

モーションコピーシステムに基づく 筆記動作における教育システムの構築

松井 綾花^{1,a)} 三浦 一将^{1,b)} 桂 誠一郎^{1,c)}

概要: 近年、高齢社会により高度な技術を持つ熟練技能者の減少が問題となっており、モーションコピーシステムを用いた熟練者のスキル抽出の研究がなされている。モーションコピーシステムでは力情報と位置情報を同時に抽出して保存・再現が可能であり、熟練技術の教育への応用が期待されている。そこで本研究では、モーションコピーシステムに基づく筆記動作における教育システムを構築する。モーションコピーシステムを用いた教育システムを構築する場合、再現時においてトレーニが筆に接触することが想定される。しかし、従来のモーションコピーシステムでは再現中にトレーニが筆に接触した場合、保存時の文字の再現が出来なくなる。そこで本提案では再現時におけるトレーニの接触力を推定することでトレーニの接触力に対してロバストな再現システムを構築する。これにより、トレーニがトレーニの筆を持ち筆記動作を行うといった教育法が可能となる。また、本提案の有効性をシミュレーションにより確認する。

キーワード: ハプティクス, バイラテラル制御, 外乱オブザーバ, 多自由度ロボット

A Method of Education System for Calligraphy Based on Motion Copying System

AYAKA MATSUI^{1,a)} KAZUMASA MIURA^{1,b)} SEIICHIRO KATSURA^{1,c)}

Abstract: Recently, the number of experts has been decreasing by the aged society and acquisition of expert skills based on motion-copying system has been researched. In motion-copying system, both of force and position responses of expert skills are acquired simultaneously and those informations are able to be saved and reproduced. Then, application of education for expert skills is highly desired. In this paper, therefore, the education system for calligraphy based on motion-copying system is constructed. When education system using motion-copying system, it is assumed that a trainee touches a brush during reproducing. However, if the trainee touches it, same characters as saving could not be reproduced. So, this paper proposes robust education system for input force by a trainee which is obtained by estimation of that force. This proposed method enables a trainee to write characters as if a trainer touched and manipulated trainee's arm. Also, the validity of the proposed method is verified by simulations.

1. 序論

近年、高齢社会により高度な技術を持つ熟練技能者の減少が問題となっている。この対策としてモーションコピー

システム [1], [2] を用いてロボットに熟練者のスキルを複写する研究が行われている。従来では、モーションキャプチャによる人間の動作抽出が主として行われてきたが、モーションキャプチャは位置情報のみを抽出する [3], [4], [5], [6], このような位置情報に基づいたものでは環境との接触が想定されない動作に関しては保存・再現が可能であるが、接触動作を伴う動作においてはその力加減を保存・再現することは困難である。一方で、モーションコピーシステムではアクチュエータを使用することにより位置情報と力情報を

¹ 慶應義塾大学システムデザイン工学科
Department of System Design Engineering, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku, Yokohama, Kanagawa, 223-8522,
Japan

a) matsui@katsura.sd.keio.ac.jp
b) miura@katsura.sd.keio.ac.jp
c) katsura@sd.keio.ac.jp

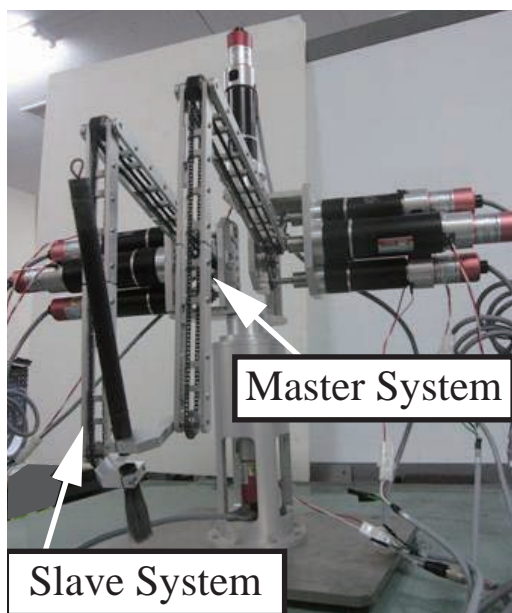


図 1 ハプティックペンロボット.
Fig. 1 Haptic pen robot.

同時に保存することができ、環境との接触動作に関しても保存・再現が可能であり、また熟練技術の教育といったことへの応用が考えられる。本研究では、熟練技術である書道の筆記動作に焦点を当てる。

図 1 にハプティックペンロボットを示す。このロボットは筆記動作を行うために開発されたロボットであり、4 自由度を有する。マスタにおいては操作者が持つ筆の柄の部分、スレーブにおいては筆が紙に接触する筆先部分を装着する。一本の筆は柄と筆先に分離しているが、近接型バイラテラルシステムを構築することによって、操作者はあたかも一本の筆を扱っているような感覚で操作することが可能となる。この近接型バイラテラルシステムでは、マスタとスレーブに分離した機構を有することにより、マスタで操作者の力入力、スレーブで環境からの反力を同時に抽出することが可能となる。

本研究では、モーションコピーシステムを用いた教育システムを提案する。筆記動作におけるモーションコピーシステムでは、操作者の入力と環境からの反力を抽出し、保存することで何回でも保存した文字を再現することが可能となる。モーションコピーシステムを用いた教育システムを構築する場合、再現時においてトレーニが筆に接触することが想定される。しかし、従来のモーションコピーシステムでは再現中にトレーニが筆に接触した場合、保存時の文字の再現が出来なくなる。そこで本提案では再現時におけるトレーニの接触力を推定することでトレーニの接触力に対してロバストな再現システムを構築する。本提案により、トレーニがトレーニの筆を持ち筆記動作を行うといった教育法をモーションコピーシステムにより実現することが可能となる。

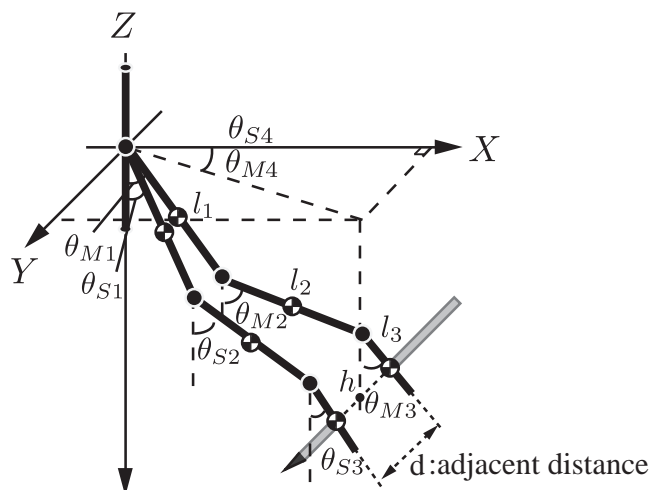


図 2 ハプティックペンロボットのモデル
Fig. 2 Model of the haptic pen robot

2. 近接型マスタスレーブロボットのモデリング

本研究では、多自由度システムにおける人間動作を抽出し、触覚情報を用いた教育システムを構築するため、多自由度ロボットの一つとして図 1 に示すハプティックペンロボットを扱う。図 2 にハプティックペンロボットのモデルを示す。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ が可動関節であり、下付き文字 \circ_M, \circ_S はそれぞれマスタ、スレーブである。どちらのシステムにおいても、各リンクのリンク長は l_1, l_2, l_3 である。ここで、本論文では各リンク質量はそれぞれの重心にかかるかと仮定する。点 h は作業空間における筆の中心位置である。この点において、バイラテラル制御を実装することで、物理的に分離した筆をあたかも一本の筆かのように操作しながら、同時に個人の筆跡動作を抽出することができる。そこで、点 h における運動学を導出する。先端におけるマスタとスレーブの距離を d とすると、マスタにおける筆の中心位置 h は (1) 式で表される。

$$\begin{bmatrix} x_M & y_M & z_M & \theta_M \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} (l_1 \sin \theta_{M1} + l_2 \sin \theta_{M2} + \frac{l_3}{2} \sin \theta_{M3} + \frac{d}{2} \cos \theta_{M3}) \cos \theta_{M4} \\ (l_1 \sin \theta_{M1} + l_2 \sin \theta_{M2} + \frac{l_3}{2} \sin \theta_{M3} + \frac{d}{2} \cos \theta_{M3}) \sin \theta_{M4} \\ l_1 \cos \theta_{M1} + l_2 \cos \theta_{M2} + \frac{l_3}{2} \cos \theta_{M3} + \frac{d}{2} \sin \theta_{M3} \\ \theta_{M3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

さらに、時間に関して微分して得た先端速度は (2) 式となる。ここで、 J はヤコビ行列の各要素である。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_M & \dot{y}_M & \dot{z}_M & \dot{\theta}_M \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{M1} \\ \dot{\theta}_{M2} \\ \dot{\theta}_{M3} \\ \dot{\theta}_{M4} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
J_{11} = l_1 \cos\theta_{M1} \cos\theta_{M4} \\
J_{12} = l_2 \cos\theta_{M2} \cos\theta_{M4} \\
J_{13} = (\frac{l_3}{2} \cos\theta_{M3} - \frac{d}{2} \sin\theta_{M3}) \cos\theta_{M4} \\
J_{14} = -(l_1 \sin\theta_{M1} + l_2 \sin\theta_{M2} \\
\quad + \frac{l_3}{2} \sin\theta_{M3} + \frac{d}{2} \sin\theta_{M3}) \sin\theta_{M4} \\
J_{21} = l_1 \cos\theta_{M1} \sin\theta_{M4} \\
J_{22} = l_2 \cos\theta_{M2} \sin\theta_{M4} \\
J_{23} = (\frac{l_3}{2} \cos\theta_{M3} - \frac{d}{2} \sin\theta_{M3}) \sin\theta_{M4} \\
J_{24} = (l_1 \sin\theta_{M1} + l_2 \sin\theta_{M2} \\
\quad + \frac{l_3}{2} \sin\theta_{M3} + \frac{d}{2} \cos\theta_{M3}) \cos\theta_{M4} \\
J_{31} = -l_1 \sin\theta_{M1} \\
J_{32} = -l_2 \sin\theta_{M2} \\
J_{33} = -\frac{l_3}{2} \sin\theta_{M3} + \frac{d}{2} \cos\theta_{M3} \\
J_{34} = 0 \\
J_{41} = 0 \\
J_{42} = 0 \\
J_{43} = 1 \\
J_{44} = 0
\end{array} \right. \quad (3)$$

同様に、スレーブにおける筆の中心位置 h は (4) 式となる。

$$\left[\begin{array}{cccc}
x_S & y_S & z_S & \theta_S
\end{array} \right]^T = \left[\begin{array}{c}
(l_1 \sin\theta_{S1} + l_2 \sin\theta_{S2} + \frac{l_3}{2} \sin\theta_{S3} - \frac{d}{2} \cos\theta_{S3}) \cos\theta_{S4} \\
(l_1 \sin\theta_{S1} + l_2 \sin\theta_{S2} + \frac{l_3}{2} \sin\theta_{S3} - \frac{d}{2} \cos\theta_{S3}) \sin\theta_{S4} \\
l_1 \cos\theta_{S1} + l_2 \cos\theta_{S2} + \frac{l_3}{2} \cos\theta_{S3} - \frac{d}{2} \sin\theta_{S3} \\
\theta_{S3}
\end{array} \right] \quad (4)$$

2.1 動力学

筆ロボットにおけるマスタとスレーブの運動方程式は (5) 式となる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau \quad (5)$$

ここで、 $M(\theta)\ddot{\theta}$ 、 $H(\theta, \dot{\theta})$ 、 $G(\theta)$ 、 τ はそれぞれ、慣性行列、非線形項、重力項、トルク行列を示す。本論文では制御系を実装する際に、慣性行列を用いて電流参照値を、外乱オブザーバ (DOB)[13] による推定外乱をそれぞれ計算している。

3. 教育システムの構築

モーションコピーシステムはバイラテラル制御を技術基盤に持つシステムであり、保存システム・再現システムから構成される。まず保存システムにおいて、位置と力をモーションデータメモリに保存し、再現システムにおいて保存したデータをバーチャルマスタとして使用する。これによって、保存した動作を繰り返し再現することが可能である。しかし、従来のモーションコピーシステムでは、再現システムにおいて保存システムと異なる外力がシステムに印加されると、保存した動作を再現することができな

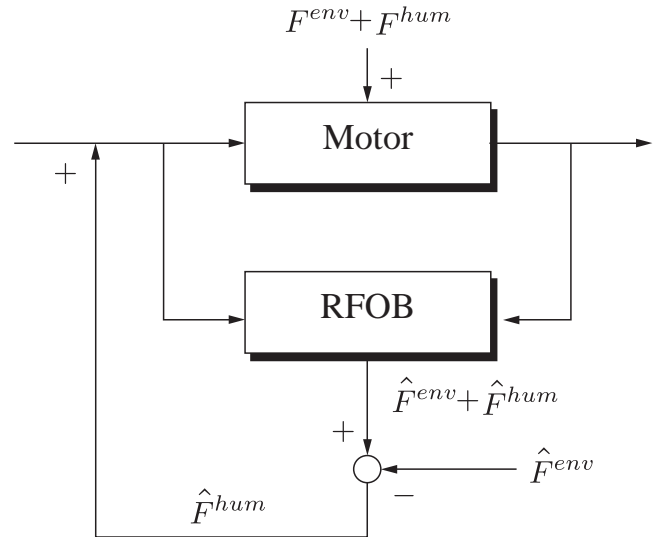


図3 提案手法における再現システム
Fig. 3 Proposed motion-loading system.

かった。つまり、再現システムにおいてトレーニがシステムに触れると、再現される動作が異なってしまう。触覚情報を用いた新たな教育システムを構築するためには、再現システムにおいてトレーニが触れても、保存した動作を再現できるシステムが理想的である。これによって、トレーニはあたかもトレーナーに手を添えられて、動作を教授されているかのような感覚を得ながら、システムは保存した動作と同じ動作を環境に対して再現する。

図3に再現システムにおける提案手法を示す。 F^{hum} と F^{env} はそれぞれ、トレーニによる外力と、環境反力をそれぞれ示す。 $\hat{\circ}$ 、 \circ_{DB} はそれぞれ、推定値と保存システムにおいてモーションデータメモリに保存した値を示す。再現システムにおいて、環境からの反力に加えてトレーニがシステムに力を加えた場合、反力推定オブザーバ (RFOB) [16] は環境反力とトレーニの力の合力を推定する。ここで、保存システムと再現システムの環境は変わらないとすると、保存システムで保存した環境反力は再現システムにおける環境反力と等しい。そのため、RFOBを通して推定した力から、保存した環境反力を用いてトレーニがシステムに加えた力を抽出することができる。トレーニの力を推定してシステムに入力することによって、実際のトレーニが加えた力を打ち消すことができるため、あたかもトレーニが触れていないシステムを構築することができる。これによって、環境に対して再現する動作はトレーニがどのような動作を行っても保存時と同じ動作になる。一方、トレーニは保存システムで行ったトレーナーの動作と異なる力加減をシステムから感じるようになる。つまり、提案手法を用いることによって、あたかもトレーナーが自分の手を持って動作しているかのような感覚を得ることが可能になる。

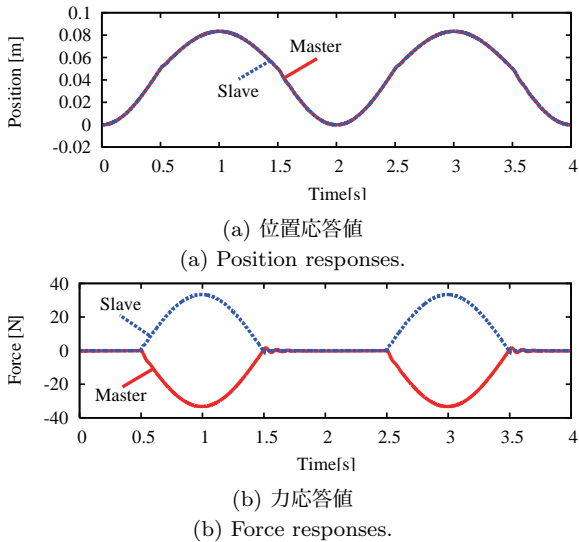


図 4 保存システムのシミュレーション結果。

Fig. 4 Simulation results of the motion-saving system.

4. シミュレーション

多自由度システムにおける教育システム構築のための前段階として、本研究では1自由度の動作におけるシミュレーションを行った。シミュレーションで用いたパラメータを表1に示す。環境位置は初期位置から0.05 mのところにあるとし、サンプリング時間は多自由度ロボットのサンプリング時間と同じ0.1 msとした。保存システムにおける実験結果を図4に示す。図4よりマスタとスレーブ間の位置誤差はなく、力応答値より作用反作用が達成されていることがわかる。この時の環境反力、マスタの動作情報を保存し再現システムを構築した。再現システムでは、トレーニが常に一定の力をシステムに与えたと仮定して、5 Nの力をシステムに印加している。従来手法におけるシミュレーション結果を図6に示す。図6から分かるように、保存システム時における外力と異なる外力が印加された場合、従来手法では環境に対して異なる動作が再現されてしまう。提案手法でのシミュレーション結果を図7に示す。図7より、環境反力以外の力が印加されても、保存動作と同じ動作を環境に対して行っていることがわかる。これによって、トレーニがトレーナに教えられながら、トレーニと同じ動作を再現するシステムが構築できた。シミュレーションによって、提案手法の有効性を示した。

5. 結論

本研究では、筆記動作におけるモーションコピーシステムに基づく教育法を提案した。提案法は、モーションデータベースに保存されたデータを用いることで、再現時にトレーニが筆に加えた接触力のみを推定することが可能となり、これにより、接触力に対してロバストな再現システムを構築することが可能となる。提案法により、トレーニは

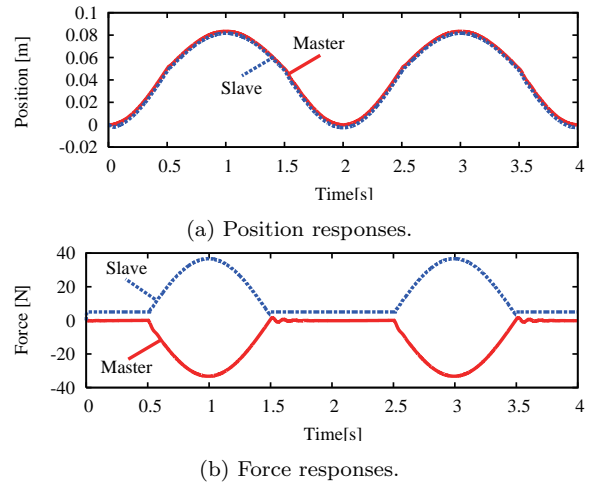


図 5 従来手法による再現システムのシミュレーション結果。

図 6 Simulation results of conventional motion-loading system.

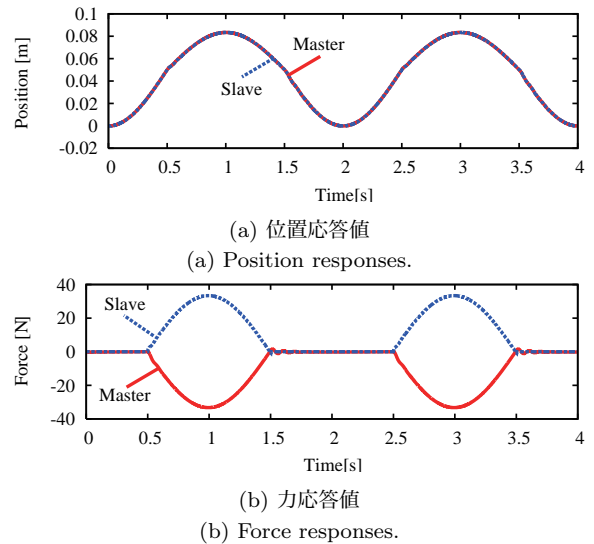


図 7 提案手法による再現システムのシミュレーション結果。

Fig. 7 Simulation results of proposed motion-loading system.

あたかもトレーナがトレーニの手を持って筆記動作を行う感覚を得ることが可能となる。本研究では、提案法の有効性をシミュレーションにより確認した。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 (A) (課題番号: 24686037) によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表す

参考文献

- [1] Y. Yokokura, S. Katsura, K. Ohishi : "Stability Analysis and Experimental Validation of a Motion-Copying System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 10, pp. 3906–3913, October, 2009.
- [2] Y. Yokokura and S. Katsura : "Adaptive Motion-Copying System Based on Real-World Haptics," *Proceedings of the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE IECON 2010-*

表 1 シミュレーションパラメータ.

Table 1 Simulation parameters.

| Parameter | Description | Value |
|-----------|--|--------------|
| Mm | Mass of master | 0.3 kg |
| Ms | Mass of slave | 0.3 kg |
| Mn | Nominal mass | 0.3 kg |
| K_p | Position gain | 10000.0 |
| K_v | Velocity gain | 200.0 |
| K_f | Force gain | 5.0 |
| g_{dis} | Cut-off frequency of DOB | 1000.0 rad/s |
| g_{pd} | Cut-off frequency of pseudo-derivation | 1000.0 rad/s |
| K_e | Elastic coefficient of environment | 2000.0 N/m |
| K_e | Viscous coefficient of environment | 10.0 Ns/m |

- PHOENIX*, pp. 1228–1233, November, 2010.
- [3] Kun Li, Qionghai Dai, and Wenli Xu : “Markerless Shape and Motion Capture From Multiview Video Sequences,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 21 No. 3, pp. 320–334, March. 2011.
- [4] C. M. N. Brigante, N. Abbate, A. Basile, A. C. Faulisi, and S. Sessa : “Towards Miniaturization of a MEMS-Based Wearable Motion Capture System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 8, pp. 3234–3241, August. 2011.
- [5] Jacky C. P. Chan, Howard Leung, Jeff K. T. Tang, and Taku Komura : “A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 4, No. 2, pp. 187–195, April, 2011.
- [6] Janet van der Linden, Erwin Schoonderwaldt, Jon Bird, and Rose Johnson : “MusicJacke—Combining Motion Capture and Vibrotactile Feedback to Teach Violin Bowing,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 1, pp. 104–222, January, 2001.
- [7] A. E. Saddik : “The Potential of Haptics Technologies,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 10, No. 1, pp. 10–17, February, 2007.
- [8] H. Kuwahara, T. Shimono, H. Tanaka, D. Yashiro, and K. Ohnishi : “Abstraction of Action Components Unconstrained by Alignment of Haptic Sensing Points,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 8, pp. 3196–3204, August, 2011.
- [9] D. A. Lawrence : “Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 624–637, August, 1993.
- [10] K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean : “Bilateral Parallel Force / Position Teleoperation Control,” *Journal of Robotic Systems*, Vol. 19, No. 4, pp. 155–167, April, 2002.
- [11] W. Iida and K. Ohnishi : “Reproducibility and Operability in Bilateral Teleoperation,” *Proceedings of 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC '04*, pp. 217–222, March, 2004.
- [12] S. Katsura, W. Iida, and K. Ohnishi : “Medical Mechatronics - An Application to Haptic Forceps,” *IFAC Annual Reviews in Control*, Vol. 29, No. 2, pp. 237–245, November, 2005.
- [13] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami : “Motion Control for Advanced Mechatronics,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 56–67, March. 1996.
- [14] W. S. Huang, C. W. Liu, P. L. Hsu, and S. S. Yeh : “Precision Control and Compensation of Servomotors and Machine Tools via the Disturbance Observer,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1, pp. 420–429, January. 2010.
- [15] C. Mitsantisuk, K. Ohnishi, S. Urushihara, and S. Katsura : “Kalman Filter-Based Disturbance Observer and its Applications to Sensorless Force Control,” *Advanced Robotics*, Vol. 25, No.3, pp. 335–353, April. 2012.
- [16] T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi : “Torque Sensorless Control in Multidegree-of-freedom Manipulator,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 2, pp. 259–265, April. 1993.