

# การลดการสั่นสะเทือนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยเทคนิคคอมมานด์เชปปีง

## Vibration Reduction of Hard Disk Actuator Using Command Shaping

นิติรงค์ พงษ์พานิช<sup>1,2</sup> และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>1,2</sup>

**Nitirong Pongpanich<sup>1,2</sup>** and Withit Chatlatanagulchai<sup>1,2</sup>

### บทคัดย่อ

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Actuator) จำเป็นต้องเคลื่อนจากแทร็คหนึ่ง ไปยังอีกแทร็คหนึ่งด้วยความแม่นยำและรวดเร็ว แต่หัวอ่านไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วดังต้องการเนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนที่แทร็คเป้าหมาย (Residual Vibration) สาเหตุของการสั่นสะเทือนนี้ ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการที่ Reference Signals ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และการขจัด มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ รวมทั้งที่ความถี่ธรรมชาติของหัวอ่านด้วย จึงเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) เทคนิค Command Shaping เป็นเทคนิคที่ใช้การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ที่จะใส่เข้าไปในระบบเพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติ เพื่อลดการสั่นพ้อง ในบทความนี้เราใช้ฟังก์ชันพื้นฐานฟังก์ชัน Ramped Sinusoid ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ผลจาก Simulation และจากการทดลองจริง เห็นได้ชัดว่าการสั่นสะเทือนของหัวอ่านจากการใช้ Command Shaping ลดลง ทำให้หัวอ่านเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

### ABSTRACT

Hard disk actuator is required to move from one track to another with high-level accuracy and with fast move time. However, the actuator cannot move as fast as it should because of the residual vibration at the target track. The cause of this vibration is partly from the fact that the reference signals, which are acceleration, velocity, and position, have high power spectrum energy over wide frequency range including over the actuator's natural frequency. This induces resonance. The command shaping technique re-constructs the reference signals such that its energy content is lower around the natural frequencies of the system to reduce the effect of resonance. In this paper, we use a ramped sinusoidal basis function to reconstruct the reference signals. From the simulation and experimental results, it is clear that the residual vibration of the actuator in the command shaping technique is significantly reduced, enabling the actuator to move faster.

Keywords: command shaping, actuator arm, shaped reference signal

N Pongpanich: [aook-aik@hotmail.com](mailto:aook-aik@hotmail.com)

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (Control of Robot and Vibration Laboratory, CRVLAB)

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

## คำนำ

ฮาร์ดดิสก์ (Harddisk) เป็นอุปกรณ์มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูล หลังจากการทำงาน โดยที่มีแขนของหัวอ่าน (Actuator Arm) เป็นกลไกขับเคลื่อนหัวอ่าน จากแทร็คหนึ่งไปยังอีกแทร็คหนึ่ง ซึ่งการเคลื่อนที่หัวอ่านนี้จะต้องอาศัยความแม่นยำและรวดเร็ว

ระบบทุกๆระบบจะมีค่าความถี่ธรรมชาติของตัวเองซึ่งเป็นผลที่ทำให้เมื่อระบบเคลื่อนที่จะเกิดการสั่นสะเทือน. มนตรี [1] กล่าวว่าถ้าความถี่ภายนอกที่กระทำต่อระบบมีค่าที่เท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบทางกลนั้น สภาวะการสั่นที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบทางกลนั้นได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องลดค่าการสั่นที่เกิดขึ้นของระบบ

เทคนิคคอมมานด์เชปปีง (Command Shaping) เป็นเทคนิคที่ใช้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ซึ่งทำให้พลังงานกระตุ้นมีค่าที่ลดลงเมื่อเข้าใกล้กับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ เป็นผลที่ทำให้การเคลื่อนที่มีความแม่นยำมากขึ้น. Chatlatanagulchai [2] ได้ทำการทดลองกับ Flexible Robot โดยใช้เทคนิค command shaping มาปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals โดยได้ใช้ Ramp Sinusoidal และ Segmented Versine มาเปรียบเทียบกับ Bang-Bang ซึ่งเป็น Unshaped Command. Meckl [3] ได้นำวิธีการ Shape Force Profile เพื่อลดค่าพลังงานที่จะไปกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติเพื่อให้ระบบเกิดการสั่นที่น้อยลง. Gul [4] ได้ศึกษาการลดค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นของเครื่อง Wire Bonder โดยใช้เทคนิค Command Shaping โดยใช้วิธีการทาง Ramp Sinusoidal มาเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการควบคุม. Reynolds [5] ได้กล่าวถึง ประโยชน์ของการพัฒนาการออกแบบควบคุมให้ระบบเคลื่อนที่ไปอย่างที่ต้องการ โดยนำเทคนิค Command Shaping มาใช้ปรับแต่งโครงสร้างของ Reference Signals. Takashi และ Saito [6] ได้ออกแบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ซึ่งในการควบคุมนี้ใช้การควบคุมแบบ Feedback และ Feedforward

ตัวควบคุม (Controller) ที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปจะเป็นตัวควบคุมแบบ PID Controller ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวควบคุมแบบ PID ให้สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะนำ Nonlinearity ของระบบมาพิจารณาในการออกแบบด้วย. Muhammad A. และ Ahmad A Masoud [7] ทำการออกแบบโดยเลือกค่า Damping ให้เหมาะสมกับการทำงานในแต่ละช่วง เพื่อลดค่าความผิดพลาดในการทำงานและลดพลังงานที่ให้แก่ระบบ. Ying Li และคณะ [8] ได้ปรับปรุงตัวควบคุมแบบ PID โดยเปลี่ยนแปลงที่ตัว Integrator โดยใช้ Gaussian Function เข้ามาช่วยคำนวณ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์การควบคุมแบบอื่นๆเพื่อนำมาใช้กับฮาร์ดดิสก์

ในบทความนี้ส่วนถัดไปยังแสดงถึง อุปกรณ์และวิธีการ เช่น พลศาสตร์ของแขนหัวอ่าน วิธีการควบคุมแบบ Inverse Dynamic เทคนิคคอมมานด์เชปปีง นอกจากนี้ยังได้แสดงถึงผลการทดลอง และสรุปผลการทดลองในส่วนสุดท้าย

## อุปกรณ์และวิธีการ

### พลศาสตร์ของแขนหัวอ่าน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง โดยวัตถุประสงค์ คือการลดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเป้าหมายและสามารถเคลื่อนที่ด้วยระยะเวลาที่รวดเร็ว



รูปที่ 1 พลศาสตร์ของหัวอ่าน

Diagram ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เขียนได้ตามรูปที่ 1 ซึ่งแขนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จะมีลักษณะคล้ายกับลูกตุ้มที่แกว่งในแนวระดับซึ่งสามารถใช้กฎข้อที่สองของนิวตันได้จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้

$$T - c\dot{\theta} - k\theta = J\ddot{\theta}$$

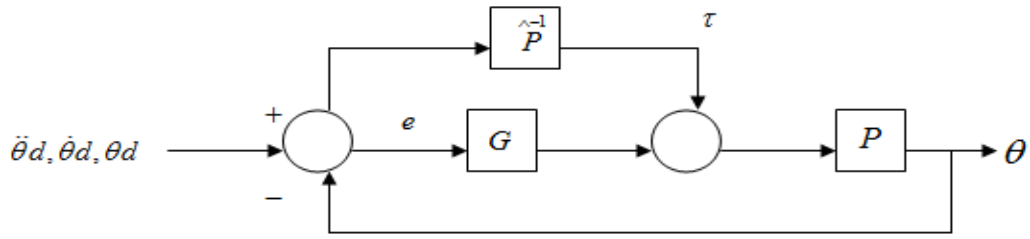
เมื่อ  $T$  คือค่าทอร์ก  $k$  คือค่าคงที่ของสปริง  $J$  คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์  $\theta$  คือมุมของหัวอ่าน คืออนุพันธ์เทียบกับเวลาและ  $c$  คือค่าคงที่ของความเร็วเชิงมุมของหัวอ่าน หากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับระบบกับมุมที่เคลื่อนที่ของระบบ จะได้

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{as^2 + bs + c}$$

ซึ่งสามารถหาค่าตัวแปรต่างของระบบได้จากการทำ System Identification ทำให้ได้ค่า  $a = 0.000732, b = 0.03242, c = 5.23095$

### การควบคุมแบบ Inverse dynamic

การออกแบบการควบคุมของงานนี้ใช้ระบบ Inverse Dynamic ในการควบคุม โดยจะต้องมีการออกแบบ Reference Signals ได้แก่ ความเร่ง ความเร็วและการจัด ของระบบก่อนเพื่อควบคุมทอร์กของ Voice Coil ให้เหมาะสมกับที่ต้องการ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 block diagram ของ inverse dynamic

เมื่อ  $P^{-1}$  คือ Inverse Plant,  $G$  คือ Controller,  $P$  คือ Plant,  $\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d$  คือ Input และ  $\theta$  คือ Output

### เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Meckl [3] เป็นผู้คิดสมการ Cost Function ซึ่งอยู่ในรูปของฟูเรียรทรานฟอร์มซึ่งใช้อธิบายลักษณะของเทคนิคคอมมานด์เชปปีง จากความแตกต่างระหว่างการสังเคราะห์ Command Function และ Bang-Bang Command Function ซึ่งได้อธิบายถึงขอบเขตของสเปกตรัมของความถี่ธรรมชาติของระบบ จากสมการ Cost Function

$$J_c = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \frac{1}{\tau_m^2} [f_r(t) - f_{cs}(t)]^2 dt + \rho \sum_{i=1}^N (\omega_i T_r)^2 |F_{cs}^*(\omega_i T_f)|^2$$

โดยที่  $T_r$  เป็น Bang-Bang Input ของระบบที่มีการเคลื่อนที่กับเวลา,  $T_f$  เป็น Command Shaped Input ที่มีความสัมพันธ์กับเวลา,  $f_r$  เป็น Bang-Bang Command Profile,  $f_{cs}$  เป็น Command Shaped Profile,  $\omega_i$  เป็นความถี่ธรรมชาติของระบบ,  $\rho$  เป็น น้ำหนัก,  $\tau_m$  เป็น แรงบิดสูงสุด,  $N$  เป็น จำนวนของความถี่ต่างๆรอบบริเวณความถี่ธรรมชาติและ  $F_{cs}^*$  เป็นฟูเรียรทรานฟอร์มของ Command Shaped Profile

สำหรับระบบที่ไม่มีความเร็วมาเกี่ยวข้องได้ใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอยจากสมการ

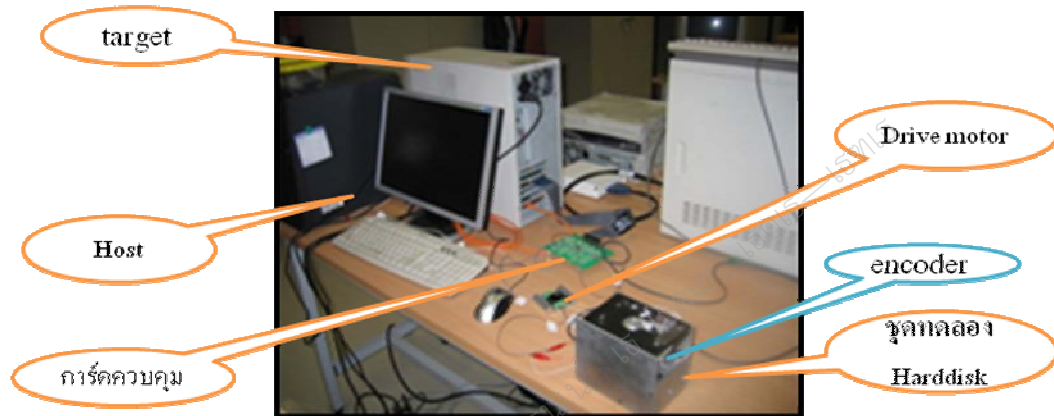
$$f_{rs}(t) = \tau_m \sum_{k=1}^L \frac{\beta_k}{\alpha_k^2} \Phi_k^*(t)$$

เมื่อ 
$$\Phi_k^*(t) = \alpha_k \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left( \alpha_k \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_k}{2} \cos \left( \alpha_k \frac{t}{T_f} \right)$$

เป็นฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย,  $B_k$  เป็นสัมประสิทธิ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน  $k^{th}$  และ  $\alpha_k$  เป็นจำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน  $k^{th}$  จำนวนลักษณะคือค่าที่เลือกไว้ ดังนั้นพื้นฐานของฟังก์ชันจะมีขนาดเป็นศูนย์และความชันจะอยู่ที่จุดปลาย โดยเมื่อเราใช้เงื่อนไขของขอบเขต หาค่าอนุพันธ์เทียบกับเวลา ของสมการและทำการหาค่าที่จุดปลาย เราจะได้จำนวนลักษณะที่เราต้องการจากสมการ

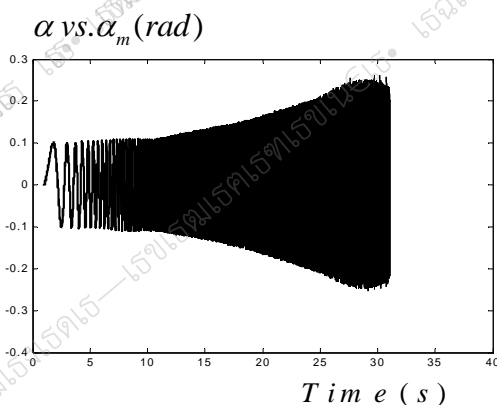
$$\frac{\alpha_k}{2} \sin \alpha_k + \cos \alpha_k - 1 = 0, \text{ (for } \alpha_k \neq 2\pi n, n = 1, 2, \dots \text{).}$$

รูปที่ 3 เป็นรูปที่แสดงอุปกรณ์ของการควบคุมแขนของหัวอ่านจะประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ Host เป็นที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม Labview ในการควบคุมและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ Target ซึ่งจะมีการควบคุมของ National Instruments เป็นส่วนที่ส่งสัญญาณควบคุมไปยังแขนของหัวอ่าน โดยมี Drive Motor เป็นส่วนที่ขับ Voice Coil ซึ่งทำให้แขนของหัวอ่านให้เคลื่อนที่ไปตามมุมที่ต้องการ โดยมี Encoder เป็นอุปกรณ์ในการวัดมุมที่เคลื่อนที่แล้วส่งสัญญาณการเคลื่อนที่มาแสดงผลพร้อมทางหน้าจอของคอมพิวเตอร์ Host

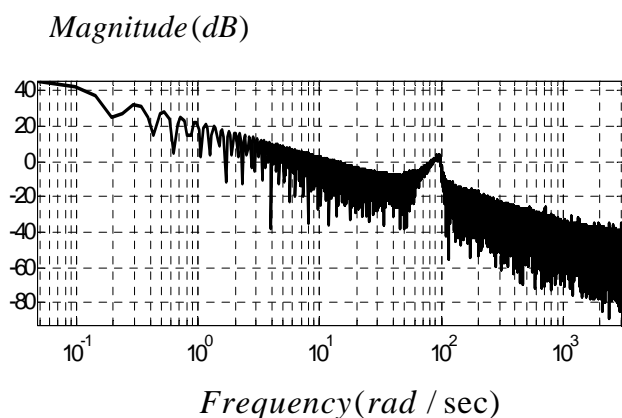


รูปที่ 3 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่าน โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร็ว ดิจิตอลที่บนแขนหัวอ่าน โดยให้ความถี่ของระบบเคลื่อนที่จาก 0.1 ถึง 8 rad/s และ Amplitude 0.45 จากการทดลองได้ความถี่ธรรมชาติของระบบอยู่ที่ 86.58 เฮอร์ตซ์เช่นเดียวกับรูปที่ 4 และนำผลจากเซนเซอร์วัดความเร็วมาวิเคราะห์ทำให้ได้กราฟ FFT ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าความถี่ธรรมชาติของระบบจะอยู่ที่ 90 rad/s ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความไม่มั่นคงของระบบ

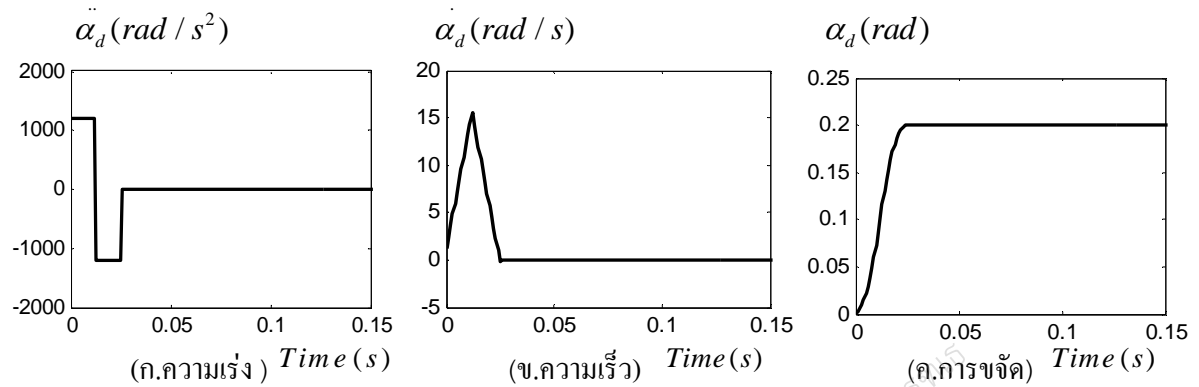


รูปที่ 5 กราฟ FFT

### พื้นฐานโครงสร้างของ Bang-Bang Command Profile

Bang-Bang Command Profile เป็นโครงสร้างที่ยังไม่ได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบ (Input) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มี Time Optimal Control แต่จะมีความถี่ที่สูง โดยกำหนดให้ระบบเคลื่อนที่ไป 0.2 rad แรงบิดสูงสุดของระบบเท่ากับ 1200 Nm ทำให้ได้ Reference Signals ได้แก่ความเร็ว ความเร่งและการขจัด มี Power

Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ ดังรูปที่ 6(ก) รูปที่ 6(ข) และรูปที่ 6(ค) ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PD Controller ซึ่งใช้  $K_p$  เท่ากับ 68 และ  $K_d$  เท่ากับ 0.1

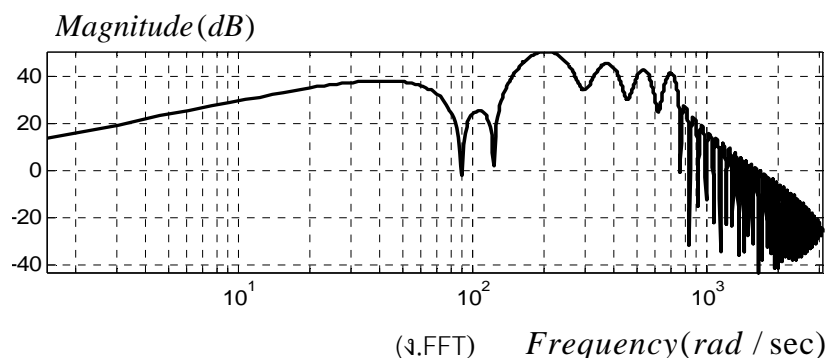
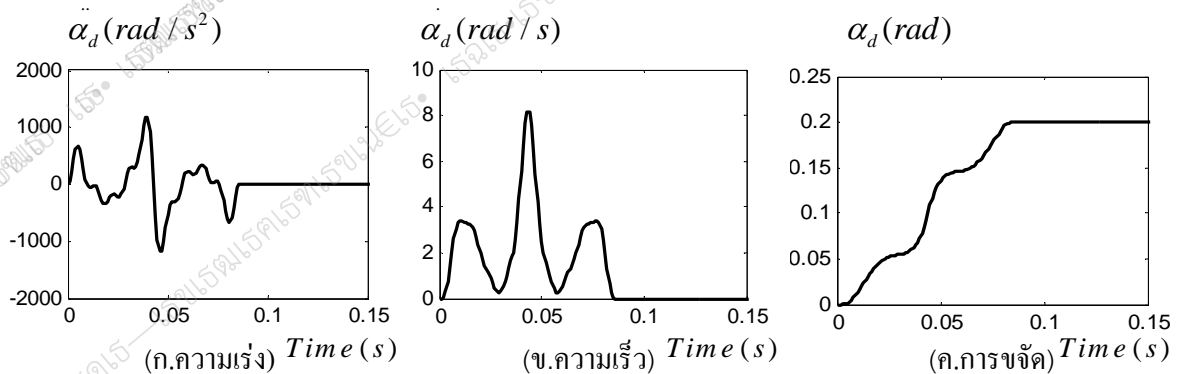


รูปที่ 6 Reference signal ของ Bang-Bang command

### พื้นฐานโครงสร้างของ Ramped Sinusoidal Command Profile

เนื่องจากแขนหัวอ่านมีการใส่พลังงานกระตุ้นเข้าไปเพื่อให้แขนหัวอ่านเกิดการเคลื่อนที่ไปตามมุมที่ต้องการ และถ้าความถี่ของพลังงานกระตุ้นมีค่าที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ จะทำให้ระบบเกิดการสั่น (Resonance) ทำให้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายช้าลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการลดค่าความถี่ของพลังงานกระตุ้นให้มีค่าน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ โดยใช้  $\rho$  เท่ากับ 0.08  $L$  เท่ากับ 10 และ  $\tau_{max}$  เท่ากับ 1200 Nm

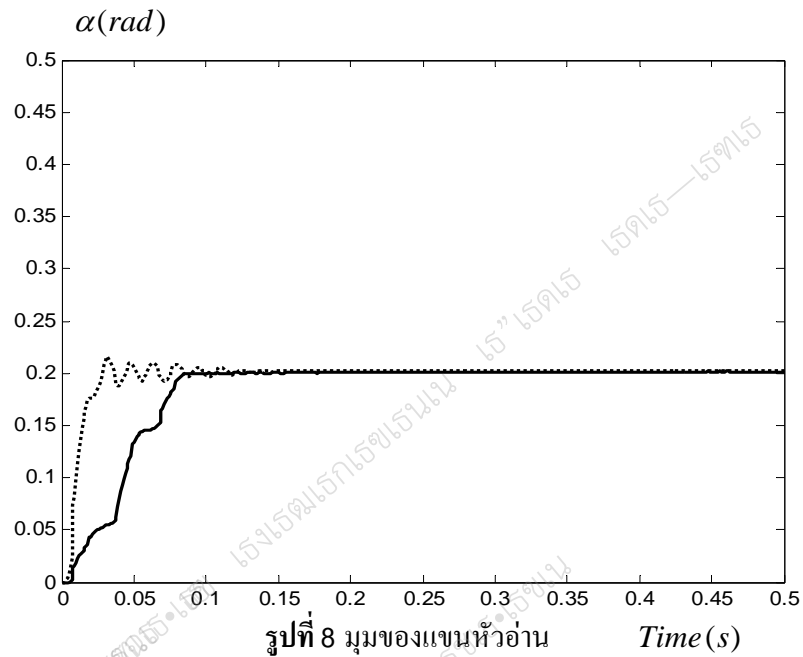
จากรูปที่ 7(ก) ถึง 7(ค) เป็น Reference Signals ที่มีลดค่าความถี่ของพลังงานกระตุ้นในช่วงของความถี่ธรรมชาติให้มีค่าที่ลดลง และ รูปที่ 7(ง) เป็น FFT แสดงขนาดของความถี่ที่ลดลงในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติ



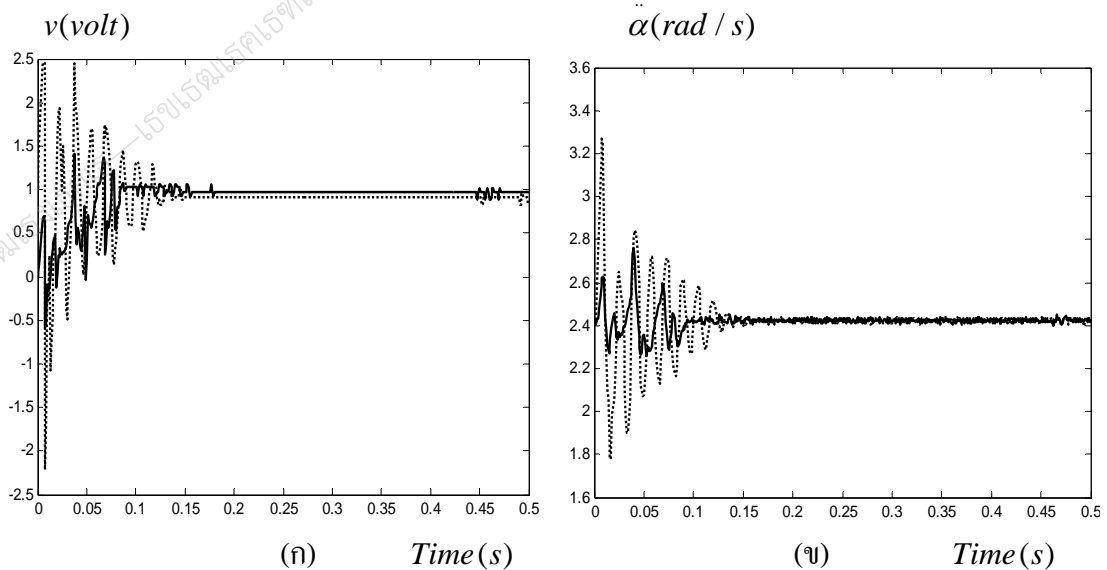
รูปที่ 7 Reference signal ของ Ramped Sinusoidal Command และ FFT

### ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งเป้าหมายของระบบที่ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีงจะสามารถเข้าสู่ Settling Time ได้เร็วกว่า Bang-Bang Command ที่มีช่วงของเวลาในการเคลื่อนที่ที่รวดเร็วกว่าแต่จะมี Overshoot ที่สูงซึ่งเป็นผลให้เมื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายจะเกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีงระบบจะเข้าสู่ Settling Time ที่ 0.085 s แต่ Bang-Bang Command จะเข้าสู่ที่ 0.12 s



จากรูปที่ 9(ก) แสดง Input Voltages ที่ใช้ในการทดลองทั้งสองกรณีโดยจะเห็นได้ว่า Bang-Bang Command จะมีปริมาณการใช้ Voltages ในการควบคุมระบบให้เคลื่อนที่มากกว่าเทคนิคคอมมานด์เซปปีงซึ่งเป็นกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัญญาณ Input ทำให้มี Amplitude ที่ต่ำเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ให้มี Overshoot ที่น้อย ส่วน รูปที่ 9(ข) เป็นรูปที่แสดงข้อเปรียบเทียบความเร่งของระบบระหว่างทั้งสองกรณี



รูปที่ 9 (ก) Input Voltages สำหรับทั้งสองกรณี (ข) ความเร่งของทั้งสองกรณี

## สรุป

เทคนิคคอมมานด์เชปปีงซึ่งอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันเร็มไซนูซอยด์ซึ่งใช้ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ให้มีระดับที่เหมาะสม เพื่อลดค่าของพลังงานที่ใกล้กับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ซึ่งเป็นผลให้แกนของหัวอ่านเคลื่อนที่ไปถึง Settling Time ได้อย่างรวดเร็วและมีค่า Overshoot ที่น้อย ดังนั้นจึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความแม่นยำที่สูงและต้องการความเร็วในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาประจำปีงบประมาณ 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำที่ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสันสะเทือน (CRV Lab) ซึ่งตั้งอยู่ที่สถาบันคโนว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้รับทุนการสนับสนุนบางส่วนจากสถาบันคโนว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การสันสะเทือนเชิงกล. สำนักพิมพ์ที่ออป, กรุงเทพฯ.
- [2] Chatlatanagulchai, W. 2006. Command Shaping Applied to a Flexible Robot with Configuration-Dependent Resonance. Proc. American Control Conference Minneapolis:1766-1711.
- [3] Meckl, P.H. 1988. Control of vibration in mechanical system using shaped reference input. Ph.D. dissertation Dept. Mechanical Eng, Massachusetts Institute of Technology.
- [4] Gul, K. A. 2003. Command Shaping Control for the Z-axis of a Wire Bonder for Reducing Residual Vibration. M.S. thesis M.E., Purdue University.
- [5] Reynolds, M.C. 2004. The Application of command shaping to The Tracking Problem. Ph.D. Thesis M.E. Purdue University.
- [6] Takaishi, K. and S. saito. 2003. Seek Control and Settling Control Taming Actuator Resonance of Hand Disk Drives. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 39, No. 2:838-843.
- [7] Muhammad, A.H. and A. M. Ahmad. 2006. A Nonlinear PID Servo Controller for Computer Hard Disk Drives. IEEE Control Systems Magazine, pp.672-676
- [8] Li, Y., G. Guoxiao. and W. Youyi. 2004. A Nonlinear Control Scheme for Fast Settling in Hard Disk Drives. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 40, No. 4, pp.2086-2088.