmatrix}$$

$$\text{และ } P_o = \begin{bmatrix} -R_c^* & -R_c^* R_o \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$v_p(k-p) = \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_p(k-p) \end{bmatrix} \text{ และ } v_p(k-p) = \begin{bmatrix} y_p(k-p) \\ u_p(k-p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

สมการ ที่ (5) จะอยู่ในรูป

$$\bar{u}_f(k) = \begin{bmatrix} P_c & P_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_f(k+q) \end{bmatrix} \quad (8)$$

สมการที่ (8) คืออีกรูปแบบของ ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนโมเดล ในการหาเอกลักษณ์ของระบบ สำหรับ อินพุท-เอาท์พุท ที่กำหนด จะมีเซทของ P_c และ P_o ที่ทำให้สมการ (8) เป็นจริงเวคเตอร์ควบคุม

$\bar{u}_f(k)$ ที่ถูกสร้างจากกฎการควบคุม แบบทำนาย ได้จาก การ ให้ค่าเวคเตอร์เอาท์พุทที่อนาคต $y_f(k+q)$ เท่ากับ ค่าที่ต้องการ $w(k)$ และเวคเตอร์ควบคุม ที่อนาคต $u_f(k+q)$ มีค่าเท่ากับค่าคงที่ที่น้อยที่สุด ดังนั้น เวคเตอร์ $v_f(k+q)$ จะอยู่ในรูป

$$v_f(k+q) = \begin{bmatrix} w(k) \\ const \end{bmatrix} \quad (9)$$

อิลิเมนท์แรกของเวคเตอร์ควบคุม $u(k)$ มีค่า

$$\bar{u}_f(k) = \begin{bmatrix} P_{c1} & P_{o1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_f(k+q) \end{bmatrix} \quad (10)$$

โดยที่ m แถวแรกของ $\bar{u}_f(k)$ คือเวคเตอร์ที่ใช้ใน การควบคุม $u(k)$ ที่เวลา k , P_{c1} และ P_{o1} คือ m แถวแรกของ P_c และ P_o ตามลำดับ

เราสามารถสร้างเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$U(k) = \begin{bmatrix} u(k) & u(k+1) & \cdots & u(N-2p-q+1) \end{bmatrix},$$

$$V_p(k-p) = \begin{bmatrix} y(k-p) & y(k-p+1) & \cdots & y(N-2p-q+1) \\ u(k-p) & u(k-p+1) & \cdots & u(N-2p-q+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y(k-1) & y(k) & \cdots & y(N-p-q) \\ u(k-1) & u(k) & \cdots & u(N-p-q) \end{bmatrix},$$

$$V_f(k+q) = \begin{bmatrix} y(k+q) & y(k+q+1) & \cdots & y(N-p+1) \\ u(k+q) & u(k+q+1) & \cdots & u(N-p+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y(k+q+p-1) & y(k+q+p) & \cdots & y(N) \\ u(k+q+p-1) & u(k+q+p) & \cdots & u(N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่ N คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการประมาณค่าเมทริกซ์ P_{c1} และ P_{o1} . สมการที่ (10) หาค่าได้โดยการใช้สมการที่ (11) ซึ่งในรูป

$$U(k) = \begin{bmatrix} P_{c1} & P_{o1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p(k-p) \\ V_f(k+q) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ในการที่จะใช้เทคนิด รีสแควร์ ในการหาคำตอบ จำนวนข้อมูล N ที่ใช้ในจะต้องมีจำนวนมากเพียงพอ ที่เมทริกซ์ $U(k)$ ขนาด $m \times (N-p-q-k+2)$ มีแรงค์ m เมทริก $V_p(k-p)$ ขนาด $p(m+s) \times (N-p-q-k+2)$ และ $V_f(k+q)$ ขนาด $p(m+s) \times (N-p-q-k+2)$ มีแรงค์ $pm+n$ สมการที่ (12) จะจัดอยู่ในรูปของรีสแควร์

$$\begin{bmatrix} P_{c1} & P_{o1} \end{bmatrix} = U(k) \begin{bmatrix} V_p(k-p) \\ V_f(k+q) \end{bmatrix} \quad (13)$$

รีเคอร์ซีลรีสแควร์เทคนิค

เทคนิครีเคอร์ซีลรีสแควร์ สามารถนำมาประยุกต์ใน การคำนวนหาคำตอบของสมการที่ (13) อย่างมีประสิทธิ ภาพ โดยการจัดรูปสมการให้สามารถ ทำการคำนวนหา คำตอบออนไลน์ โดยทั่วไปแล้วมีเทคนิค รีเคอร์ซีลรีสแควร์ อยู่หลายแบบ คลาสิครีเคอร์ซีลรีสแควร์เทคนิค จัดเป็นวิธี ที่นักวิจัยนิยมใช้เป็นส่วนมากเนื่องจาก อัลออริธึมที่เข้าใจง่าย และมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนคลาสิครีเคอร์ซีลรีสแควร์ สามารถ แสดงได้ต่อไปนี้

เขียนสมการ (12) ในรูปเมทริกซ์

$$u(k) = \begin{bmatrix} P_{c1} & P_{o1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k-p) \\ v_f(k+q) \end{bmatrix} = P\bar{v}(k-1) \quad (14)$$

โดยที่

$$P = \begin{bmatrix} P_{c1} & P_{o1} \end{bmatrix}, \; v(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix}$$

$$\bar{v}(k-1) = \begin{bmatrix} v(k-p) \\ \vdots \\ v(k-1) \\ v(k+q) \\ \vdots \\ v(k+q+p-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

กำหนดตัวแปร

$$H(k) = \frac{\bar{v}^T(k) G(k-1)}{1 + \bar{v}^T(k) G(k-1) \bar{v}(k)} \quad (16)$$

$$\hat{u}(k+1) = \hat{P}(k)\bar{v}(k) \quad (17)$$

จากนั้น ทำการคำนวนดังต่อไปนี้

$$G(k) = G(k-1)[I - \bar{v}(k)H(k)] \quad (18)$$

$$\hat{P}(k+1) = \hat{P}(k) + [u(k+1) - \hat{u}(k+1)]H(k) \quad (19)$$

ค่าเริ่มต้นของและ $G(0)$ และ $\hat{P}(1)$ สามารถกำหนดเริ่มได้จากการทำแบทซ์รีสแควร์ หลังจากจำนวนข้อมูลเริ่มแรกมีค่าเพียงพอ หรือใช้ $G(0)$ มีค่า $\varepsilon I_{2p(m+s)}$ และ $\hat{P}(1)$ มีค่า $0_{m\times 2p(m+s)}$ โดยที่ ε คือค่าจำนวนบวกที่มากๆ

ขั้นตอนการคำนวน

วิธีการคำนวนเวคเตอร์ควบคุมแบบทำนาย สามารถแสดง ได้เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จากข้อมูลอินพุทและเอาพุทที่มีจำนวนมากเพียงพอ สร้างเวคเตอร์ $\bar{v}(k)$ ดังสมการที่ (15)
2. ใช้เทคนิครีเคอร์ซีสรีสแควร์ดังสมการ (16)-(19) คำนวนเมทริกซ์ P
3. กำหนดค่าเป้าหมาย $w(k)$ และสร้างเวคเตอร์ $v_f(k+q)$ ตามสมการ(9)
4. คำนวนเวคเตอร์ควบคุมตามสมการ (10)

ตัวอย่างการคำนวณระบบควบคุมแบบทำนาย

ระบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง ถูกใช้ในการแสดงประสิทธิภาพ ของผลที่ได้จากระบบควบคุมแบบทำนายดังต่อไปนี้ ระบบจำลองแบบหนึ่งอินพุท-หนึ่งเอาท์พุท ในรูปทรานเฟอร์ ฟังชัน

$$H(s) = \frac{-(s-6)}{s^2 + 1.6s + 4}$$

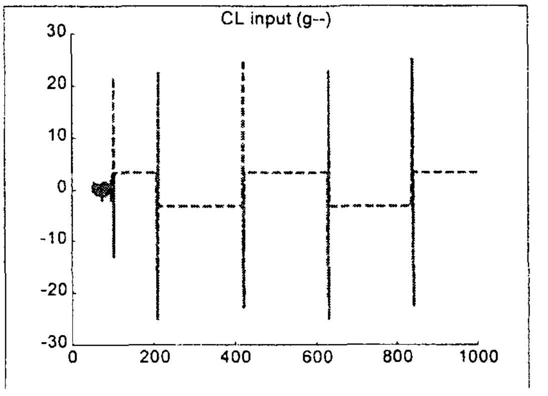
ระบบใน z โดเมน จะมีค่า

$$H(z^{-1}) = \frac{-0.0599z^{-1} + 0.2625z^{-2}}{1 - 1.591z^{-1} + 0.7261z^{-2}}$$

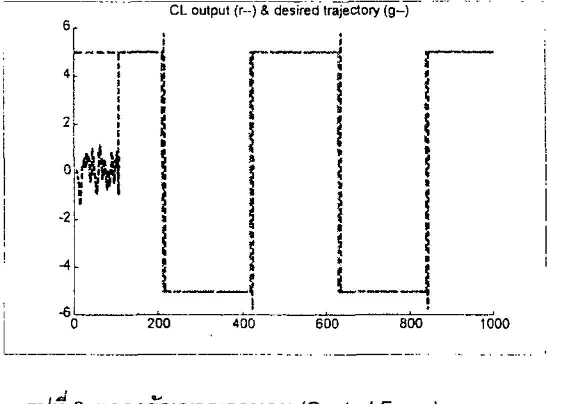
โดยมี Sampling Time (T_S) เท่ากับ 0.2 วินาที

เนื่องจากระบบจำลองนี้มีอันดับสอง ARX Model Order (p) ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับสอง จำนวนข้อมูล 100 ค่าแรกถูก นำมาหา เอกลักษณ์ ของระบบ Control Horizon (q) กำหนดให้มีค่าเท่ากับสองเช่นกัน ซึ่งตัวควบคุมแบบทำนายสามารถ คำนวนเวคเตอร์ควบคุม และทำให้เอาท์พุทของระบบ เป็นไปตามค่าที่กำหนด

หมายเหตุ ค่า Control Horizon สามารถมีค่าใดๆ ที่มากกว่าสอง เอาท์พุทของระบบ ยังคงเป็น ไปตามค่าที่กำหนด เพียงแต่ระบบจะใช้เวลาในการไปสู่ค่าที่ตั้งไว้มากขึ้น เท่านั้น



รูปที่ 1 แสดงสัญญาณเอาท์พุท ที่มีค่าตามค่าที่ตั้งค่าไว้ (Square Wave Desired Trajectory)



รูปที่ 2 แสดงสัญญาณควบคุม (Control Force)

สรุป

แนวความคิดในการผนวกการหาเอกลักษณ์ของระบบร่วมกับควบคุมแบบทำนาย ได้ถูกนำเสนอในบทความนี้ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการออกแบบระบบควบคุมโดยทั่วไป ที่มีสองขั้นตอน ได้แก่การหาเอกลักษณ์ของระบบ และการออกแบบตัวควบคุม เวคเตอร์การควบคุมแบบทำนายถูกสร้าง จากเมทริกซ์เอกลักษณ์ โดยใช้เทคนิครีเคอซีสรีสสแควร์ ซึ่งทำ ให้ลดขั้นตอนในการหาเอกลักษณ์ของระบบลง และทำให้ ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพในการปรับตัวมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Richalet J., Rault A., Testud J.L. and Papon J., "Model Predictive Heuristic Control : Applications to Industrial Processes", Automatica, Vol. 14, No. 5, pp. 413-428, 1978.

[2] Cutler C.R. and Ramaker B.L., "Dynamic matrix Control - A Computer Control Algorithm", Proceedings JACC, San Francisco, U.S.A., 1980.

[3] Garcia, C. E., Prett, D. M., and Morari M., "Model Predictive Control," Automatica, Vol. 25, 1989, pp 335-348.

[4] Soeterboek, R., Predictive Control, A Unified Approach, Prentice-Hall International Series, 1992.

[5] Mosca, E., Optimal Predictive and Adaptive Control, Prentice-Hall Information and System Sciences Series 1995.

[6] Juang, J.-N., Applied System Identification, PRT Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.

[7] Huang, J.-K., Hsiao, M.-H., and Cox, D.E., "Indirect Identification of Linear Stochastic Systems with Known Feedback Dynamics," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 19, No. 4, July-August 1996, pp. 836-841.

[8] Chen, C.-W., Juang, J.-N., and Huang, J.-K., " Adaptive Linear System Identification and State Estimation," Control and Dynamic System, Vol. 57, 1993, pp 331-368.

[9] Juang, J.-N. and Phan, M.G., "Deadbeat Predictive Controller ," NASA Technical Memorandum.

[10] Juang, J.-N. and Phan, M.G., "Recursive Deadbeat Controller Design," NASA Technical Memorandum.

[11] Ljung, L. and Soderstrom, T., Theory and Practice of Recursive Identification, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983.