

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชน
ระบบผลิตอัตโนมัติเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูง

เรื่อง

A New Paradigm for Fixtureless Robotic Manufacturing

โดย

ผศ.ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2548

รูปแบบใหม่ในระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไร้การจับยึด

A New Paradigm for Fixtureless Robotic Manufacturing

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์จากการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector ของหุ่นยนต์ โดยศึกษาทดลองบนหุ่นยนต์ CRS Robotics System ที่ติดตั้งเซนเซอร์ที่ปลายแขน การใช้ข้อมูลป้อนกลับจากปลายแขนโดยตั้งทำให้หุ่นยนต์สามารถทราบตำแหน่งสัมพันธ์กับวัตถุและเข้าจัดการกับวัตถุได้อย่างแม่นยำ และลดความจำเป็นในการใช้อุปกรณ์จับยึดที่มีราคาแพง การศึกษาเบื้องต้นได้ใช้ LPS และ อุปกรณ์ตรวจจับแรงติดตั้งที่ End Effector และนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจจับทั้งสองเข้ามาป้อนกลับเพื่อควบคุมการควบคุมจะอาศัยการประมาณจาโคเบียนในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และนำข้อมูลจากเซนเซอร์ LPS และ อุปกรณ์ตรวจจับแรงป้อนกลับมาควบคุมทางเดิน การวัดตำแหน่งปลายแขนใช้อุปกรณ์ Fastrak® ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มความแม่นยำให้กับหุ่นยนต์ด้วยวิธีการที่นำเสนอ และหุ่นยนต์ก็สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการดังนี้

1. P. Srikamhang, and R. Chanchaeroen, "Real-time friction compensation of a dc motor system using feedforward dither-based technique," Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics, Bangkok, Thailand, May 2003.
2. S. Kantacheerawat, and R. Chanchaeroen, "Determination of stick-slip friction characteristic in conjunction with a plant parameter," Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics, Bangkok, Thailand, May 2003.
3. รัชทิน จันทรเจริญ, "เทคนิคการจับควบคุม End Effector ของหุ่นยนต์ด้วยเซนเซอร์," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ปราณบุรี, 2546
4. S. Chantranuwathana, Jarubut Kananai, Ratchatin Chanchaeroen, "Development of Laser Positioning System for Fixtureless Robotic Manufacturing," National Science and Technology Development Agency (NSTDA) Annual Conference 2005, March 28-30, 2005, Science Park, Thailand (pdf in Thai)
5. Chanchaeroen R., Kananai J., Chantranuwathana S. Fixtureless Robotic Manufacturing System. (submitted to ME-nett 19)

งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาอุปกรณ์วัดตำแหน่งโดยใช้แสงเลเซอร์ (Laser Tracking System) เพื่อวัดตำแหน่งของวัตถุในขณะทำงาน ซึ่งจะทำให้สามารถวัดตำแหน่งวัตถุได้ด้วยความแม่นยำสูงสุด ปัจจุบันได้ออกแบบต้นแบบของอุปกรณ์วัดตำแหน่งโดยใช้แสงเลเซอร์ หรือ Chula LTS และอยู่ในช่วงการติดตั้งและทดลองควบคุม ผลการทดลองควบคุมเบื้องต้นพบว่าระบบ Laser Tracking System สามารถติดตามเป้าวัตถุได้ แต่ยังคงต้องปรับปรุงตัวควบคุมเพื่อให้สมรรถนะดีขึ้นไปอีก และได้พัฒนาชุดควบคุมหุ่นยนต์แบบ 5 แกนอิสระที่มีมอเตอร์เป็นแบบ DC

และชุดควบคุมหุ่นยนต์ที่มีมอเตอร์แบบ Stepper สองแกนสำหรับควบคุมทดแทน XY plotter ของ Roland นอกจากนี้ ยังได้พัฒนาระบบ Network สำหรับระบบ Manufacturing Cell เพื่อให้เครื่องจักรต่างๆ ในระบบสามารถสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูล

สำหรับงานวิจัยในเรื่องนี้ ได้ผลิตบัณฑิตในระดับบัณฑิตศึกษา ดังนี้

1. นายภิญโญ ศรีคำแหง เรื่อง ผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตความถี่สูงที่มีต่อความเสียหายในระบบทางกล, ปีการศึกษา 2545
2. นายสิริณัฐ ชันชวีวัฒน์ เรื่อง การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเสียหายที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูง, ปีการศึกษา 2546

และมีนิสิตที่อยู่ในระหว่างศึกษาดังนี้

- นาย มนต์รี บุญยะผลานันท์ รหัส 4570480621
- นาย จารุบุตร คณะนัย รหัส 4870576521

REAL-TIME FRICTION COMPENSATION OF A DC MOTOR SYSTEM USING FEEDFORWARD DITHER-BASED TECHNIQUE

P. Srikamhang, and R. Chancharoen,
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University,
Thailand.

E-mail: Phinyo.S@student.chula.ac.th

Abstract: This paper presents a real-time friction compensation for a mechanical plant. The study demonstrates effectiveness of both dither signal and friction compensation techniques in the reduction of the steady state error caused by stick-slip friction. The experimental results on a DC motor system show that the dither signal significantly improves the steady state error while the friction compensation reduces the time constant. In addition, both dither based and friction compensation techniques can be combined to reduce both types of errors. In addition, the selection method for the amplitude and frequency of dither signal that optimally reduce the steady state error are presented. Both simulations and experiments are used to validate the proposed technique.

Key words: friction compensation, dither, stick-slip, PD controller.

1. INTRODUCTION

Friction is highly nonlinear at low velocities and poses a considerable challenge in the control of mechanical systems such as machine tools, robots, tracking mechanisms, etc, which require precision positioning. Friction is commonly neglected since the traditional PID controller with appropriate gains normally gives a stable performance with error within the acceptable limit. However, friction compensation may be required for high precision positioning or system control at low velocities. Friction compensation is a challenging task since it is difficult to model and barely understood. In recent years, there has been progress in developing friction models for compensation. Both dynamic and empirical friction models have successfully captured pertinent friction characteristics such as Dahl, LuGre, Bliman-Sorine and Bristle model, etc. (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993; Haessig, Jr. & Friedland, 1991)

The presence of friction often imposes limits on positioning, tracking performance and accuracy of position control. This phenomenon causes a limit cycles (Canudas et al, 1995) and positioning error in control systems. If the system with friction is linear and operated only at high velocities without changing directions, i.e., without crossing zero velocity, friction can be modeled as a linear function of velocity (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993; Haessig, Jr. & Friedland, 1991). A simple PD controller with a velocity feedback control can compensate for friction. On the other hand, if system operated at low velocities or with direction reversals, the ordinary PD control may be ineffective. When the traditional integral control is included in the feedback controller, the presence of stiction causes the system to stick near zero-velocity position (Lee & Asada, 1997; Ipri & Asada, 1995) and start to move when the controller output is greater than the level of stiction force.

On the other hand, the simple high frequency dither technique reduces the effect of friction between parts in relative motion. A successful example is the use of dither in gyroscopes for autopilots in the 1940s, where dither signal was obtained simply by a mechanical vibrator (Ehrich & Krishnaprasad, 1991).

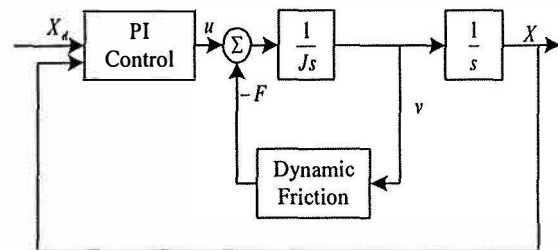


Figure 1. Block diagram for PI-Control.

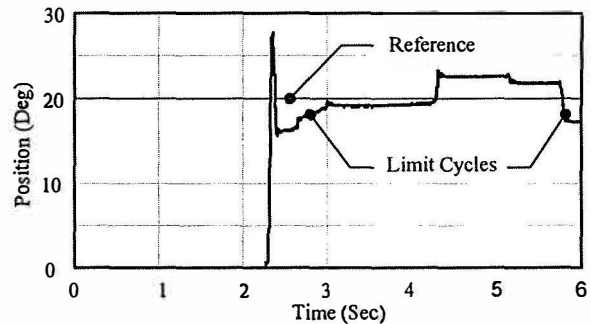


Figure 2. Limit Cycles on DC Motor System.

The mechanism of the dither-based technique introduces extra forces to move the system move before reaches the stiction level. It is introduced in the position control of pneumatic lifters system (Maeda et al., 2000), which does not induce limit cycles, commonly found in integral control.

The paper also addresses the model based friction compensation. The model of friction is determined offline and used to estimate and compensate for the instantaneous friction. This technique improves the transient performance.

This study applied both techniques, dither signal and friction compensation through a friction model, to reduce steady-state error on a DC motor and improve the transient performance. Both simulations and experiments demonstrate the reduction of the error and the improvement of transient response.

2. STICK-SLIP FRICTION

Stick-slip friction is a common friction phenomenon occurred in low velocity system (Armstrong-Hélouvy, 1993). It manifests itself as repeated sequences of sticking between two surfaces with static friction, followed by sliding or slipping of the two surfaces with kinetic friction. It is found in the transmission elements in robotic manipulators such as harmonic drive, gears, pulleys etc.

Stick-slip is a seriously problem in low speed motion, causing a stable limit cycle near a reference position with integral control, as shown in Figure 1. Hence, a system under integral control is unstable when the moving body is stuck and the control gain is too high. As time progresses, the integral error, which is building up to move the body from its stuck configuration, becomes so high that the body overshoots the origin and comes to rest at another position. This phenomenon is illustrated by DC motor experimental results as shown in Figure 2.

3. FRICTION COMPENSATION

There are two major friction compensation techniques, model-based and non-model-based friction compensation. Examples of the non-model-based friction compensation techniques include stiff PD control, integral control, dither, impulsive control, and joint torque control, etc. The increase of the damping or the stiff of the system can eliminate the stick-slip motion; by increasing the PD gain, the stiff of the system increases. This is a very simple way to control the system with friction. However, the high control effort is limited by the hardware. Normally, the stiff PD control is used for a stable tracking while the integral control is used to minimize the steady state error. Nevertheless, the system exhibits limit cycles at low or zero velocity tracking. In addition, integral control may be ineffective at velocity reversals. Integral windup is normally reset at velocity reversals, causing the minimal effect of integral action when most needed to overcome the stiction.

The dither-based technique can effectively improve the control performance of the system with friction. This technique is mainly used in this study. The other similar technique, called impulsive control, applies the impulses to the system at low or zero velocity.

For the model-based friction compensation, the estimated friction torque is calculated by the friction model and an equal and opposite torque is applied to the system to cancel out the instantaneous friction torque. The model-based friction compensation may decrease the need for the high servo gains. The Coulomb friction model is the simplest and widely used but the richer friction models can further improve the performance. The major difficulty is the friction modeling at very low velocities. Several practical problems must be addressed, such as the almost undetectable nonlinear phenomena, and the unmeasurable internal states of the model, etc. In this study, the Coulomb viscous friction model is used for the friction compensation since it is most suitable for typical system sensing.

As mentioned earlier, the study has focused on two effective friction compensation techniques, dither-based and the use of Coulomb viscous friction model. Both techniques are combined together to take advantages of each method.

3.1 Feedforward Dither-based Technique

Dither is a practical technique to reduce the nonlinear effects of friction at low velocities. The mechanism of dither introduces extra forces to move the system before the stiction level is reached. In 1969, a mechanical vibrator was used to

reduce the coefficient of kinetic friction in servo system, as shown in Figure 3. Electrical dither signals can also be superimposed on the command signals generated by the controller as shown in Figure 4. The frequency of dither is normally much higher than the frequency of the command signals.

3.2 Model Based Friction Compensation

Several schemes for model-based friction compensation have been proposed (Adams & Payandeh, 1996; Ehrich & Krishnaprasad, 1991). If a servomechanism is operated at low velocity or with velocity reversal, then effective friction compensation is required to achieve good precision. To obtain an effective friction compensation, the velocity has to be measured or estimated with good resolution and small time delay. The mechanism of model based friction compensation is very simple. The friction force is estimated using the appropriate friction model, which may be determined offline. The estimated signal is then used to compensate the real friction by adding to the control signal. This is showed in the block diagram in Figure 5.

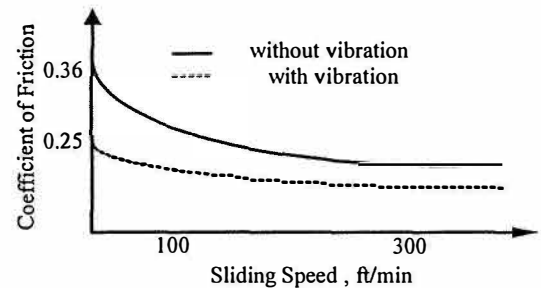


Figure 3. Friction Coefficient in Motor System. (Sinsookh, 1969)

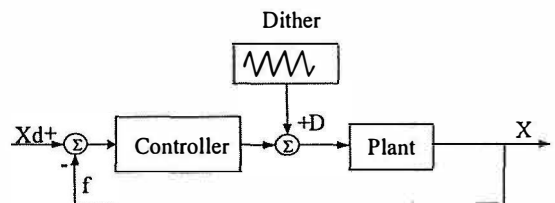


Figure 4. System with Dither.

This paper addresses the effects of friction compensation to improve a positioning control of a DC motor by dither based technique. The effect of the amplitude and frequency of dither is investigated. The model based friction compensator is also discussed and demonstrated.

4. SIMULATION

The simulation is used to study the role of the nonlinear friction that was strongly related to the steady-state error in a motor system. In the simulation, both inherent nonlinear characteristics of the motor system and the simulated friction found in the experimental equipment, are taken into account. The dynamics of the DC motor system is:

$$J\ddot{\theta} = \tau_{motor} - \tau_f \quad (1)$$

where J is the motor's inertia = 0.0011 kg.m². Friction behavior can be expressed as follows (Adams & Payandeh, 1996):

$$\tau_f = \lambda(\dot{\theta}) \cdot \tau_{slip}(\dot{\theta}) + (1 - \lambda(\dot{\theta})) \cdot \tau_{stick}(\dot{\theta}) \quad (2)$$

where:

$$\lambda(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} \leq 0 \end{cases},$$

$$\tau_{stick} = k\dot{\theta},$$

$$\tau_{slip} = \text{sgn}(\dot{\theta}) \left[k\alpha + (\tau_{slip,0} - k\alpha)(1 - e^{-a\dot{\theta}}) \right] + b\dot{\theta},$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} = 0 \\ -1 & \dot{\theta} < 0 \end{cases}.$$

In the simulation, friction parameters are given as $\tau_{slip,0} = 0.8$, $\alpha = 0.1$, $k = 15$, $a = 0.5$, and $b = 0.01$.

The mathematical model of the friction compensator is expressed by Equation 3. The friction model is assumed to be imperfect and the estimated friction does not match the real friction. This is important for realistic simulation. The simulation block diagram is shown in Figure 5. The compensator is modeled by Coulomb and Stribeck's model as follows (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993):

$$F = \begin{cases} F(v); v \neq 0 \\ F_s; v = 0 \text{ and } |F_e| < F_s \\ F_s \text{sgn}(F_e); \text{otherwise } (v = 0 \text{ and } |F_e| \geq F_s) \end{cases} \quad (3)$$

where

$$F(v) = F_c + (F_s - F_c)e^{-|v|/v_s} + F_r v$$

The simulation is performed on Matlab[®]/Simulink[™] and used for a comparative study on four types of control techniques, consisting of PD, PD+compensator, PD+dither, and PD+compensator+dither. The proportional and derivative gains are 2 and 0.2 respectively. The dither is a sinusoidal signal with the amplitude equal to the maximum statics friction of 1.5 N.m. The optimum frequency of 100 Hz is determined from the range between 0.1 to 1000 Hz. The step command of 20 deg is applied to the system

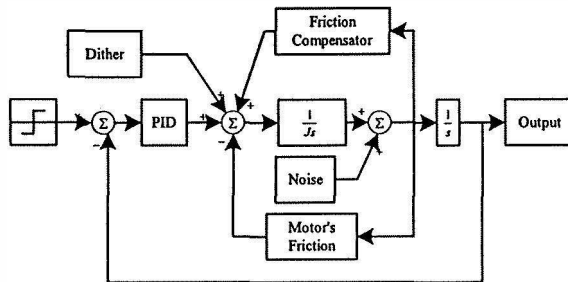


Figure 5. Block diagram of control system for DC motor.

The PD plus friction compensator demonstrates a good rise time (0.06 sec) compared to the only PD control (0.11 sec) while the PD plus dither significantly reduces the steady state error to 0.0004%. However, when both friction compensator and dither are used, the rise time decrease (0.09 sec) but the steady state error also increases (0.148 %).

Table 1. Errors analysis by simulation.

Control Techniques	Error (%)	Rise-time (sec)
PD	0.0490	0.11
PD + Compensator	0.0052	0.06
PD + Dither	0.0004	0.11
PD + Compensator + Dither	0.1480	0.09

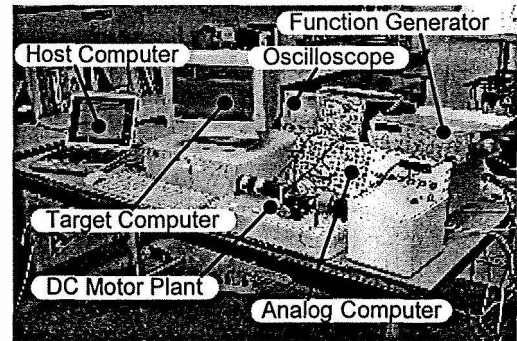
Table 1 summarizes the comparison between four techniques, which used to control the DC motor system. The PD plus dither gives the minimum steady state error while the PD plus friction compensation has the minimum rise time. When both dither and friction compensator are applied, the command input to the motor is much larger than necessity overcome the static friction and thus the steady state error increases.

5. EXPERIMENT AND RESULTS

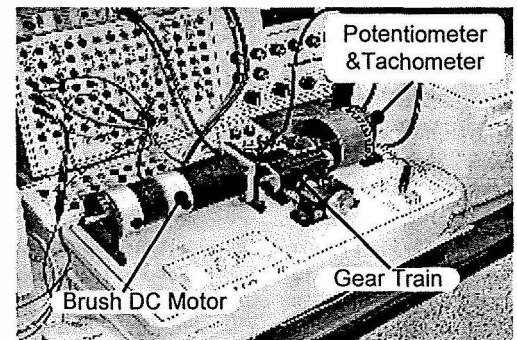
5.1 Experimental Setup

The DC motor system model 767 from Comdyna, Inc. is used for the experimental study. The motor system has a mechanism for adjusting the friction force as shown in Figure 6. This system is designed to emulate a typical rotational mechanical system. A mass inertia is attached the motor via gear transmission and friction adjusting assembly. The precision potentiometer model 6539 from BOURNS Co. is coupled at the end of the mass.

The input and output signals are connected between plant and controller via an analog computer model GP-6 from Comdyna, Inc. The Matlab[®]/Simulink[™] -xPC Target is used for a real-time control of the system. The PA-ST12 (-H) card from Acutec Corporation is employed for data acquisition and control. The card communicates with target computer via ISA bus. Two Accton LAN cards are installed on both a host computer and a target computer, and is used for a host and target communication via TCP/IP.



(a) Experimental Setup.



(b) The DC motor system.

Figure 6. The DC motor system.

The Matlab[®]/Simulink[™] -xPC allows us to develop a control on the host computer in the Microsoft[®] Windows 2000 environment. Once the control model is designed, it can be downloaded to the target PC. The target PC runs the control algorithm in real time. The sampling time of the control system is set to 0.001 sec.

The dither signal is generated by the signal generator and is superimposed to the control signal via the summer circuit on the analog computer. Thus, the frequency of the dither is not limited to the speed of the real time operating system and can be as high as the signal generator can generate.

The friction compensator is determined offline and is implemented on Simulink™-xPC. The Coulomb viscous is used for the friction model since it is closed to the friction characteristics that is detected with the system sensing.

5.2 Experiment Procedure

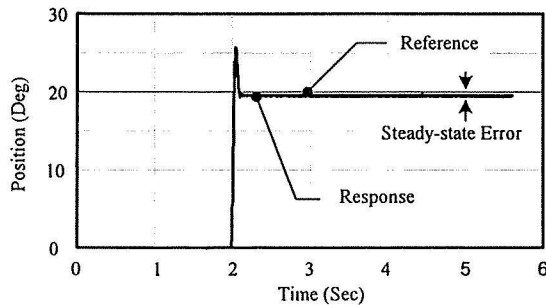
First, the maximum static friction torque is identified by slowly applying the torque until the motor begins to rotate. This torque is the maximum static friction and is found to be 0.6 N.m. for the employed system. This value is used as the reference for the design of the friction compensator and dither amplitude.

The reference command step of 20 degrees is used. In the experiment, four control techniques are used to control the DC motor system. There are PD, PD+compensator, PD+dither, and PD+compensator+dither, as in the simulation. The dither is a sinusoidal signal generated by the signal generator. The amplitude and frequency of the dither signal are ± 0.6 N.m. and 100 Hz, respectively. The friction compensator is a velocity-based model, expressed by Equation 3. The maximum static friction in the model is 0.3 N.m. The step responses from each technique are shown in Figure 7.

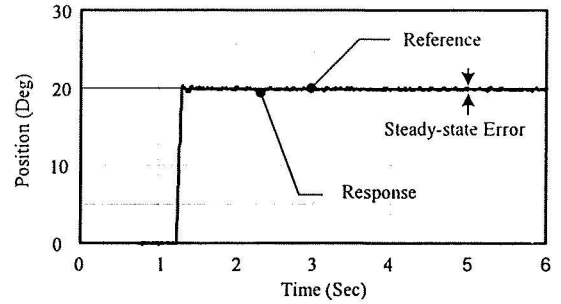
The experimental results agree with the simulation, i.e., the PD+dither technique gives a minimum steady state error (0.7 % error) while the PD+compensator gives the minimum rise-time (0.04 sec).

Table 2 shows the errors when the various amplitudes of dither are considered. The dither's amplitude varies from ± 0.4 to ± 0.7 N.m while the frequency is fixed at 100 Hz. In this experiment, the PD and friction compensation is already applied. This is to study the effect of amplitude of dither when the both dither and friction compensation are both applied to the PD controller. The minimum error occurs when the amplitude is equal to ± 0.5 N.m, which is less than the static friction of ± 0.6 N.m. This is because a part of friction has already been cancelled by compensator and a smaller amplitude of dither should be used. The larger amplitude of dither such as ± 0.6 and 0.7 N.m. do increases the error.

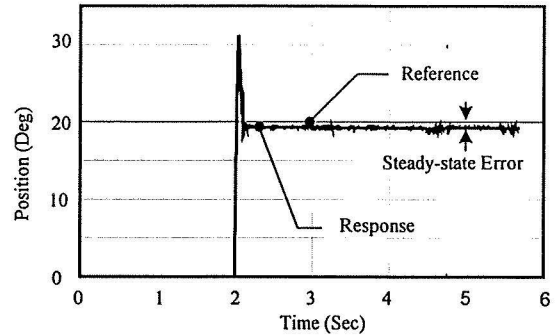
Both dither based and model based friction compensation can be integrated. However, the amplitude of dither should be smaller than the static friction in order to gain the advantages of both techniques.



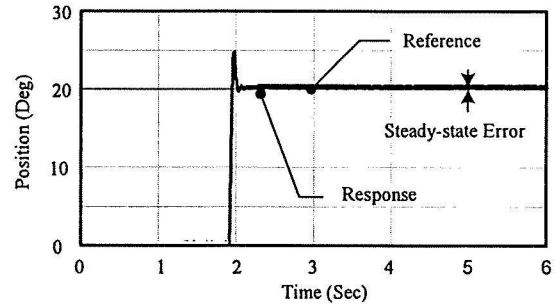
(a) PD Control.



(b) PD and Dither control.



(c) PD and Friction Compensation.



(d) PD with Dither and Friction Compensation.

Figure 7. Step responses with the control techniques

Table 2. The effect of dither's amplitude.

Amplitude of Dither (N.m)	Error (%)
± 0.4	9.00
± 0.5	0.15
± 0.6	7.05
± 0.7	5.90

5.3 Error Boundary Analysis

In the section 5.2, the steady-state errors are found to depend on the frequency and amplitude of dither. In this section, the boundary of error of a different mechanical system, i.e., the waist joint of the CRS Robotics system is investigated. This robotics system, shown in Figure 8, is equipped with more accurate positioning sensors than that of the DC motor system in the earlier experiment. The positioning sensors of the CRS Robotics system are optical incremental encoders while the sensor of the DC motor system is a high precision potentiometer.

The maximum static friction of the waist joint in this CRS robotics system is determined as 0.3 N.m. In this study, both dither amplitude and frequency are varied to see the effects of both parameters. The frequency of dither is varied from 0.1 to 1000 Hz and the amplitude from 0.1 to 0.5 N.m. Both

simulation and experiment are performed and the results are shown in Figure 9. In the simulation, the maximum static friction of 1.5 N.m. is used while 0.3 N.m. is used in the experiment.

Both simulation and experiment demonstrate that the amplitude of dither closed to the static friction (1.5 in simulation and 0.3 in experiment) can effectively reduce the steady state error.

When the dither frequency is between 10 to 120 Hz, dither successfully decreases the steady state error. In contrast to the real experimentation, the dither of higher frequency (>120 Hz) is effective in the simulation. This discrepancy is due to the fact that the frequency exceeds the bandwidth of the servo system. The dither frequency less than 10 Hz is too low and unable to compensate the stiction completely.

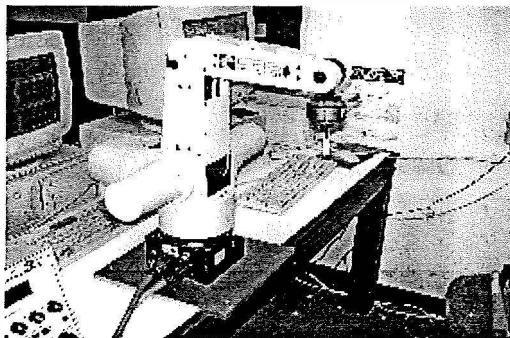
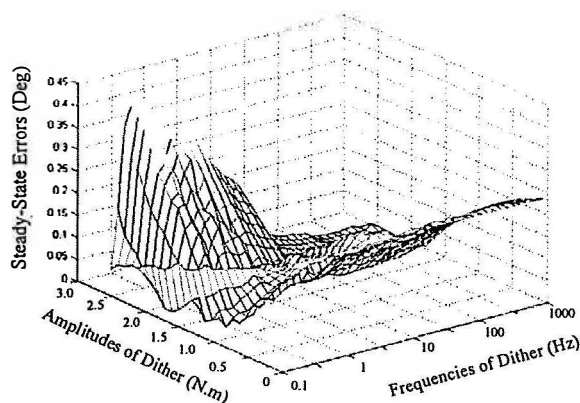
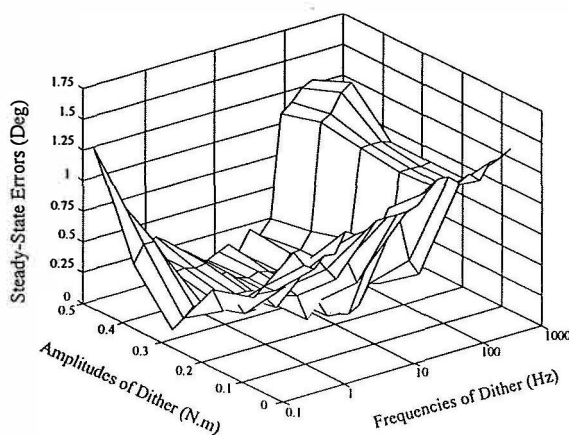


Figure 8. CRS Robotics system.



(a) Simulation result.



(b) Experimental result on CRS Robotics system

Figure 9. The effects of the frequency and amplitude of dither.

6. CONCLUSIONS

The dither can drastically decrease the steady state error of a system with stick slip friction. The amplitude of the dither should be as high as the maximum static friction while the frequency must be within the effective range. The friction compensator can decrease the error and significantly reduce the rise time. Since the friction model is not perfect, the friction compensator cannot completely cancel the real friction. The dither-based technique can be integrated to the friction compensator to improve the effectiveness of the compensator. For the integration, the dither amplitude is not as high as the maximum static friction. The experiment may be used to determine the appropriate amplitude for this case.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank Dr. W. Lertpiriyasuwat for his valuable suggestions regarding to friction models and experimental implementation issues. Finally, I would also thank MTEC for financial support.

REFERENCES

- Brian Armstrong-Hélouvry & Pierre Dupont (1993). Friction Modeling for Control, Proceeding of the American Control Conference, pp. 1905-9, San Francisco, June 1993, California.
- Brian Armstrong-Hélouvry (1993). Stick Slip and Control in Low-Speed Motion, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, No.10, pp. 1483-96, October 1993.
- C. Canudas de wit; H. Olsson; K. J. Astrom & P. Lischinsky (1995). A New Model for Control of System with Friction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No.3, pp 419-25, Mar 1995.
- Chalit Sinsookh (1969). The Effect of Mechanical Vibration on Kinetic Friction, Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 1969.
- D.A. Haessig, Jr. & B. Friedland (1991). On the Modeling and Simulation of Friction, ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol.113, 1991, pp 354-62.
- J. Adams & S. Payandeh (1996). On Methods for Low Velocity Friction Compensation: Theory and Experimental Study, Journal of Robotic Systems, Vol. 13, No.66, pp 901-404, 1996.
- Naomi Elizabeth Ehrich & P.S. Krishnaprasad (1991). An Investigation of Control Strategies for Friction Compensation, 1991, available from: http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/MS_91-4/MS_91-4.phtml.
- Satoshi Maeda; Yukio Kawakami & Kazuo Nakano (2000). Position Control of Pneumatic Lifters, 2000, Available from: http://www.callisto.si.usherb.ca/~fluo2000/PDF/FI_033.pdf.
- Sooyong Lee & Haruhiko Asada (1997). Assembly Automation using Vibratory End Effector: Modeling and Stability Analysis, IEEE conference on Robotic and Automation Albuquerque, pp 1980-5, New Mexico, 1997.
- Susan L. Ipri & Haruhiko Asada (1995). Tuned Dither for Friction Suppression During Force-Guided Robotic Assembly, IEEE conference on Robotic and Automation, pp 310-5, 1995.

DETERMINATION OF STICK-SLIP FRICTION CHARACTERISTIC IN CONJUNCTION WITH A PLANT PARAMETER

Siranat Kantacheerawat, and Ratchatin Chanchareon
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Thailand

Abstract: Friction estimation and compensation have been extensively studied in recent years. The friction model can enhance the control performance by compensation of the actual friction. The characteristic of friction is a complex phenomenon, especially when the relative velocity between contacting surfaces is very low. In general, it is very difficult to determine the precise friction model that can capture the real friction accurately. The study on CRS robotics system requires a more challenging task since the friction characteristic must be determined in conjunction with a varying joint inertia. In this work, a practical solution is proposed. Since only when both friction characteristic and plant inertia are determined simultaneously, they are accurately determined. Experimental results on CRS robotics system demonstrate the advantages of the proposed technique, used as an example.

Key words: friction model, friction characteristics.

1. INTRODUCTION

Friction is present in most servo systems and often causes undesirable effects such as limiting the accuracy of control system performance. Friction characteristics have been extensively studied in tribology in order to reduce machine wear and aging as well as in dynamics and control to enhance the control performance. Friction is a very complex phenomena (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993; Dupont, 1994), especially at low velocity (Armstrong-Hélouvy, 1993). The friction characteristics include Coulomb and viscous friction, stiction effect, memory effect, presliding displacement, hysteresis and varying break-away force (Canudas de Wit et al., 1995). Still, it is very difficult to understand behaviors such as the role of lubrication, the friction and surface roughness and the Mica experiment (Canudas de Wit et al., 1995). In recent years, several empirical friction models, such as Dahl, Coulomb and LuGre friction models (Armstrong, 1999), have been developed to capture significant characteristics of friction. When friction is accurately modeled, the friction can be predicted and then compensated to improve the control performance. The other technique to compensate for friction is to apply the dither into the system. (Ipri & Asada, 1995). The difficulty of the dither-based technique is the appropriate frequency and amplitude of dither selection for the system.

Determination of an appropriate friction model and its parameter for a real mechanical system is a very challenging task. A mechanical system normally does not exhibit all friction phenomenon, as explained earlier, and none of the friction model can capture all friction characteristics. Thus, the friction characteristics during a normal process should be investigated in order to choose the proper friction model for that particular system.

This paper presents a practical approach to determine friction characteristics of a typical mechanical system. The system is equipped with position sensor, such as incremental encoder, while the system inertia is unknown and varying. In this case, both friction characteristics and system inertia must be determined simultaneously. This process requires a good measurement of velocity and acceleration, which are numerically estimated from the system position and time. The practical technique to suppress the amplify noise caused by the numerical differentiation, is also introduced. Hence, the friction can be captured at real time. Both simulation and experiment on CRS robotics system are used to demonstrate effectiveness of the technique.

2. FRICTION MODEL

Despite several empirical friction models has been proposed, the simple Coulomb and viscous friction model is used in this study to capture friction characteristics in process. This model may not be able to capture most nonlinear effects demonstrated at low velocity but is good enough for the determination of plant inertia. Once the inertia is estimated, the actual characteristic is determined in real time.

Coulomb and viscous friction model

The Coulomb friction model is a one of the classical model. This model describe the friction is proportional to normal load. The theory of hydrodynamics was developed and led to expressions for the friction force caused by viscosity of lubricants in term of velocity. The model can be expressed as:

$$F = \begin{cases} F(v), v \neq 0 \\ F_e; v=0 \text{ and } |F_e| < F_s \\ F_s \text{sgn}(F_e); (v=0 \text{ and } |F_e| \geq F_s) \end{cases} \quad (1)$$

Where $F(v) = F_c + F_r v$,

F_c is the force act to object,

F_s is the break away force,

$F_r v$ is the friction force from viscosity,

For this Coulomb and viscous friction model, friction force (torque) is a function of velocity; except at the zero velocity where the friction force is determined from the equilibrium condition as shown in Figure 1. Normally, the numerical differentiation is required to estimate the plant velocity and acceleration since only position sensor is installed.

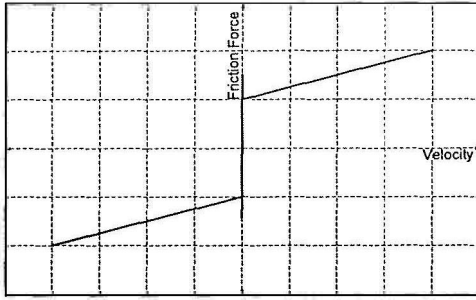


Figure 1. Coulomb and Viscous Friction Model.

3. NUMERICAL DIFFERENTIATION

Numerical differentiation of the experimental data tends to amplify errors in the data. The determination of friction characteristic and system inertia simultaneously requires plant velocity and acceleration, which are estimated by the first and second order differentiation respectively. The numerical differentiation must be able to suppress the errors in order to get a clear picture of acceleration.

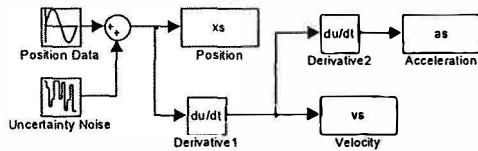


Figure 2. Simulation Block Diagram.

The simulation as shown in Figure 2 is used to determine the appropriate numerical differentiation technique. Consider the sinusoidal position data (1 peak to peak, 1 radians/s) containing ± 0.01 errors (Figure 3). The velocity, the derivative of position, is the sinusoidal with the phase lead of $\pi/2$ radians. The Finite-Divided-Difference approximation (Steven,1990) is not suitable for this application since it fails to adequately suppress the errors as demonstrated in Figure 4. The process significantly amplifies errors. Another method, the Richardson extrapolation technique (Steven,1990) still does not give a good result. The primary technique for determining derivatives of imprecise data is the least squares regression, which fits a low order polynomial function to the data. The derivative is then easily obtained by analytically differentiate this function.

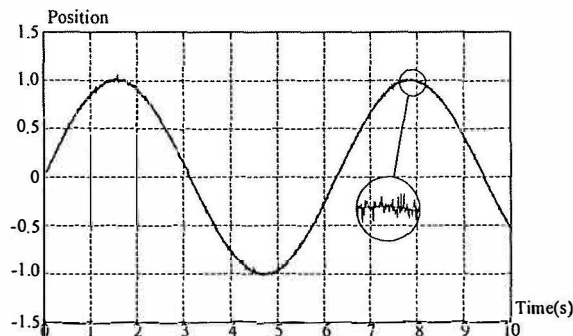


Figure 3. Position data containing errors.

The least square fitting tends to suppress errors, resulting in a more accurate and smooth velocity as shown in Figure 5. The fitting technique filters the high frequency velocity and gives a smooth trajectory. However, the least square fitting gives a good result only when the appropriate number of points is used in the fit. Figure 5a and 5b demonstrate the effect of the

number of points used in the fit: the larger the number of points, the smoother the trajectory. On the contrary, large number of points may distort the derivative as shown in Figure 5b. This technique may give a smooth trajectory but report a false derivative.

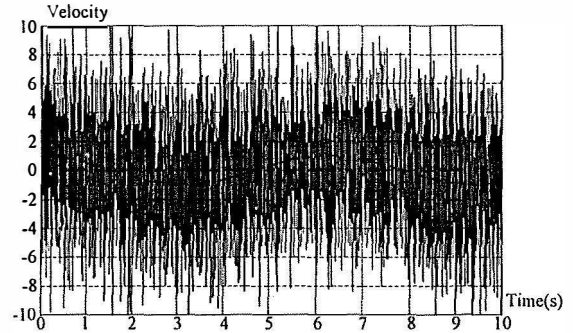
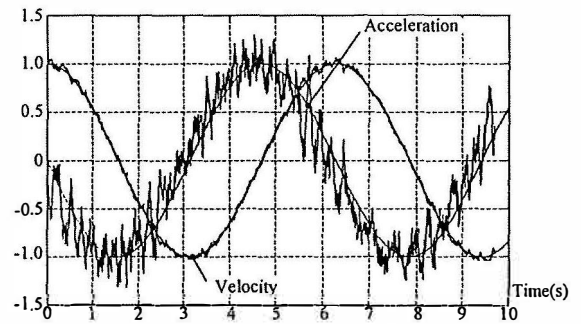
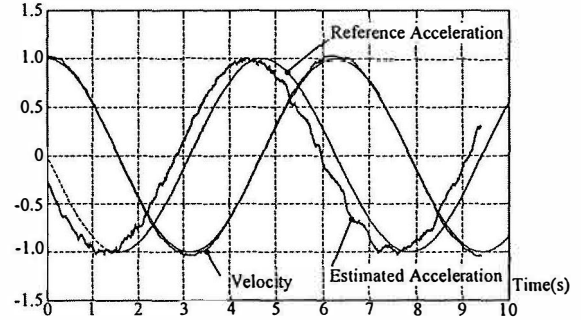


Figure 4. Velocity differentiated by Finite-Divided-Difference.



a) 150 Points curve fitting



b) 300 Points curve fitting

Figure 5. Velocity and acceleration by polynomial fitting.

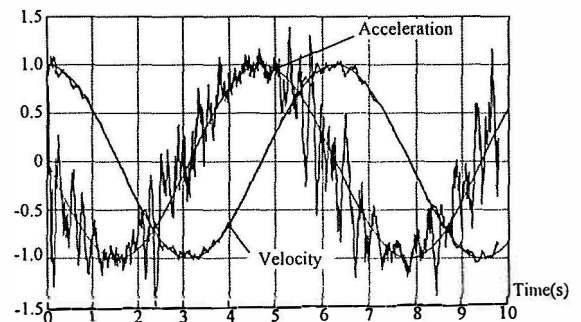


Figure 6. Velocity and acceleration by equal position difference.

Instead of using the number of points which are controlled by time, the derivatives are determined from equal space position difference in this case. The space of position is chosen to be large enough that the errors can be neglected due to their relatively small amplitudes. Thus, this is a practical technique

to determine the derivative of imprecise data with bounded errors. The time required to move the system over the space is used to determine the derivative using Finite-Divided-Difference. The curve fitting technique is then used to smooth the velocity curve. The velocity and acceleration, estimated by the proposed technique, are shown in Figure 6. This technique is very suitable for an offline calculation but causing a difficulty in the real time experiment since the time required to carry out the calculation is not constant.

4. EXPERIMENTAL SETUP

In the experiment, the commercial CRS robotics (Figure 7) is used to demonstrate our technique. The articulated robot has five degrees of freedom. The waist, shoulder, and elbow joints of the CRS robot are driven by permanent magnet DC motor through harmonic drive. The incremental encoder with the 1000 pulses/revolution resolution is installed to each joint to measure the joint position. In this experiment, only the waist joint is used.

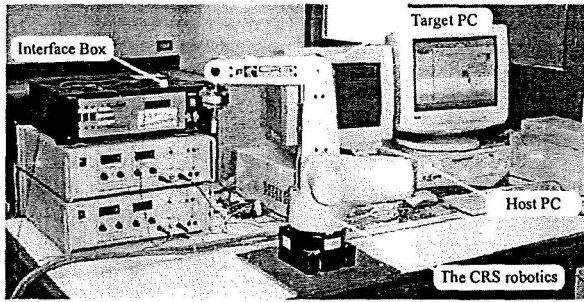


Figure 7. The CRS Robotics system and its Controller.

The robot controller is a personal computer with a six-channel DA card and digital input/output card. The DA card, PCL726 model from advantech corp., is used to send the command signal to drive the robot via the power amplifier circuit. The personal computer is also able to read all joint positions through the ET-PC8255 ISA card. This 24-bit resolution and three channels digital input/output card is used to read the joint positions. The robot controller interface has been designed with the interface box, consisting of the power amplifier circuit and the counter circuit.

The control algorithm is written in Matlab®/Simulink™ – xPC., which is a solution from The MathWorks, Inc for modeling, prototyping and deploying a real-time system using standard PC hardware. The user develops the algorithm in the host PC in the Microsoft® Windows environment and then loads the code to the target PC for a real time control. The host PC and the target PC are connected using standard TCP/IP protocol.

The experiment is used to demonstrate the technique to determine the stick-slip friction characteristic in conjunction with system inertia. Since only the position sensors are installed, the velocity and acceleration of the waist joint are estimated using the numerical method discussed in section 3. The proposed numerical differentiation technique does suppress the sensor noise quite well as seen in Figure 8. The velocity trajectory is quite smooth and the acceleration is readable.

The command is a sinusoidal signal. The amplitude and frequency of the signal are 0.61 volts and 1 radian/second, respectively. The sampling rate is 0.002 second. Then command signal and the joint position are then read back to generate the plot. The command signal is plotted against the joint velocity as shown in Figure 9.

Now, the command effort is divided into two terms, i.e., the friction torque and the acceleration torque. Once the friction and the acceleration torques are accurately separated, the friction torque can be plotted against the joint velocity to show the friction characteristics. However, the plant inertia is unknown in general, but for this robot, the inertia is varying with the shoulder and elbow positions.

Friction characteristics or the system inertia should not be determined separately, especially in the case of highly nonlinear friction. The detail of the technique used to simultaneous determination is discussed in the next section.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

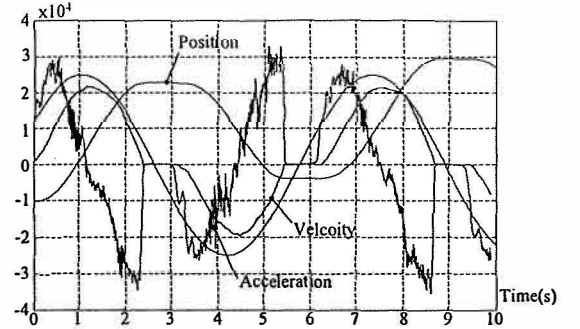


Figure 8. Joint position and its derivatives.

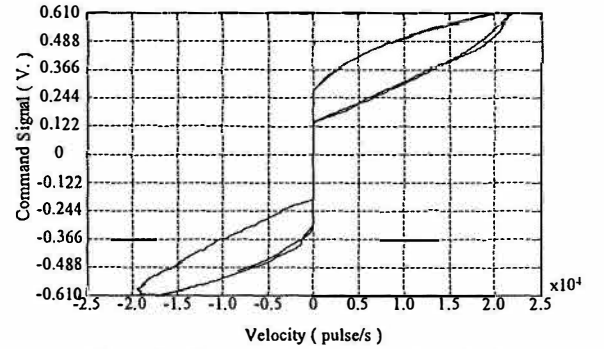


Figure 9. Command effort versus the velocity.

The equation of motion can be expressed as

$$\begin{aligned}\tau_{input} - \tau_{friction} &= J\ddot{\theta} \\ \tau_{friction} &= \tau_{input} - J\ddot{\theta}\end{aligned}\quad (2)$$

where $\tau_{friction}$ is a friction torque,
 τ_{input} is a torque input or command torque,
 J is system inertia, and
 $\ddot{\theta}$ is an acceleration of plant.

The coulomb viscous friction model is used to model the friction characteristics since the model is simple and the characteristics at low velocities are not detectable. The nonlinear least square error is used to determine the model parameter and the system inertia simultaneously.

The optimization function is expressed as

$$\text{minimize} \sum \left[\tau_{friction}(F_c, F_r, \theta) + J\ddot{\theta} - \tau \right]^2 \quad (3)$$

where $\tau_{friction}(\dot{\theta})$ is the Coulomb viscous friction model,
 F_c, F_r are the parameters of the friction model,
 J is the estimated system inertia, and
 τ is the command torque.

The unknown parameters include the system inertia and friction parameters (F_c, F_r). The velocity and acceleration are estimated by numerical differentiation. The nonlinear least square fitting identifies the parameters as:

$$\tau_{friction} = \begin{cases} 0.24 + 0.0068\dot{\theta}, & \dot{\theta} > 0 \\ \tau_{input}, & \dot{\theta} = 0 \\ -0.28 + 0.0069\dot{\theta}, & \dot{\theta} < 0 \end{cases}$$

and $J = 0.0015$

The resulting friction characteristic is shown in Figure 10. The characteristic exhibits the Coulomb and viscous friction and is best modeled as Coulomb and viscous friction. Once the friction is taken into account, the inertia is identified more accurately.

The command frequency from 0.5 to 5 radian/second is used to simultaneously solve for the system inertia and friction. The inertia identified using the proposed technique ranges between 0.0013 – 0.0016. The Coulomb coefficient is between 0.24 - 0.28 and viscous friction coefficient is between 0.0068 - 0.0075.

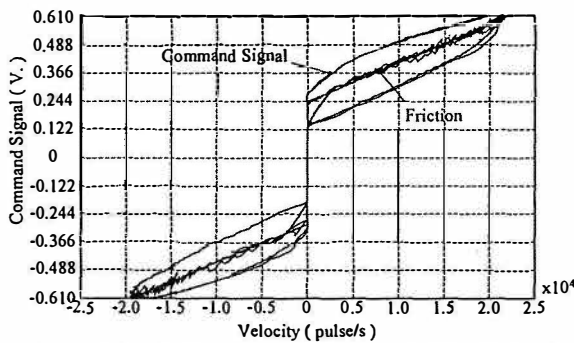


Figure 10. Friction characteristics modeled by Coulomb viscous friction Model.

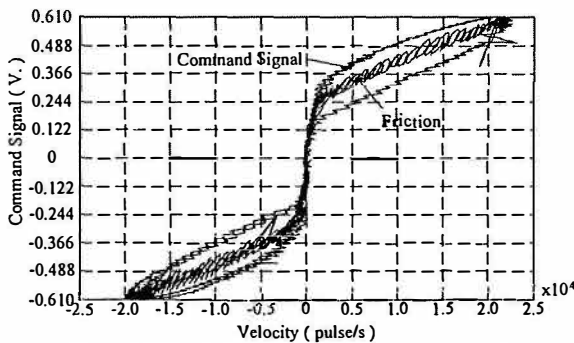


Figure 11 Equivalent friction characteristics when the control is with and without the dither signal.

Once the system inertia is identified, the acceleration torque could be determined and the friction torque is thus obtained. The friction torque is plotted against the velocity to illustrate the friction characteristics. Actually, the system inertia can be identified offline and is then used to determine the friction in process.

The online friction identification can be used to compensate for the friction. The proposed technique is also used to study the effects and mechanism of the dither signal. The friction characteristics are illustrated when the dither is and is not included in the control algorithm as shown in Figure 11. The dither transforms the discontinuity of the Coulomb friction into a smooth nonlinear characteristic around zero velocity.

6. CONCLUSIONS

The practical technique to determine friction characteristic in conjunction with system parameter is proposed and demonstrated. For a typical rotational system with nonlinear friction, the friction characteristics and the system inertia should be determined simultaneously. The results are more accurate compared to the cases in which friction or inertia is identified separately. The proposed technique takes the friction into account to determine the system inertia offline. The resulting inertia is then used to determine the friction online.

The numerical differentiation for the imprecise data is also introduced. The equally spaced positions are used to determine the derivative. This space of the position is sufficiently high in order to disregard the noise. However, the time required for the system to move over the space is not constant. Thus, the time to compute the derivative is varying, causing a difficulty for the online applications.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Dr. W. Lertpiriyasawat for his valuable suggestions regarding the friction models and experimental implementation issues. Finally, we would also thank MTEC for financial support.

REFERENCE

- Brian Armstrong-Hélouvry & Pierre Dupont (1993). Friction Modeling for Control, Proceeding of the American Control Conference, pp. 1905-9, San Francisco, June 1993, California.
- Brian Armstrong-Hélouvry (1993). Stick Slip and Control in Low-Speed Motion, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, No.10, pp. 1483-96, October 1993.
- C. Canudas de wit; H. Olsson; K. J. Astrom & P. Lischinsky (1995). A New Model for Control of System with Friction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No.3, pp. 419-25, Mar 1995.
- Karl J. Astrom. Control of System with Friction. available from: <http://www.control.lth.se/articles/article.pike?artkey=ast98movic>, 1999.
- Pierre E. Dupont (1994). Avoid Sick-Slip Through PD Control. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No.5, May 1994. pp. 1094-1097.
- Susan L. Ipri & Haruhiko Asada (1995). Tuned Dither for Friction Suppression During Force-Guided Robotic Assembly, IEEE conference on Robotic and Automation, pp. 310-5, 1995.
- Steven C. Chapra & Raymond P. Canale, "Numerical methods for engineers: with software and programming applications," McGraw-Hill, 1990.

เทคนิคการขับเคลื่อนด้วยเซนเซอร์ของหุ่นยนต์ด้วยเซนเซอร์ (A technique for sensor based servoing of Robotic End Effector)

รัชทิน จันทรเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
fmercc@eng.chula.ac.th

Ratchatin Chanchaoren

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand
Tel : 02-218-6643, Fax : 02-252-2889

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์จากการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector ของหุ่นยนต์ โดยศึกษาทดลองบนหุ่นยนต์ CRS Robotics System ที่ติดตั้งเซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจับแรงที่ End Effector การควบคุมจะอาศัยการประมาณจาโคเบียนในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และนำข้อมูลจากเซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจับแรงป้อนกลับมาควบคุมทางเดิน

บทความนำเสนอผลการจำลองควบคุมทางเดินหุ่นยนต์ โดยใช้เซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจับแรงมาร่วมควบคุมทางเดินของ End Effector ผลลัพธ์ได้แสดงถึงศักยภาพของวิธีการ และความยืดหยุ่นของเทคนิคที่ไม่ต้องอาศัยพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ในการควบคุม และได้นำเสนอการทดสอบกับหุ่นยนต์ CRS Robotics System โดยนำสัญญาณจาก Fastrak® ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งใน 3 มิติมาชดเชยควบคุมทางเดินหุ่นยนต์ ทำให้เพิ่มความแม่นยำในการควบคุมและหุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม

Abstract

The paper presents a technique for robotic end effector control using a feedback signal from sensors installed at the end effector. The CRS robotics system equipped with LPS and force sensors is used for the demonstration. In the proposed technique, Jacobian is estimated from the robot motion and sensor's signals and then used in conjunction with sensor's signals to control the end effector's trajectory.

Several simulations are used to demonstrate the technique including the cases that LPS and force sensors are used to adjust the trajectory. The results show that the robot can interact with the environment and accuracy is improved. In the experimental study, the Fastrak® at the end effector is used to compensate the trajectory of the CRS robotics system.

1. บทนำ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมปัจจุบันมีค่าความผิดพลาดจากการควบคุมตำแหน่ง End Effector ส่วนหนึ่งมาจากการวัดตำแหน่ง End Effector เนื่องจากการวัดตำแหน่งข้อต่อมีค่าความผิดพลาดและค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ในแบบจำลองมีค่าไม่แม่นยำ หุ่นยนต์จึงมีค่าความผิดพลาดแม้ว่าจะมี Repeatability สูงก็ตาม และค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากขึ้นในหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ แนวคิดหนึ่งในการเพิ่มความเที่ยงตรงในการควบคุมก็คือการติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่ง และ/หรือ เซนเซอร์อื่นๆ ไว้ที่ End Effector และทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์โดยอาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์เหล่านี้โดยตรง โดยที่การคำนวณทั้งหมดจะไม่ต้องอาศัยข้อมูลตำแหน่งข้อต่อและแบบจำลอง Kinematics ของหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดไม่ขึ้นกับปัจจัยดังกล่าว

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ ที่ขับเคลื่อนหุ่นยนต์จากข้อมูลเซนเซอร์ที่ End Effector โดยตรง โดยติดตั้งเซนเซอร์ LPS (Local Positioning System) สำหรับวัดตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจจับแรง (Force Sensor) และขับเคลื่อนหุ่นยนต์ในสเปซของเซนเซอร์โดยตรง ข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ จะไม่เป็นอิสระจากกัน เทคนิคการควบคุมจะอาศัยการคำนวณประมาณค่าจาโคเบียนของเซนเซอร์จากการเคลื่อนที่ และนำไปคำนวณแรงขับที่ข้อต่อต่างๆ ของมอเตอร์โดยตรง ทำให้เทคนิคการควบคุมนี้ไม่ต้องอาศัยพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ และเซนเซอร์ต่างๆ เลย ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์มีค่าความแม่นยำเท่ากับค่าความแม่นยำของอุปกรณ์วัดตำแหน่ง นอกจากนี้ ลักษณะการควบคุมยังมีความยืดหยุ่นสูงมาก โดยจะสามารถควบคุมพารามิเตอร์จากเซนเซอร์ต่างๆ ได้พร้อมกัน

บทความแสดงผลการจำลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics System โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งและอุปกรณ์ตรวจจับแรงมาป้อนกลับเพื่อควบคุมทางเดินของ End Effector ซึ่งเป็นการควบคุมที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ และค่าความผิดพลาดในการควบคุมไม่ขึ้นกับแบบจำลองของหุ่นยนต์

2. งานวิจัยที่ผ่านมา

การวิจัยการควบคุม End Effector ของหุ่นยนต์โดยอาศัยการป้อนกลับของสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งที่ End Effector โดยตรง จะทำให้การควบคุมมีความแม่นยำสูงขึ้นและสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ โดยในยุคเริ่มต้นของหุ่นยนต์ในปี 1960s ได้มีงานวิจัยศึกษาการควบคุมแรงสัมผัสของหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ ประวัติของงานวิจัยการควบคุมแรงสัมผัสของหุ่นยนต์สามารถศึกษาได้จาก [1] ในปี 1981 M. H. Raibert และ J. J. Craig [2] ได้เสนอวิธีในการควบคุมแรงแบบผสมระหว่างแรงกับตำแหน่ง (Hybrid Force/Position Control) ซึ่งแยกวงจรควบคุมออกเป็น 2 วงจรที่ตั้งฉากกัน วงจรหนึ่งจะควบคุมแรง และอีกวงจรมุ่งจะควบคุมตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในการควบคุมแรงจะใช้สัญญาณแรงจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งที่ End Effector มาควบคุมโดยตรง และอาจใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในการควบคุมแรงสัมผัส การควบคุมแรงในลักษณะนี้เรียกว่าการควบคุมแรงทางตรง (Explicit Force Control)

อีกแนวทางหนึ่งคือการควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control) เช่นการควบคุมความหน่วง (Impedance Control) ดังที่นำเสนอในงานวิจัยของ Neville Hogan ในปี 1985 หรือการควบคุมความแข็ง (Stiffness Control) วิธีนี้จะควบคุมแรงผ่านทางตัวควบคุมตำแหน่ง (Position Controller) การควบคุมแบบนี้จะมี 2 วงจรควบคุมซ้อนกัน วงจรชั้นในเป็นวงจรควบคุมตำแหน่งโดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณจากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง เช่น Encoder ที่ติดตั้งที่ข้อต่อของหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำงานที่ความเร็วสูง ส่วนวงจรถัดไปจะเป็นวงจรควบคุมแรง ซึ่งจะนำสัญญาณความผิดพลาดของแรงมาผ่านตัวควบคุมแรงและป้อนค่าเป็นสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงให้กับวงจรถูกควบคุมตำแหน่งอีกทีหนึ่ง

ในช่วงต้นของปี 1980s ได้เริ่มมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมโดยการป้อนกลับจากสัญญาณรูปภาพ หรือ Visual Servo Control โดยมี 2 รูปแบบในการควบคุม แบบแรกเรียกว่า Fix in Space ซึ่งจะติดตั้งกล้องถ่ายภาพในตำแหน่งคงที่ และอีกแบบหนึ่งเรียกว่า Eye in Hand ซึ่งจะติดตั้งกล้องไว้ที่ End Effector ของหุ่นยนต์ หลังจากนั้น ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการควบคุมแบบ Visual Servo Control โดยผู้สนใจสามารถศึกษาได้จาก [3] การขับเคลื่อน Visual Servo Control ในแบบของ Eye in Hand ก็เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่จะขับเคลื่อน End Effector โดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งที่ End Effector การติดตั้งกล้องที่ End Effector ทำให้แบบจำลองของระบบมีความซับซ้อนขึ้นไปมาก เทคนิคการควบคุมจึงอาศัยการประมาณค่าจาโคเบียนขึ้นในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ แทนที่จะคำนวณค่าจาโคเบียนจาก Kinematics ของหุ่นยนต์และแบบจำลองของการบันทึกภาพ และนำค่าจาโคเบียนที่ประมาณขึ้นนี้ไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ในปี 2000s ได้เริ่มมีงานวิจัยที่ศึกษาการควบคุมแบบ Visual Servo Control และ Force Control พร้อมกัน โดย B. J. Nelson และคณะ [4] ได้นำเสนอ 3 รูปแบบในการควบคุม ประกอบด้วย Traded Control, Hybrid Control และ Shared Control โดยที่การควบคุมแบบ

Traded Control นั้น จะควบคุม End Effector ด้วย Visual Servo Control ก่อน จากนั้นจะสลับเป็น Force Control เมื่อ End Effector เข้าใกล้ผิวสัมผัส สำหรับการควบคุมแบบ Hybrid Control นั้น จะควบคุมแบบ Visual Servo Control และ Force Control พร้อมกัน ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน โดยแยกวงจรควบคุมออกเป็น 2 วงจร วงจรหนึ่งจะควบคุมแบบ Visual Servo Control และอีกวงจรมุ่งจะควบคุมแบบ Force Control และสำหรับ Shared Control นั้น จะควบคุมแรงสัมผัสและสัญญาณจากรูปภาพในทิศทางเดียวกัน

การควบคุมแรงและสัญญาณจากรูปภาพพร้อมกันในแบบของ Hybrid Control และ Shared Control แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นของวิธีการควบคุม และหุ่นยนต์สามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้อย่างเต็มรูปแบบ ตัวอย่างหนึ่งของการควบคุม End Effector โดยตรง เช่นต้องการให้หุ่นยนต์วิ่งไปจับวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ ขณะเดียวกันก็ต้องการควบคุมแรงสัมผัส และหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่อาจมีไปด้วยพร้อมกัน หุ่นยนต์อาจติดตั้งกล้องบันทึกภาพ อุปกรณ์ตรวจวัดแรง และอุปกรณ์วัดระยะ ไว้ที่ End Effector และนำสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ เหล่านี้ มาควบคุมการเคลื่อนที่หรือแรงที่ข้อต่อของหุ่นยนต์โดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนได้นำเสนอการควบคุมแรงและสัญญาณจากรูปภาพพร้อมกันในแบบของ Hybrid Control ใน [5] และได้นำเสนอการควบคุมแบบ Visual Servo Control โดยมีเงื่อนไขการควบคุมที่กำหนดให้แรงที่สัมผัสต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดใน [6] การควบคุมหุ่นยนต์โดยมีเงื่อนไขในการควบคุม (Constraint) นั้น ผู้เขียนได้นำเสนอวิธี Gradient Projection Method เพื่อรักษาให้เงื่อนไขเป็นจริงตลอดการควบคุม

บทความนี้ ได้นำเสนอการควบคุม End Effector ในรูปแบบต่างๆ ประกอบด้วยการควบคุม End Effector จากสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้จาก LPS และจากสัญญาณแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรง และการควบคุมจากสัญญาณทั้งสองพร้อมกัน โดยเน้นนำเสนอถึงวิธีการควบคุมที่ไม่อ้างอิงแบบจำลองเนื่องจากในทางปฏิบัติจะไม่สามารถหาแบบจำลองของระบบโดยรวมได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ End Effector ทำให้ความซับซ้อนของแบบจำลองเพิ่มขึ้นไปมาก แต่จะอาศัยการประมาณค่าต่างๆ ขึ้นจากการเคลื่อนที่ในขณะที่ควบคุม

3. การควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ใน Cartesian Space

แบบจำลองการเคลื่อนที่ (Equation of motion) ของข้อต่อของหุ่นยนต์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta})\dot{\Theta} + G(\Theta) \quad (1)$$

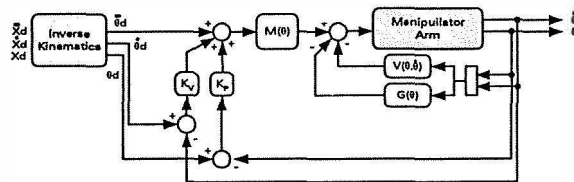
โดยที่	$M(\Theta)$	คือ Mass matrix ของหุ่นยนต์
	$V(\Theta, \dot{\Theta})$	คือ Centrifugal และ Coriolis vector
	$G(\Theta)$	คือ Gravity vector
	τ	คือ แรงบิดที่ข้อต่อของหุ่นยนต์
	Θ	คือ ตำแหน่งข้อต่อหุ่นยนต์

ในการควบคุมทางเดินของ End Effector ใน Catesian Space สามารถทำได้โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อของหุ่นยนต์ทุกข้อต่อให้สัมพันธ์กัน โดยเมื่อกำหนดการเคลื่อนที่ใน Catesian Space ทั้งในเรื่องของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ที่เวลาต่างๆ ของการเคลื่อนที่ ก็สามารถแปลงจลศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics) เพื่อคำนวณหาการเคลื่อนที่ของข้อต่อต่างๆ ที่สัมพันธ์กันได้ดังนี้

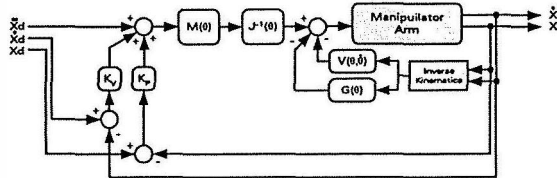
$$\begin{aligned} \Theta_d &= \text{Invkin}(X_d) \\ \dot{\Theta}_d &= J^{-1}(\Theta_d)(\dot{X}_d) \\ \ddot{\Theta}_d &= \dot{J}^{-1}(\Theta_d)(\dot{X}_d) + J^{-1}(\Theta_d)(\ddot{X}_d) \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ *Invkin* คือ ชุดสมการการแปลงย้อนกลับของหุ่นยนต์
 J^{-1} คือ ค่าผกผันของจาโคเบียน
 X_d, Θ_d คือ ค่าตำแหน่งของ End Effector และข้อต่อตามลำดับ

หลักจากที่แปลงการเคลื่อนที่ใน Catesian Space ให้เป็น Joint Space แล้ว จากนั้นก็นำค่าอ้างอิงของข้อต่อ ทั้งตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ของข้อต่อ ไปควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อ หากการควบคุมมีความสมบูรณ์ ตำแหน่ง End Effector ก็จะมีการเคลื่อนที่ใน Catesian Space ตามที่ต้องการ วงจรควบคุมจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1a



(a) Conventional Trajectory Controller



(b) Catesian Based Trajectory Controller

รูปที่ 1 การควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์

รูปที่ 1b แสดงถึงแนวคิดหนึ่งในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ End Effector ใน Catesian Space โดยตรง การควบคุมแบบนี้เรียกว่า The inverse Jacobian Cartesian control Scheme [2] โดยสัญญาณค่าความผิดพลาดจะเป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งของ End Effector ใน Catesian Space กับค่าที่ต้องการโดยตรง จากนั้นนำไปคำนวณแรงใน Catesian Space ผ่านทาง Inertia Matrix และนำไปคำนวณแรงที่ข้อต่อด้วย Inverse ของ Jacobian การควบคุมในลักษณะนี้ หากเราติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่งหรือเซนเซอร์ LPS ที่ End Effector ก็จะสามารถนำสัญญาณตำแหน่งจาก อุปกรณ์วัดตำแหน่งมาป้อนกลับควบคุมได้ หากระบบควบคุมมีความสมบูรณ์ ก็จะทำให้ค่าความแม่นยำของระบบควบคุมขึ้นอยู่กับค่าความแม่นยำของอุปกรณ์วัดตำแหน่ง และไม่ขึ้นกับค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง หรือ Kinematics ของหุ่นยนต์

4. การจับควบคุม End Effector ของหุ่นยนต์ด้วยเซนเซอร์

4.1 การจับควบคุมจากเซนเซอร์ที่ End Effector

แนวทางหนึ่งในการจับควบคุมโดยการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector คือการปรับระเบียบวิธี Optimization แบบ Gradient based Searching เพื่อใช้ในการควบคุมระบบทางกล โดยรายละเอียดสามารถศึกษาได้ใน [7] จากแนวคิดดังกล่าว สมการควบคุมจะเขียนได้ดังนี้

$$\Delta \theta_c = -\alpha_k J^{-1} \cdot F \quad (3)$$

โดยที่ $\Delta \theta_c$ คือ ขนาดในการปรับตำแหน่งข้อต่อ
 α_k คือ ขนาดก้าวเดินในการปรับตำแหน่งข้อต่อ
 F คือ ค่าความผิดพลาดของสัญญาณจากเซนเซอร์

เมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ก็จะมีลักษณะที่ระบบควบคุมจะพยายามปรับข้อต่อแขนกลเพื่อให้ความผิดพลาดมีค่าลดลง ความผิดพลาดจะกำหนดในรูปของค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์ตรวจรูปร่าง กล้องบันทึกภาพ หรือเซนเซอร์วัดระยะ หรือสัญญาณจากเซนเซอร์ต่างๆ พร้อมๆ กัน เทคนิคการปรับข้อต่ออาศัยการประมาณหาจาโคเบียนผสม (Hybrid Jacobian) ในขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ จาโคเบียนผสมนี้จะใช้เพื่อหาทิศทางในการปรับข้อต่อ โดยที่เมื่อปรับข้อต่อตามนี้แล้ว ความผิดพลาดควรจะมีค่าลดลง

4.2 การประมาณค่าจาโคเบียนในขณะทำงาน

เพื่อให้วิธีการควบคุมเป็นอิสระจากสมการ Kinematics ของหุ่นยนต์และเซนเซอร์ต่างๆ วิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงประมาณค่าจาโคเบียนขึ้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กับสัญญาณจากเซนเซอร์ต่างๆ โดยค่าจาโคเบียนที่ประมาณได้นี้จะเรียกว่าจาโคเบียนผสมเนื่องจากเป็น Matrix ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งข้อต่อกับการเปลี่ยนค่าของสัญญาณจากเซนเซอร์ต่างชนิดพร้อมๆ กัน (ในกรณีที่สัญญาณจากเซนเซอร์เป็นสัญญาณแรงสัมผัสทั้งหมด จะเรียกจาโคเบียนนี้ว่าจาโคเบียนแรง (Force Jacobian) และในกรณีที่สัญญาณเป็นข้อมูลจากรูปภาพ จะเรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพ (Image Jacobian))

ในการประมาณค่าจาโคเบียนขณะทำงานนั้น ทุกๆ รอบของการวัดค่า (Sampling) ระบบควบคุมจะเก็บค่าสัญญาณที่จะควบคุม $f_v^j(\theta_c)$ และค่าตำแหน่งข้อต่อ θ_c^j โดยที่ j คือตำแหน่งเวลา จากนั้นก็จะคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดังกล่าว โดยที่ $df_v^j = f_v^j - f_v^{j-1}$ และ $d\theta_c^j = \theta_c^j - \theta_c^{j-1}$ และนำค่าเหล่านี้มาประมาณหาค่าจาโคเบียนจากสมการ

$$DQ = \begin{bmatrix} d\theta_{c1}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{c1}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ d\theta_{c1}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{c1}^j \end{bmatrix}, DF = \begin{bmatrix} df_{v1}^{j-n+1} & \dots & df_{v1}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ df_{v1}^{j-n+1} & \dots & df_{v1}^j \end{bmatrix}$$

$$\hat{J} = DF \cdot DQ^{-1} \quad (4)$$

ค่าจาโคเบียนที่ประมาณได้นี้ จะมีความแม่นยำ ณ ตำแหน่งที่ประมาณเท่านั้น เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ ระบบก็จะประมาณค่าจาโคเบียนขึ้นใหม่ในทุกๆ รอบของการปรับค่าสัญญาณควบคุม สำหรับการประมาณค่าจาโคเบียนในตำแหน่งเริ่มต้นจะใช้การบังคับให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในขนาดและทิศทางที่กำหนดขึ้น จากระทั้งมีข้อมูลที่มาพอสำหรับการประมาณค่าจาโคเบียน แล้วจึงใช้ค่าจาโคเบียนนี้มาคำนวณคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์

4.3 การชดเชยการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง

ในกรณีที่ใช้เซนเซอร์ที่ End Effector ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางหรือป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ เช่นการใช้เซนเซอร์ LPS หรือเซนเซอร์วัดระยะในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง และกำหนดให้ End Effector มีระยะห่างจากสิ่งกีดขวางมากกว่าระยะที่กำหนด เทคนิคการควบคุมเมื่อมีการกำหนดเงื่อนไขในลักษณะนี้ จะใช้การปรับแก้การเคลื่อนที่ในขณะที่ทำงาน โดยการปรับแก้จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อ End Effector เคลื่อนที่จนทำให้ไม่สามารถรักษาให้เงื่อนไขที่กำหนดให้เป็นจริงได้ ระบบปรับการเคลื่อนที่ก็จะ Active และเข้ามาปรับการเคลื่อนที่เพื่อรักษาให้เงื่อนไขเป็นจริงตลอดเวลา ผู้เขียนได้ปรับแต่งระเบียบวิธี Gradient Projection Method [7] เพื่อใช้ในการควบคุมโดยมีหลักการดังนี้ ในกรณีที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่าง End Effector กับกำแพงมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด และที่ End Effector ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะห่างจากกำแพงไว้ เราสามารถประมาณค่าระยะห่างจากกำแพงได้จากสมการ

$$\Delta s = \begin{bmatrix} J_{s1} & J_{s2} & \dots & J_{sn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \dots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ s คือค่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดระยะ
 $\begin{bmatrix} J_{s1} & J_{s2} & \dots & J_{sn} \end{bmatrix}$ คือ sensitivity vector
 $\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \dots & \theta_n \end{bmatrix}$ คือตำแหน่งของข้อต่อหุ่นยนต์

เมื่อสมการนี้ประมาณได้ว่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดระยะจะมีค่ามากกว่าที่กำหนด ระบบปรับการเคลื่อนที่ก็จะ Active และปรับการเคลื่อนที่ให้เข้ามาอยู่บนระนาบของสมการเงื่อนไข โดยที่ทิศในการปรับการเคลื่อนที่จะเลือกทิศทางที่ทำให้ระยะในการปรับการเคลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ความแม่นยำในการควบคุมมีค่ามากที่สุด

สำหรับ Sensitivity vector นั้น ก็สามารถประมาณขึ้นจากการเคลื่อนที่โดยใช้แนวคิดเดียวกันกับที่ใช้ในการประมาณค่าจาโคเบียน และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$DS = \begin{bmatrix} ds^{j-n+1} & \dots & ds^j \end{bmatrix}, DQ = \begin{bmatrix} d\theta_{c1}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{c1}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ d\theta_{cn}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{cn}^j \end{bmatrix}$$

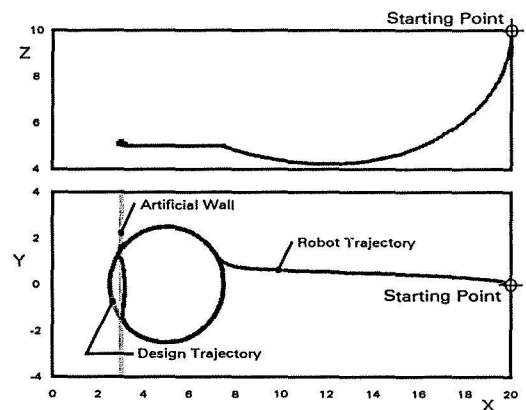
$$\hat{J}_s = DS \cdot DQ^{-1} \quad (6)$$

การที่สามารถประมาณค่าจาโคเบียนและ sensitivity vector ได้จากการเคลื่อนที่ ทำให้การควบคุม End Effector สามารถทำได้โดยไม่ต้องทราบ Kinematics ของหุ่นยนต์และแบบจำลองของเซนเซอร์ต่างๆ

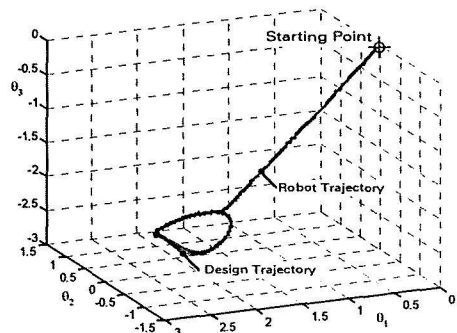
ตารางที่ 1 DH parameter of the CRS robotics system

i	α_i	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	10"	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	10"	0	θ_3
4	0	10"	0	θ_4
5	-90°	0	2"	θ_5

เมื่อนำวิธีการที่ได้นำเสนอมาจำลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics System ที่ติดตั้งเซนเซอร์ LPS ไว้ หุ่นยนต์มีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1 หุ่นยนต์เริ่มต้นในตำแหน่ง θ_1, θ_2 และ θ_3 เป็นศูนย์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ End Effector อยู่ที่ตำแหน่ง XYZ = (20, 0, 10) จากนั้นออกแบบให้หุ่นยนต์มีเส้นทางเดินเป็นวงกลมบนระนาบ XY มีจุดศูนย์กลางที่ (5, 0, 5) และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว และหมุนด้วยความเร็ว $\pi/6$ เรเดียนต่อวินาที วิธีการควบคุมทางเดินจะใช้แบบ Conventional Trajectory Controller ดังที่ได้แสดงในรูป 1a เงื่อนไขการควบคุมจะกำหนดให้ End Effector มีตำแหน่งในระยะ X มากกว่า 3



(a) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน Cartesian Space



(b) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน Joint Space

รูปที่ 2 ทางเดินของหุ่นยนต์จากการควบคุมป้อนกลับด้วย LPS

เมื่อจำลองการควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab® และ Robotics TOOLBOX [8] โดยกำหนดให้ $K_p=100$ และ $K_v=20$ ได้ผลลัพธ์ของทางเดิน End Effector ดังแสดงในรูปที่ 2 หุ่นยนต์สามารถติดตามทางเดินได้ตามที่ต้องการ ทั้งตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ทำให้เส้นทางเดินเรียบ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ใน Catesian Space (รูปที่ 2a) พบว่าในแนวแกน Z นั้น หุ่นยนต์เคลื่อนที่ลงมาต่ำกว่าค่าที่ต้องการก่อนที่จะปรับเข้าสู่ค่าอ้างอิงที่ $Z=5$ แต่เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ใน Joint Space (รูปที่ 2b) พบว่าหุ่นยนต์เดินตรงเข้าสู่เส้นทางเดินที่กำหนด เนื่องจากเส้นทางเดินที่กำหนดจะทำให้ End Effector เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ระยะในแนวแกน X มีค่าน้อยกว่า 3 ที่ตำแหน่งนี้ระบบปรับการเคลื่อนที่จะ Active และทำการปรับค่าตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง อ้างอิง เพื่อปรับเส้นทางให้ขนานกับเงื่อนไข แม้ว่าทางเดินของหุ่นยนต์ในตำแหน่งนี้จะไม่เรียบ แต่ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำให้หุ่นยนต์มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม หรือสามารถใช้เซนเซอร์ที่ติดตั้งที่ End Effector มาปรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้

4.4 การควบคุมแรงสัมผัส

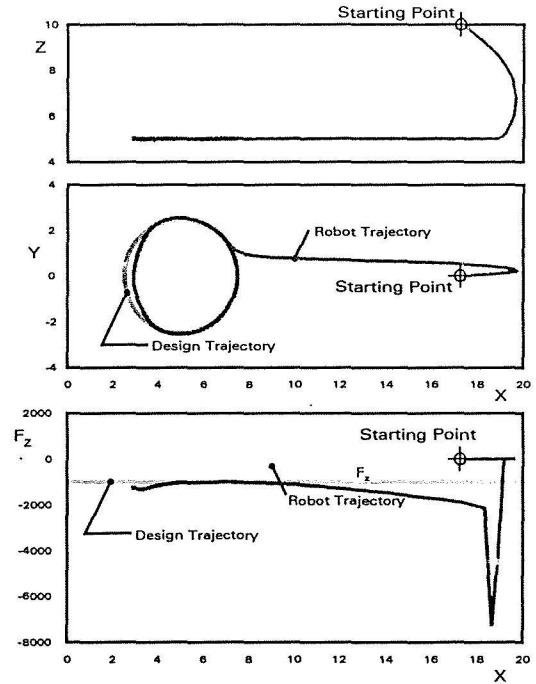
การควบคุมแรงสัมผัสเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการควบคุม End Effector โดยในการศึกษานี้จะควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics System ให้มีเส้นทางเดินเดียวกันกับในหัวข้อที่ผ่านมา และกำหนดสิ่งแวดล้อมมีพื้นที่อยู่ที่ระยะ $Z=5$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ควบคุมระยะในแนวแกน Z และจะควบคุมแรงสัมผัสให้มีค่าเท่ากับ 1000 นิวตันในระหว่างที่ End Effector เคลื่อนที่เป็นวงกลมบนระนาบ XY

เทคนิคการควบคุมจะใช้วิธีเดียวกันกับการจำลองการชดเชยการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง โดยปรับให้ระบบปรับการเคลื่อนที่นั้นเริ่ม Active เมื่อ End Effector เข้าสู่เส้นทางเดินอ้างอิง และจากนั้นให้ทำงานตลอดเวลา และทิศทางการ Project กลับมาที่สมการเงื่อนไข ควบคุมจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ข้อต่อกับแรงสัมผัสที่เกิดขึ้น หรือกล่าวคือการควบคุมแรงเป็นแบบทางตรง

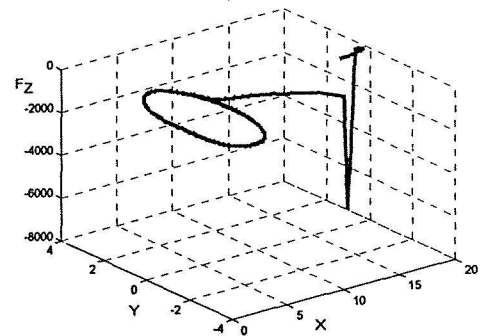
การจำลองควบคุมแรงสัมผัสนั้นมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนกว่าการควบคุมการเคลื่อนที่มาก เนื่องจากต้องสร้างแบบจำลองการเกิดแรงสัมผัสขึ้น โดยในการจำลองนี้จะกำหนดให้พื้นหรือสิ่งแวดล้อมมีความแข็งเกร็ง หรือไม่มีการยุบตัวเกิดขึ้น และค่าแรงสัมผัสจะหาได้จากค่าแรงที่ข้อต่อและจาโคเบียนของแรง

กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์อยู่ที่ θ_1, θ_2 และ θ_3 เท่ากับ $0, -\pi/6$ และ $\pi/3$ ตามลำดับ หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนกระทั่งเข้าชนกับพื้นที่ระยะ $Z=5$ และเกิดแรงกระแทกขึ้นที่ตำแหน่งนี้ จากนั้น หุ่นยนต์จะวิ่งสัมผัสกับพื้นไปตลอดจนเข้าสู่เส้นทางอ้างอิงที่กำหนด รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถควบคุมแรงสัมผัสได้ในระดับหนึ่ง ระบบควบคุมสามารถใช้สัญญาณแรงจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดตั้งที่ปลายแขนมาปรับพารามิเตอร์ควบคุมเพื่อทำให้หุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้

การประมาณค่า Sensitivity Vector จะใช้การคำนวณเหมือนกันกับการจำลองควบคุมชดเชยการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดตำแหน่งในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการควบคุมลักษณะนี้มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถปรับใช้งานได้กับเซนเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน



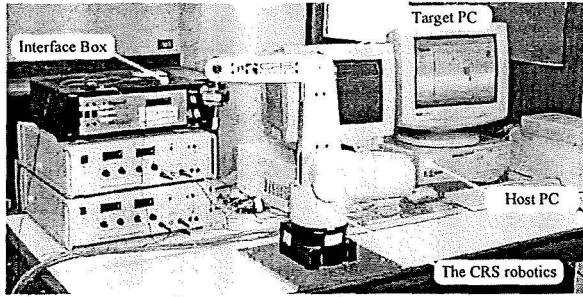
(a) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน Catesian Space



(b) แรงสัมผัสที่เกิดขึ้นบนทางเดินในระนาบ XY รูปที่ 3 ทางเดินของหุ่นยนต์จากการควบคุมแรงสัมผัส

5 หุ่นยนต์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

การทดลองควบคุมจะใช้หุ่นยนต์แบบ Articulated รุ่น A255 ของบริษัท CRS Robotics Inc ซึ่งมีพารามิเตอร์ค่าเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองควบคุม และนำมาติดตั้ง Fastrack® ของ Polhemus Inc สำหรับวัดตำแหน่งของ End Effector ใน Catesian Space และ JR3 Force Sensor สำหรับวัดค่าแรงสัมผัส และใช้ Interface Box ที่สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ในระดับแรงบิดที่ข้อต่อด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ การควบคุมในเวลาจริงจะใช้ Matlab® xPC ซึ่งใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง คือ Host PC กับ Target PC สมการควบคุมจะพัฒนาในเครื่อง Host PC และจากนั้น ทำการ Compile และส่ง Code ควบคุมไปที่ Target PC ที่ติดตั้ง PCL726 ของบริษัท Advantech Inc และ ETT8255 เพื่อเป็น Interface Card สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ การสื่อสารระหว่าง Host กับ Target PC ใช้โปรโตคอล TCP/IP ในระหว่างควบคุม Target PC จะส่งค่าสัญญาณต่าง ๆ กลับมาแสดงผลที่ Host PC กลับมาทางสายสัญญาณสื่อสาร รูปที่ 4 แสดงระบบโดยรวมสำหรับการทดลอง



รูปที่ 4 หุ่นยนต์และเครื่องมือทดลอง

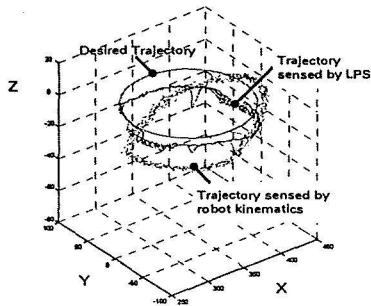
6 การทดลองขั้วควบคุม

6.1 การควบคุม

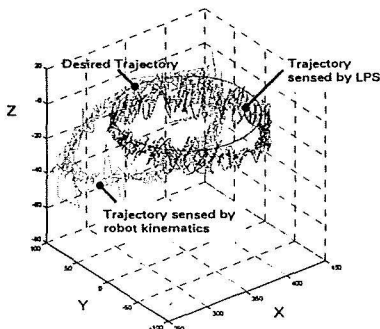
การทดลองนี้จะควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นวงกลมบนระนาบ XY โดยมีจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่ง $XYZ = (350, 0, 0)$ โดยมีรัศมี 50 มิลลิเมตร ในขณะที่เดียวกัน ก็ควบคุมให้ระยะในแนวแกน Z มีค่าเป็นศูนย์โดยใช้การป้อนกลับด้วยสัญญาณจาก Fastrak® เนื่องจากในทางปฏิบัติ ตำแหน่ง End Effector ที่คำนวณได้จาก Kinematics ของหุ่นยนต์ กับค่าที่วัดได้จาก Fastrak® จะแตกต่างกัน การทดลองนี้จึงเป็นการแสดงผลเบื้องต้นถึงการใช้ Fastrak® ในการปรับแก้ไขการเคลื่อนที่ในขณะทำงาน

6.2 ผลลัพธ์การควบคุม

ผลลัพธ์การควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สัญญาณจาก Fastrak® ในการปรับการเคลื่อนที่ได้ ให้พิจารณารูปที่ 5a ซึ่งข้อมูลตำแหน่งที่คำนวณได้จากตำแหน่งข้อต่อที่วัดด้วย Encoder ผ่านทาง Kinematics ของหุ่นยนต์ จะแตกต่างกับค่าที่วัดได้ด้วย Fastrak® และในรูปยังแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของระบบควบคุม ซึ่งทำให้ทางเดินเกิดขึ้นจริงแตกต่างจากค่าที่ต้องการ



(a) ทางเดินของ End Effector ก่อนชดเชยการเคลื่อนที่



(b) ทางเดินของ End Effector จากการชดเชยการเคลื่อนที่

รูปที่ 5 การปรับชดเชยการเคลื่อนที่จากข้อมูล LPS

โดยการใช้ระบบปรับการเคลื่อนที่ซึ่งนำสัญญาณจาก Fastrak® เข้ามาปรับแก้ไขทำให้ตำแหน่ง End Effector ที่วัดด้วย Fastrak® มีค่าเข้าใกล้ทางเดินที่ต้องการมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5b การทดลองแสดงให้เห็นถึงการควบคุมที่ทำให้หุ่นยนต์มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม และการเพิ่มความแม่นยำให้กับการควบคุมโดยนำสัญญาณที่ End Effector ป้อนกลับเข้ามาควบคุมการเคลื่อนที่

7 บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุม End Effector ของหุ่นยนต์ โดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณที่ติดตั้งที่ End Effector โดยนำเสนอระบบปรับการเคลื่อนที่ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก Gradient Projection Method ซึ่งเมื่อทำงาน จะปรับแก้ไขค่าตำแหน่งอ้างอิง เพื่อควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์ใน Sensor space วิธีการที่นำเสนอสามารถใช้ได้ทั้งในการควบคุมติดตามเป้าหมาย หรือใช้ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง บทความได้แสดงการจำลองควบคุมในกรณีที่ใช้เซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจู่แรงเข้ามาปรับชดเชยการเคลื่อนที่ และทดลองใช้ Fastrak® เข้ามาควบคุมทางเดินของ End Effector

ผลลัพธ์แสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมและการเพิ่มความแม่นยำ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอคาดว่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาให้หุ่นยนต์มีความยืดหยุ่นในการทำงานเพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนให้งานวิจัยนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีเวลาในการทำงานวิจัยนี้อย่างเต็มที่

รายการอ้างอิง

- [1] Whitney, D.E. (1977), History perspective and state of the art on robot force control, Proc. 1985 International Conference on Robotics and Automation, New York.
- [2] John J. Craig (1989), Introduction to ROBOTICS: mechanics and control, Addison-Wesley Publishing Company, 0-201-09528-9, USA.
- [3] S. Hutchinson and G. D. Hager (1996), A Tutorial on Visual Servo Control, IEEE Transaction on Robotics Automation, vol.12, pp. 650-670, Oct. 1996.
- [4] B. J. Nelson, J. D. Morrow, and P. K. Khosla (1995), Improved Force Control Through Visual Servoing, 1995 American Control Conference, Seattle, USA, June 1995.
- [5] V. Sangveraphunsiri, R. Chanchaeroen (2000), A Hybrid Force/Visual Servo Control for Industrial Robots, 2000 JSAE Spring Conference, Yokohama, Japan, May, 2000.
- [6] Chanchaeroen R., Sangveraphunsiri V., Sanguanpiyapan K., Chatchaisucha P., Dharachantha P., Nattarom S., and Pongparit S., "Collision Avoidance Technique for Uncalibrated Visual Servoing for Industrial Robots," 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand, December 2002.
- [7] P. Y. Papalambros, D. J. Wilde, Principles of optimal design Modeling and computation, Cambridge University Press, 1988.
- [8] P. I. Corke, A Robotics Toolbox for MATLAB, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 3, pp. 24-32, Mar 1996.

การพัฒนาาระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์สำหรับ
การผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน
**Development of Laser Positioning System for Fixtureless Robotic
Manufacturing**

ศุภวุฒิ จันทร์บุญวัฒน์ , จารุบุตร คณะนัย , รัชทิน จันทร์เจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330
โทรศัพท์ 02 2186591 โทรสาร 02 2522889 email: supavut.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในการผลิตที่ใช้หุ่นยนต์นั้น โดยทั่วไปแล้วต้นทุนการผลิตจำนวนมากจะตกอยู่ที่การออกแบบและผลิตอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ต้องใช้ในการจับยึดให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นให้อยู่ที่ตำแหน่งคงที่เทียบกับหุ่นยนต์ ในบทความนี้นำเสนอแนวทางการผลิตอัตโนมัติในรูปแบบใหม่ที่สามารถนำมาใช้ในการลดต้นทุนส่วนนี้ โดยการผลิตแบบนี้จะมีอุปกรณ์หลักคือระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งของชิ้นงาน และใช้ในการวัดตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่ใช้งานจริง บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบของระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์นี้ ทั้งในด้านการทำงาน อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ การออกแบบระบบควบคุม และผลการทดสอบเบื้องต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการติดตามตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ในเวลาจริง

คำสำคัญ : ระบบวัดตำแหน่ง, แสงเลเซอร์, การผลิต, หุ่นยนต์

Abstract

In a typical robotic manufacturing, significant manufacturing cost is on design and production of jigs and fixtures required to hold workpieces in accurate positions relative to the robots. This paper describes a new robotic manufacturing technique that can be used to cut the fixture cost. The main component of this technique is the Laser Positioning System (LPS) that can be used to measure position of the workpiece and to measure the robot's end-effector directly in real-time. In this paper, the development of a Laser Positioning System (LPS) prototype is presented. Its designs, components, controller designs, and preliminary experimental results are given, especially on the ability to track a moving target in real-time.

Keywords: Position measuring device, Laser, Manufacturing, Robotics

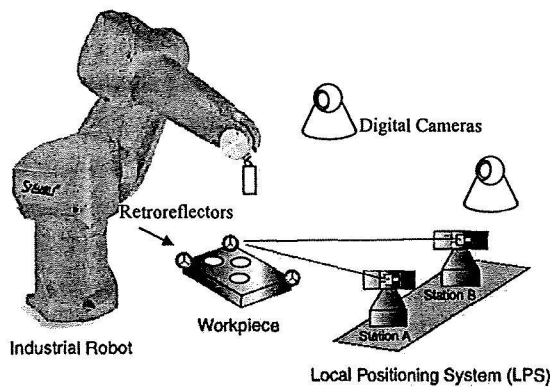
1. บทนำ

ระบบการผลิตอัตโนมัติในปัจจุบันได้มีการนำแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เข้ามาใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการเปลี่ยนระบบการผลิตให้ทันกับความต้องการของตลาด อย่างไรก็ตามเนื่องจากแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม มีความสามารถในการทำซ้ำ (high repeatability) แต่มีความถูกต้องต่ำ (low accuracy) [1] ทำให้ระบบการผลิตดังกล่าวจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (jigs and fixtures) ในขณะที่ใช้งาน เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน และจำเป็นต้องมีการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมของหุ่นยนต์ โดยเทียบกับตำแหน่งของชิ้นงานนั้น การใช้แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในลักษณะดังกล่าว มีข้อเสียคืออุปกรณ์จับยึดชิ้นงานมีราคาแพง และเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของชิ้นงานที่จะผลิตหรือเปลี่ยนวิธีการผลิตชิ้นงาน ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานใหม่ โดยทั่วไปมูลค่าของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ผลิตตลอดช่วงอายุการใช้งานของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตัวหนึ่งๆนั้น ยังสูงกว่ามูลค่าของตัวหุ่นยนต์

หลายเท่าตัว ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชนิดของชิ้นงานที่ผลิต จำเป็นต้องมีการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์เสียใหม่ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเสียเวลานาน นอกจากนี้ยังต้องหยุดขบวนการผลิตและการใช้งานแขนหุ่นยนต์เพื่อทำการปรับตั้งโปรแกรม ทำให้ลดความคล่องตัวในการเปลี่ยนระบบการผลิต ที่คาดว่าจะได้จากการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้

จากเหตุผลดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงได้ทำโครงการวิจัย เพื่อนำเอาแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ ในระบบการผลิตอัตโนมัติในรูปแบบใหม่ ซึ่งไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่มีราคาแพง และไม่ต้องเสียเวลานานในการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ ที่เรียกว่า "Fixtureless Robotics Manufacturing" หรือระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ในระบบการผลิตแบบนี้จะใช้การวัดตำแหน่งของชิ้นงานแทนการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และใช้การวัดตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่ใช้งานจริงเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการควบคุมการเคลื่อนที่ แทนการปรับตั้งโปรแกรมระบบควบคุมหุ่นยนต์ตามตำแหน่งของชิ้นงาน หรือการประมาณความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของแขนกลจากปัจจัยต่างๆ (เช่น [2]) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะใช้ Local Positioning System (LPS) เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งและมุมเอียงในสามมิติที่มีความถูกต้องสูงโดยใช้แสงเลเซอร์

จะเห็นได้ว่า ระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานนั้นที่ผู้วิจัยนำเสนอ นั้น เทคโนโลยีหลักที่จำเป็นคือ ระบบ LPS แต่เนื่องจากระบบดังกล่าวมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงมีความจำเป็น เพื่อพัฒนาและผลิตเทคโนโลยีของตนเอง เพิ่มขีดความสามารถทางเทคโนโลยีของเมืองไทย ลดการนำเข้าของเทคโนโลยีจากต่างประเทศ นอกจากนี้แล้วเทคโนโลยีนี้ก็ยังสามารถพัฒนา เพื่อให้ได้ความรู้ใหม่ได้ต่อไป บทความนี้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบของระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์นี้ ทั้งในด้านการทำงาน อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ การออกแบบระบบควบคุม และผลการทดสอบเบื้องต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการติดตามตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ในเวลาจริง

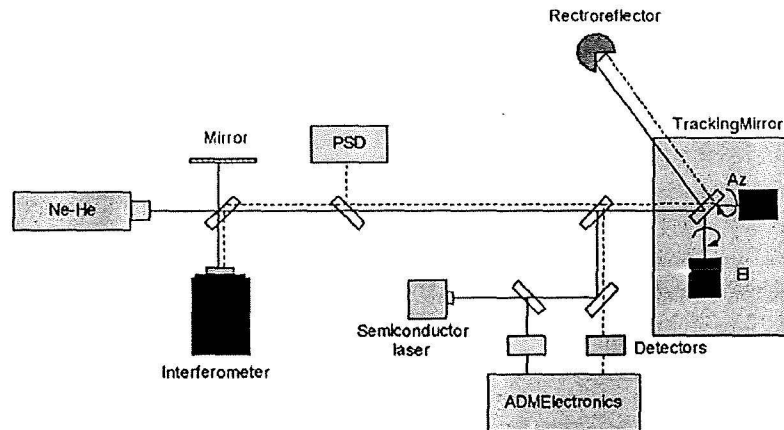


รูปที่ 1 ระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

2. ระบบ LPS

ระบบการทำงานของ LPS โดยทั่วไป [3] จะอาศัยการวัดมุมจากการบิดของกระจกเงาติดตามจำนวน 2 มุม และระยะห่างจากกระจกติดตามกับอุปกรณ์ retroreflector โดยอุปกรณ์ชุด LPS จะยิงลำแสงเลเซอร์ไปสะท้อนกระจกติดตามไปที่อุปกรณ์ retroreflector ที่ติดกับวัตถุตั้งในรูปที่ 2 ซึ่ง retroreflector นี้จะมีลักษณะคล้ายกระจกเงาสามบานวางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งจะมีผลทำให้ ลำแสงที่เข้า retroreflector จะสะท้อนกลับมาในแนวขนานกับทางเดิม โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแสงขาเข้าและออกจะอยู่ในแนวกึ่งกลางของ retroreflector พอดี ลำแสงที่สะท้อนกลับมาจะถูกแบ่งด้วย Beam Splitter ไปยังอุปกรณ์ PSD (Position Sensitive Detector) เพื่อใช้ในการวัดค่า offset ของแสงขาไปและขากลับ สัญญาณค่า offset นี้จะนำไปใช้ในการปรับมุมของกระจกทั้งสองเพื่อให้ค่า offset นี้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้กระจกติดตามสามารถสะท้อนแสงไปสู่ retroreflector ได้ตลอดเวลาแม้ retroreflector จะมีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้แล้วแสงอีกส่วนจะถูกแบ่งไปยังอุปกรณ์วัดระยะ เช่น interferometer หรือ ADM (Absolute Distance Meter) เพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางระหว่าง กระจกติดตาม กับ retroreflector ดังรูปที่ 2 การวัดระยะนั้น อุปกรณ์ Interferometer เป็นอุปกรณ์มาตรฐานทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ทำงานโดยอาศัยการแทรกสอดของแสง สำหรับ interferometer แบบ Michelson นั้น ลำแสงที่ออกมาจากตัวกำเนิดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นลำแสงอ้างอิง ส่วน

ที่เหลือนจะไปตกกระทบตัวสะท้อนแสง แล้วจึงกลับมาเพื่อรวมกับลำแสงอ้างอิง ทำให้เกิดปรากฏการณ์แทรกสอดของแสงขึ้น การนับจำนวน fringe ที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงนั้นจะถูกแปลงให้เป็นระยะทางที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเริ่มต้น(ตำแหน่งอ้างอิง)ได้ แต่มีข้อเสียคือแนวของแสงจะถูกบังไม่ได้ตลอดการทำงาน แต่ข้อเสียนี้จะไม่สำหรับอุปกรณ์ ADM ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ค่าระยะสัมบูรณ์ และไม่ต้องมีการปรับเทียบตำแหน่งอ้างอิง แต่จะทำให้ระบบมีราคาสูงขึ้นมา



รูปที่ 2 อุปกรณ์ต่างๆของ ระบบ LPS

2.1 ระบบต้นแบบ Laser Tracking System (LTS)

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบกระจกติดตาม(LTS)ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งในระบบนี้จะมีส่วนประกอบต่างๆดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว แต่จะไม่มีระบบวัดระยะระหว่างกระจกติดตามและ retroreflector โดยการวัดระยะจะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบ LTS สองตัวแล้วใช้วิธีการคำนวณแบบ triangulation จากข้อมูลแนวของแสงจากกระจกติดตามทั้งสอง (มุม Azimuth และ Altitude ดังแสดงในรูปที่ 3) ระบบที่พัฒนามีอุปกรณ์หลักต่างๆดังนี้คือ

(1) มอเตอร์ในแนว Azimuth (แกนตั้ง) เป็น Brushless DC motor, Maxon รุ่น EC 32, ขนาด 80watts แรงบิดสูงสุด 355mN-m มอเตอร์ในแนว Azimuth นี้จะต้องจับชุดหมุนกระจกในแนว Altitude (แกนนอน) รวมทั้งมอเตอร์ของแกน Altitude ด้วยโดยไม่มีการใช้เฟืองทดทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจากเฟืองทด เช่น ปัญหาจาก backlash และจากแรงเสียดทานของเฟืองทด

(2) มอเตอร์ในแนว Altitude (แกนนอน) เป็น Brushless DC motor, ของ Computer Optical Products รุ่น CM 335 ขนาด 17 Watts แรงบิดสูงสุด 232 mNm โดยมีมอเตอร์มี incremental encoder ประกอบมาด้วย ซึ่งนำมาใช้ในการวัดมุมทั้งสองแกน encoder นี้เป็นแบบ sine wave ที่มีจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 2048 ลูกต่อรอบ มอเตอร์ในแกนนี้ไม่ใช่เฟืองทดเช่นกัน

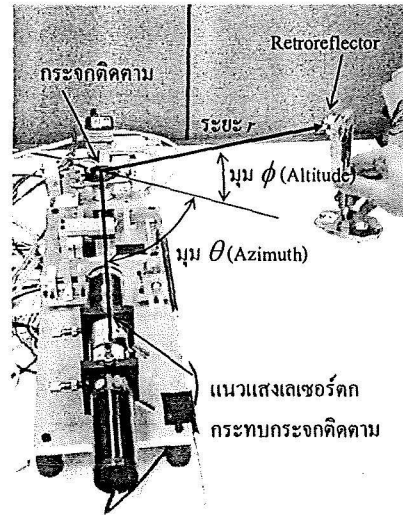
(3) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นแบบ PWM ของ Maxon รุ่น DES 50 โดยใช้การทำงานแบบ current mode การทำ commutation เป็นแบบ sine wave โดยใช้ทั้งสัญญาณ Hall และ encoder signal แบบ square wave แต่เนื่องจากสัญญาณ Encoder นั้นเป็นแบบ sine wave ที่นำมาใช้โดยตรงไม่ได้จึงจำเป็นต้องมีวงจรเพื่อเปลี่ยนสัญญาณ sine wave มาเป็น square wave ก่อน

(4) Ball Mounted Hollow Retroreflector รุ่น BMR-0.5 ของ ATT Metrology Services ขนาดหน้าเปิด 0.25"

(5) He-Ne Laser ขนาด 2mW ขนาด 0.79mm, 1mrad divergence

(6) Position Sensitive Detector (PSD) ของ Pacific Silicon Sensor ขนาดรับแสง 1cm x 1cm ที่ resolution มากที่สุด 0.5 ไมครอน (ขึ้นกับความเข้มของแสง)

(7) Computer และ Data Acquisition cards สำหรับการควบคุมและการคำนวณตำแหน่งมุมของกระจก โดยที่การคำนวณค่ามุมของกระจกนั้นใช้สัญญาณ sine wave จาก encoder เป็นหลัก



รูปที่ 3 ดันแบบ Laser Tracking System

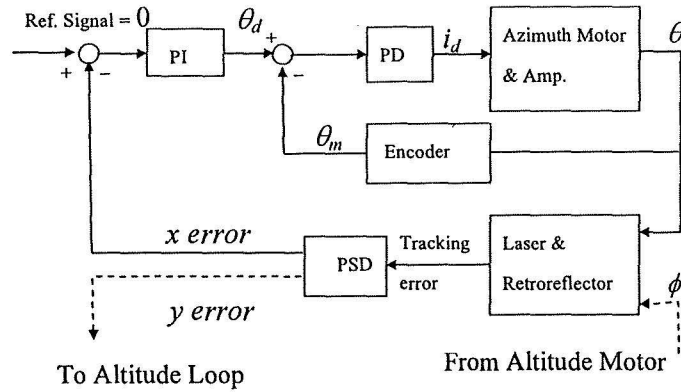
2. 2 ระบบควบคุมการติดตามของดันแบบ LTS

หน้าที่หลักของกระบอกติดตามคือการควบคุมแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบบนที่กึ่งกลางของ retroreflector ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับความแม่นยำในการวัดตำแหน่งของ retroreflector ในการนี้จะต้องมีระบบควบคุมที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้มอเตอร์เพื่อปรับมุมกระบอกโดยใช้ข้อมูลจากค่าผิดพลาดที่วัดได้จากอุปกรณ์ PSD สำหรับระบบควบคุมแบบแรกๆนั้น [3-5] ใช้ระบบควบคุมแบบ PID ที่นำเอาค่าผิดพลาดที่วัดได้จากอุปกรณ์ PSD มาผ่านตัวควบคุมแบบ PID แล้วใช้สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณควบคุมมอเตอร์ ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณความเร็วที่ต้องการ หรือสัญญาณกระแสที่ต้องการก็ได้ แล้วจึงใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ (power amplifier) ในการจัดการให้มอเตอร์ทำงานตามคำสั่งนี้ แต่เนื่องจากการที่ค่าความผิดพลาดเชิงมุมของแนวแสงที่สะท้อนออกไปจากกระบอกติดตามที่ผิดไปจากกึ่งกลางของ retroreflector นั้น มีผลต่อความแตกต่าง (offset) ของแสงที่สะท้อนออกไปและที่สะท้อนกลับมาจาก retroreflector (ที่อ่านได้จากอุปกรณ์ PSD) ในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกระบอกติดตามและ retroreflector ด้วย(ค่า r ในรูปที่3) คือที่ค่า offset ค่าเดียวกันนั้น ที่ระยะ r น้อย จะต้องมี การปรับมุมของมอเตอร์มาก และที่ระยะ r มาก ก็จะต้องมีการปรับน้อย ซึ่งผลของค่า r นี้ทำให้ค่าอุปเกนของระบบมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของ retroreflector ทำให้การออกแบบระบบควบคุมนั้นทำได้ยาก และมีผลให้ความสามารถในการติดตามที่ระยะ r น้อยๆ และ เกิดปัญหาของเสถียรภาพของระบบที่ค่า r มากๆ ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมแบบหลังๆมักจะนำเอาค่า r ใช้ในการควบคุมด้วย โดยที่ค่า r จะนำมาใช้ในการคำนวณค่ามุมที่ต้องปรับเพื่อใช้ค่ามุมนี้ในรูปการควบคุมมุมของมอเตอร์ [3-5]

การนำค่า r มาใช้นั้นจำเป็นจะต้องมีระบบวัดเช่น Interferometer หรือต้องมี LTS จำนวนสองตัวแล้วคำนวณระยะจากวิธี triangulation แต่เนื่องจากระบบ Interferometer นั้นมีราคาสูงและระบบแบบ LTS สองตัวนั้นอาจจะไม่สามารถทำการติดตาม retroreflector ได้พร้อมๆกันตลอด เช่นในตอนเริ่มทำงานอาจจะต้องเริ่มทำการปรับให้แสงส่องไปที่ retroreflector จาก LTS ที่ละตัว อย่างไรก็ตามการวัดตำแหน่งแบบ triangulation นั้นก็ไม่จำเป็นจะต้องมี LTS ถึงสองตัว ถ้าเป้าที่ retroreflector นั้นไม่เคลื่อนที่ เช่น การใช้งานที่ต้องการวัดตำแหน่งของชิ้นงานเพียงอย่างเดียว ดังในรูปที่ 1 นั้นเราสามารถใส่ LTS เพียงตัวเดียว แต่ใช้การปรับตำแหน่งของ LTS ระหว่างจุดสองจุดแทนได้ ซึ่งระบบที่ใช้ปรับนี้จะมีราคาต่ำกว่าการใช้ LTS ตัวที่สองมาก เพราะไม่จำเป็นจะต้องมีการวัดที่แม่นยำ (ดังเช่นการวัดมุมในระบบ LTS) เพียงใช้กลไกที่เที่ยงตรงก็พอแล้ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ระบบการควบคุมดังในรูปที่ 4 โดยไม่มีการนำเอาค่า r มาใช้ ซึ่งขณะนี้ผู้วิจัยกำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนาาระบบที่สามารถปรับค่าอุปเกนได้โดยไม่ใช้ค่า r

ในรูปที่ 4 นั้นแสดงระบบควบคุมในแนวแกน azimuth โดยระบบที่ใช้ขึ้นนี้เป็นแบบสองลูปซ้อนกัน โดยที่ลูปในเป็นลูป PD ที่ใช้ในการควบคุมมุมของมอเตอร์ และในลูปนอกเป็นลูป PI ที่ใช้ในการควบคุมให้ค่าบน PSD มีค่าน้อย โดยการออกแบบนั้นใช้การปรับ ลูปในก่อนให้ step response นั้นเป็นที่พอใจ แล้วจึงทำการปรับลูปนอก โดยผู้วิจัยได้พบว่าลูปในนั้นถูกจำกัดด้วยค่าแกน D

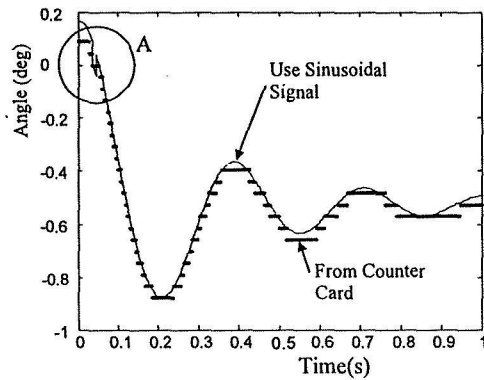
ที่ไม่สามารถมีค่ามากพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบไม่มีอุปกรณ์วัดความเร็วเชิงมุมโดยตรง และในลูปนอกนั้นได้พบว่าค่าแกนส่วนใหญ่นั้นจะตกอยู่ที่ค่า 1



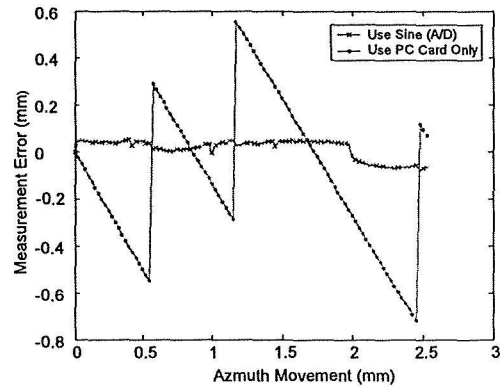
รูปที่ 4 ระบบควบคุมของระบบต้นแบบ LTS

2.3 ผลการทดลอง และการปรับปรุง

จากการทดลองพบว่าระบบต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นนั้นสามารถควบคุมให้แสงเลเซอร์ตกอยู่บน retroreflector ได้ตลอดเวลา ที่ระยะสูงสุดเท่ากับ 1.05 m และค่าความเร็วสูงสุดของ retroreflector ที่ระบบสามารถติดตามได้ที่ระยะ 0.5 m คือ 18.8 cm/s เมื่อ retroreflector เคลื่อนที่ในแนว Azimuth (แนวราบ) และที่ความเร็ว 6.2 cm/s ในแนว Altitude (แนวตั้ง) โดยที่ระบบนี้ใช้เพียงค่าสัญญาณมุม sine wave ที่แปลงเป็น square wave แล้วที่ความละเอียด 2048 pulse ต่อรอบ (8192 เมื่อทำ quadrature แล้ว) ซึ่งพบว่าความสามารถที่ได้ยังน้อยกว่าที่ควรไปมาก (ขึ้นอยู่กับความเร็วของปลายแขนของหุ่นยนต์) จึงจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงโดยในขั้นต้นนี้ได้นำเอาสัญญาณ sine wave ของ encoder มาใช้ในการควบคุมกระจกด้วย



รูปที่ 5 ค่ามุมที่อ่านได้จาก encoder card และที่คำนวณที่ได้จากค่าที่อ่านจาก A/D card



รูปที่ 6 ค่าตำแหน่งของ retroreflector (ที่ระยะ 56cm) ที่คำนวณได้เมื่อใช้ sine wave และไม่ใช่

การนำเอาสัญญาณ sine มาใช้นั้นโดยทั่วไปจะต้องใช้กับชุดขับมอเตอร์ที่สามารถรับสัญญาณ sine wave ได้ แต่เนื่องจากชุดขับแบบนี้ราคาสูง ในงานนี้จึงใช้ชุดขับแบบที่ต้องใช้สัญญาณ square wave โดยสัญญาณ sine wave จะนำมาใช้ในการคำนวณมุม (θ_m) เพื่อใช้ในระบบควบคุมมุนเท่านั้นดังในรูปที่ 4 โดยการใช้อุปกรณ์ A/D data acquisition card อ่านสัญญาณ sine wave เข้ามาในคอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อทำการคำนวณออกมาเป็นมุม โดยค่ามุมที่ได้จะละเอียดขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงค่าที่ได้เทียบค่าที่อ่านได้จากสัญญาณ square wave ผ่าน encoder quadrature card ที่มีความละเอียด 8192 pulse ต่อรอบ ซึ่งในการใช้งาน

นั่นพบว่าจะต้องใช้ทั้งสัญญาณจาก encoder card และ ที่ค่าจำนวนจาก sine wave ได้ประกอบกัน เพราะความเร็วในการคำนวณ นั้นจะเร็วไม่พอเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว ดังจะเห็นได้ที่ตำแหน่ง A ในรูปที่ 5 ดังนั้นจะต้องคอยตรวจค่าที่คำนวณได้เทียบกับค่าที่ได้จาก encoder card อยู่เสมอและเมื่อค่าแตกต่างกันมากเกินไปจะต้องแก้การคำนวณให้ตรงกับค่าที่ได้จาก encoder card ในด้าน ความแม่นยำที่ได้เพิ่มขึ้นนั้นในรูปที่ 6 แสดงค่าความแม่นยำที่ได้จากการใช้สัญญาณ square wave เทียบกับการใช้เฉพาะ square wave ซึ่งทำให้ค่ามุมที่ได้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น โดยความแม่นยำในการวัดเพิ่มขึ้นจากจาก 721 micron เป็น 75 micron เมื่อใช้วัด ตำแหน่งของ retroreflector ที่ระยะ 56 cm จากกระจกติดตาม (นั่นคือการใช้สัญญาณ Sinusoidal จะได้ความถูกต้องประมาณ 7.7×10^{-3} องศา หรือที่ประมาณ 27 arcsec หรือ ที่ 47000 pulse/rev, หรือดีขึ้น 10 เท่า) นอกจากนี้แล้วยังพบว่าระบบสามารถ ติดตาม retroreflector ได้ที่ระยะถึง 5 m (หรือดีขึ้น 5 เท่า) และสามารถติดตาม retroreflector ได้ที่ความเร็วสูงสุดถึง 60cm/s ใน แนว Azimuth (หรือดีขึ้น 3 เท่า)

4. สรุป

การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบ LTS เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ สามารถทำงานได้ในระยะรัศมี 5 เมตร การควบคุมติดตามกระจกเงา เพื่อให้แนวลำแสงเลเซอร์ชี้ไปที่ retroreflector ซึ่งเคลื่อนที่ใน 3 มิติตลอดเวลาในรัศมี 1 เมตร มีเสถียรภาพ ในระดับหนึ่ง และยังสามารถพัฒนาให้สมรรถนะการควบคุมสูงขึ้นไปได้อีกโดยนำสัญญาณ sinusoidal จาก encoder มาใช้โดยตรง ความเร็วในการติดตามก็สามารถพัฒนาให้เพิ่มขึ้นอีกโดยพัฒนาการสร้างระบบควบคุมที่มีความเร็วสูงขึ้น เมื่อการควบคุมกระจกเงามี เสถียรภาพ ตำแหน่งของมุมกระจกสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าตำแหน่งใน 3 มิติของ retroreflector ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องรูปแบบใหม่ของเทคโนโลยีการผลิตเชิงหุ่นยนต์ขั้นสูง ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนในโครงการนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lertpiriyasawat, V., Berg, and M.C., Buffinton, K.W. (2000) Extended Kalman Filtering Applied to a Two-Axis Robotics Arm with Flexible Links., *International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 3, pp 254-270.
- [2] Huang, M.Z., and Masory, O. (1993) A Simple Method of Accuracy Enhancement for Industrial Manipulators. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.8, pp. 114-122.
- [3] Heeren, T.A.G., Veldpauw, F.E. (1992) An Optical System to Measure the End Effector Position for On-line Control Purposes. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 1, pp 53-63
- [4] Decker, S., Gander, H., Vincze, M., Prenninger, J.P. (1992) Dynamic Measurement of Position and Orientation of Robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, No. 6. pp 897-901
- [5] Yen, J., Jeng, C., and Fan, K. (1996) Servo Design for a 3-D Laser Tracking Measurement System., *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 118, September 1996, pp 476-481.



ประวัติผู้นำเสนอผลงาน สุภวุฒิ จันทร์พานิชย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปริญญาโท-เอกที่ University of Michigan, Ann Arbor ปัจจุบันรับราชการเป็นอาจารย์อยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความสนใจเกี่ยวกับระบบควบคุมต่างๆและการนำไปใช้ รวมทั้งเทคโนโลยีด้านยานยนต์และการผลิต

Fixtureless Robotic Manufacturing System

ระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์จับยึด

Ratchatin Chanchareon, Jaruboot Kananai, Supavut Chantranuwathana

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Bangkok 10330

E-mail: Ratchatin.C@eng.chula.ac.th

Abstract:

The use of dedicated fixture to hold and align workpieces in the manufacturing process is costly, time consuming and inflexible. Therefore, the demonstration of Fixtureless Robotic Manufacturing System is presented. The manufacturing cell consists of an articulated robot, an XY robot, and a positioning sensor (Fastrak®). The system uses Fastrak® to determine the workpiece position and orientation in real time. This information is then sent to the robotic control unit. The trajectory of the robotic end-effector is then adapted based on the real time workpiece position/orientation, and thus a priori knowledge of workpiece position/orientation is not required. The control units of the commercial CRS robotic system and the Roland XY plotter are modified so that low level control technique can be implemented. Thus, all the machines in the cell system can be fully controlled. The experiment also demonstrates a fully integrated manufacturing cell that manufacturing capability is improved through this integrity.

Keywords: Robot, Control, Manufacturing.

บทคัดย่อ:

การใช้อุปกรณ์จับยึดเพื่อยึดชิ้นงานในขั้นตอนการผลิตมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานาน และขาดความยืดหยุ่นในการทำงาน เพื่อลดข้อจำกัดนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์จับยึด ระบบประกอบด้วยหุ่นยนต์แบบ Articulated และ หุ่นยนต์แบบ XY อุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่ง (Fastrak®) ระบบใช้อุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งเพื่อวัดตำแหน่งของชิ้นงานในขณะที่ทำงาน ข้อมูลตำแหน่งนี้จะถูกส่งไปที่ชุดควบคุมหุ่นยนต์ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะปรับเปลี่ยนตามตำแหน่งของชิ้นงาน และทำให้ไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของชิ้นงานก่อนล่วงหน้า คณะผู้วิจัยได้ดัดแปลงระบบควบคุมของหุ่นยนต์ CRS robotic และ Roland plotter เพื่อให้สามารถควบคุมระบบดังกล่าวในระดับข้อต่อได้ และทำให้สามารถควบคุมระบบทั้งหมดได้อย่างเต็มที่ โครงการนี้ยังนำเสนอระบบการผลิตที่มีศักยภาพและความยืดหยุ่นสูง

Keywords: หุ่นยนต์, การควบคุม, การผลิต.

1. Introduction

Robotic operation usually requires dedicated fixtures to precisely secure workpieces in their right position. The fixtures are part specific, and therefore must be redesigned when parts changes. The custom-made fixtures are costly and time-consuming to build and install. To overcome this, we propose a fixtureless robotic manufacturing system. The concept of fixtureless robotic system uses positioning sensor to sense the position and orientation of workpiece frame and programs the robot based on this movable workpiece frame. Thus, the workpiece can be in any position within the workspace of the robot.

Since the robot motion is programmed based on the workpiece frame, a precise mathematic is used to map the robot motion into joint space in real time. A real time controller is then used this mapped motion in joint space to simultaneously control all the robot's joints. This is a challenging task, requiring a much more difficult control technique compared to the conventional PID controller.

In this project, we developed a fully integrated robotic manufacturing cell. The controller of the CRS articulated robot is modified such that joint level control technique can be implemented. The Roland XY plotter is also modified such that its motion can be programmed. The TCP network is used to communicate between machines in the cell.

The preliminary results demonstrate that the robot can perform its task in floating workpiece frame. The manufacturing workcell is more flexible.

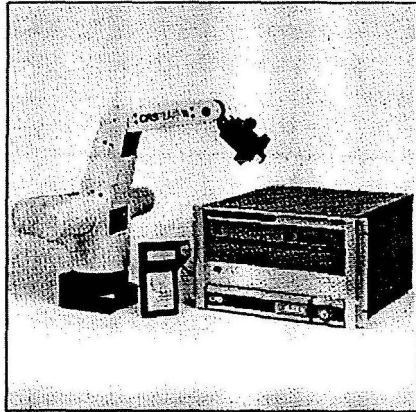
The paper is organized into seven sections. The first section is introduction. The second and third sections are about the robot used in the study and the mathematic used to map the position defined in workpiece frame into robot's joint space. The fourth section mentions the manufacturing workcell architecture. The fifth section demonstrates the results. The sixth is the conclusion and the last section is the future work.

2. The CRS Robotic System

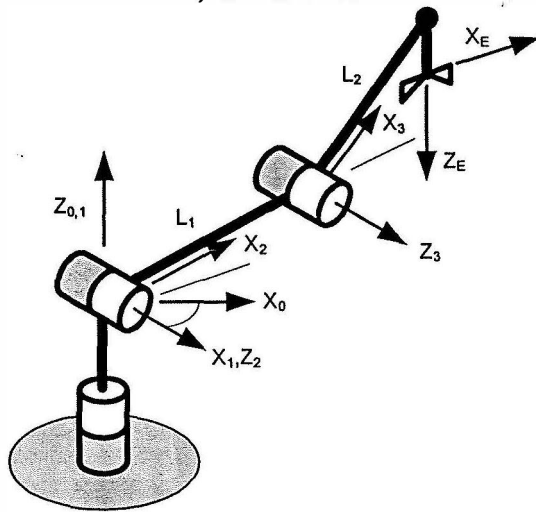
The CRS robotic system, shown in Fig 1. is a 5 Degrees of freedom articulated robot. The DH parameters of the robot are as followings:

Table 1 DH parameter of the CRS robotic system

i	α_i	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	10"	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	10"	0	θ_3
4	0	10"	0	θ_4
5	-90°	0	2"	θ_5



a) The CRS robot



b) Kinematics diagram

Figure 1 The CRS Robotic System

The forward kinematics can be expressed as [1]

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 (L_1 c_2 + L_2 c_{23}) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & s_1 (L_1 c_2 + L_2 c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & L_1 s_2 + L_2 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

The inverse kinematics of the CRS robotics system is found to be

$$\theta_1 = a \tan 2(Y, X) \text{ or } a \tan 2(Y, X) + \pi$$

$$\theta_3 = a \tan 2(s_3, c_3)$$

where

$$c_3 = \frac{X^2 + Y^2 + Z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}$$

$$s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2}$$

and

$$\theta_2 = a \tan 2(s_2, c_2)$$

where

$$s_2 = \frac{(L_1 + L_2 c_3)X - (L_2 s_3 \sqrt{X^2 + Y^2})}{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$c_2 = \frac{(L_1 + L_2 c_3)\sqrt{X^2 + Y^2} - L_2 s_3 Z}{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

3. The Mapping

In general, position vector described with respect to (wrt) some frame, {W} can be mapped or described wrt another frame, {B}. In order to transform its description, the position (origin) and orientation of frame {W} wrt frame {B} is required. The origin of frame {W} wrt frame {B} is usually called ${}^B P_{WORG}$ and the orientation of frame {W} wrt frame {B} can be described by rotation matrix ${}^B R_W$. The general mapping can be expressed as follows [2];

$${}^B P = {}^B R_W {}^W P + {}^B P_{WORG}$$

where

${}^B P$ is the position vector described in {B}

${}^W P$ is the position vector described in {W}

${}^B R_W$ is the rotation of {W} wrt {B}

${}^B P_{WORG}$ is the origin of {W} wrt {B}

This mapping expression can be written in a compact form as follows;

$$\begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B R_W & {}^B P_{WORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^W P \\ 1 \end{bmatrix}$$

or

$${}^B P = {}^B T_W {}^W P$$

The 4x4 matrix operator, ${}^B T_W$, in this equation is called homogeneous transform.

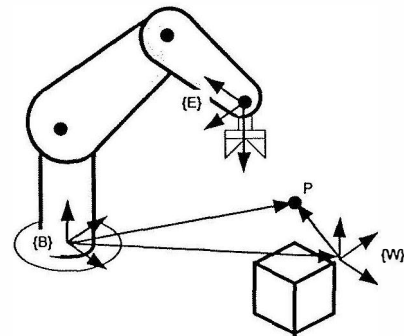


Figure 2 Transformation

In the project, the position and orientation of workpiece frame $\{W\}$ wrt robot base frame $\{B\}$ is sensed by Fastrak[®] positioning sensor in real time. Thus, the homogeneous transform at each servo time can be determined and the trajectory described in frame $\{W\}$ can be transformed into its description in frame $\{B\}$. The robot's inverse kinematics is then used to mapped the trajectory described in robot frame $\{B\}$ into robot's joint space.

4. Manufacturing Cell Architecture

The Fixtureless Manufacturing Cell, shown in Fig 3., consists of the CRS robotics system, Roland plotter, Fastrak[®] positioning sensor, the movable palette and three computers. The CRS robotics and the Roland plotter controllers are modified such that the joint level control technique can be implemented. The Matlab-xPC is used for real time control of both systems. Using the xPC, the robot control is written in Matlab-simulink in host computer and is then uploaded to the target xPC where control cards are installed and is being used for real time control. All the robot joints are simultaneously controlled at 0.1 msec speed.

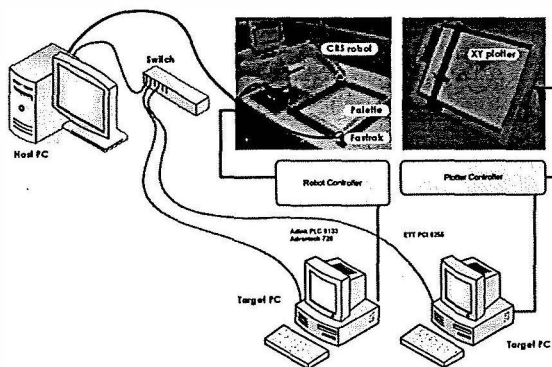


Figure 3 System Architecture

Fastrak[®] is used to sense the position of the movable palette and then sending the position and orientation of the palette to the target xPC via the host PC. This host PC feeds the position information to the target xPC through 10 Mbps TCP/UDP protocol. The xPC then, maps the reference trajectory, which is defined in movable workpiece frame into the fixed reference frame, then performs the inversed kinematics calculation. The trajectory is now mapped into robot's joint space. The xPC, again, simultaneously controls all joints to follow the joint trajectory. The roughly designed PD controller is used to control these joints. In the experiment, the axes of the robot fixed reference frame and the transmitter of Fastrak[®] are aligned but the relative position is unknown.

The target xPC sends the results including joint position, the joint position command, and the reference position of the workpiece, back to the host PC through TCP/UDP protocol. The host PC then displays the graphic interpretation of the results without degrade the speed of the real time control.

5. Experimental Results

In the experiment, the robot is programmed to draw an ellipse (50, 30) on a movable palette. The palette is able to translate in XY horizontal plane. The PD controller is roughly tuned and the robot is not perfectly following an ellipse trajectory as shown in Fig 4. It is also noted that the relative position between Fastrak[®]'s transmitter and the robot fixed frame is unknown.

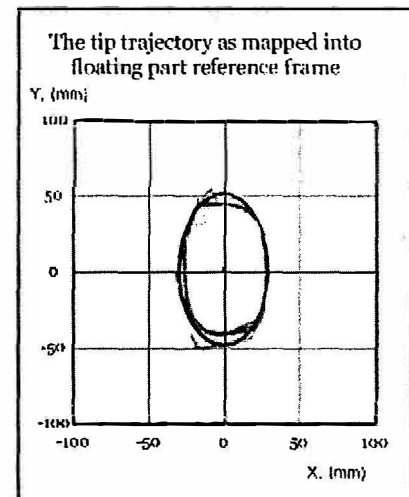


Figure 4 The tip trajectory in part frame

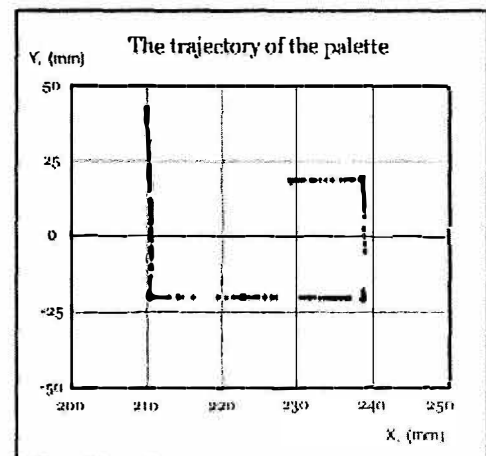


Figure 5 The position of the movable palette

After the robot drew an ellipse for a couple times, we translate the palette in both X and Y directions as shown in Fig 5. The robot is able to adapt its tip trajectory to follow the ellipse as shown in Fig 4. The robot trajectory, measured by joint's

encoders, in joint space is shown in Fig 6. The joint trajectory is then mapped into robot's Cartesian space using robot forward kinematics and the calculated tip trajectory in robot fixed reference frame is shown in Fig 7. It is obviously seen that the tip trajectory, either in joint space or in Cartesian space, has a response to Fastrak® receiver's position.

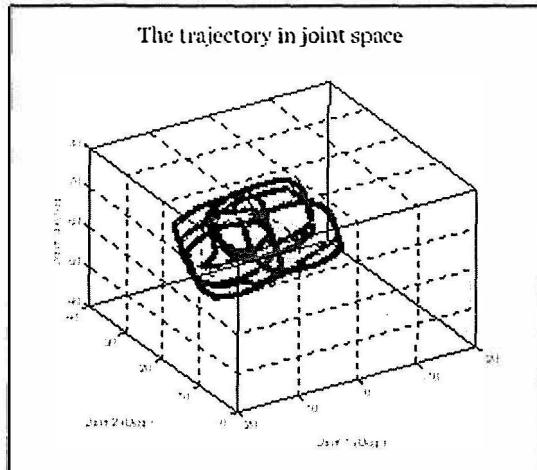


Figure 6 The robot position in joint space

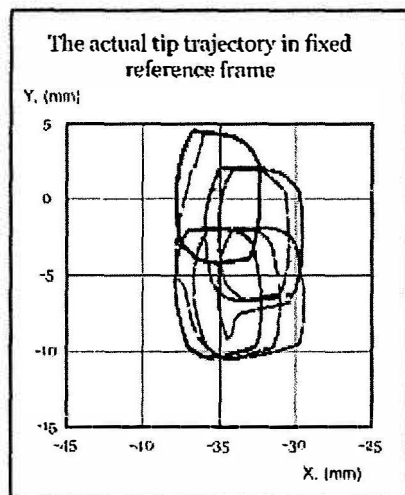


Figure 7 The tip position in Cartesian space

The Fastrak®'s receiver position, which is the position of workpiece reference frame, is used to compensate the tip trajectory in real time, the result is shown in Fig 4. It is demonstrated that the robot is able to draw an ellipse on the movable palette as desired. The actual tip trace on the palette is shown in Fig 8.

We are now able to demonstrate that the robot can perform its task on a movable palette. Since the PD joint controller is not perfect, it is also seen that we are able to map the trajectory into joint's position command quite well. The robot draws the same trace while the palette translates.

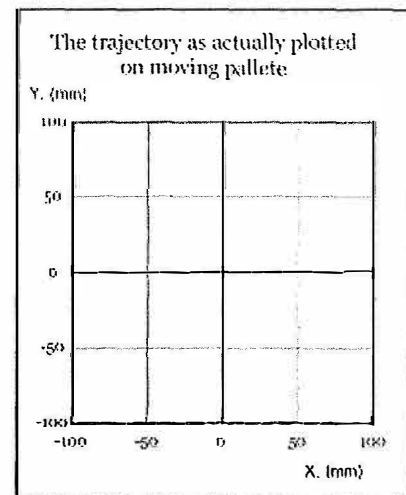


Figure 8 The tip trace on the movable palette

In fact, we need to know the position of Fastrak®'s transmitter relative to the robot fixed frame in order to demonstrate the performance of our technique when rotation of the palette is involved. The result is not shown in the paper.

6. Conclusion

In this project, the robot is able to perform its task on movable workpiece. The proposed technique used positioning sensor to sense workpiece position in real time and also perform mapping and inverse kinematics calculation in real time to map the motion defined in workpiece frame to the robot joint space. The manufacturing cell is then more flexible and can handle more comprehensive manufacturing tasks.

7. Future Works

We are now developing a Laser Positioning System (LPS) [3] to sense the robot's tip and workpiece directly in real time. This device could sense the position faster and more accurate and thus enhance the overall performance. The adaptive control will be designed for the robot along with control library to support a complicated control technique. We aim to develop a new control strategy to directly control the motion of the robot's tip relative to the workpiece by using our developed LPS to sense both the tip and the workpiece.

Reference

- [1] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano, Modeling and Control of Robot Manipulators, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [2] John J. Craig (1989), Introduction to ROBOTICS: mechanics and control, Addison-Wesley Publishing Company, 0-201-09528-9, USA.

- [3] S. Chantranuwathana, J. Kananai, R. Chanchaen, "Development of Laser Positioning System for Fixtureless Robotic Manufacturing," National Science and Technology Development Agency (NSTDA) Annual Conference 2005, March 28-30, 2005, Science Park, Thailand.