

ナノハプトによる微細力覚フィードバック

小 杉 貴 洸[†] 萬 修 太 郎[†] 桂 誠 一 郎[†]

近年、聴覚情報や視覚情報に次ぐ第3のメディアとして触覚情報が注目されている。特に実世界ハプティクスは、実世界を対象としているために今後の情報技術に大きな発展をもたらすと期待される。触覚伝達を実現することは、人間が空間的な移動を伴わずに感覚だけを送ることを意味している。したがって、電気信号として触覚情報を扱うことができるため情報の加工が容易となり、人間と等しいスケールだけでなく異なるスケールに対しても力情報によるインタラクションを可能にする。従来の視覚情報のみでなく触覚情報を加えることで、操作者により多くの情報を与えることができ、操作の正確性および安全性を向上することができる。本稿ではその有用性を力覚フィードバック付きマイクロマニピュレーションシステムであるナノハプト (Nano-hapto) によって示す。

Force Feedback from Micro Environment by Using Nano-hapto

TAKAHIRO KOSUGI,[†] SHUTARO YOROZU[†] and SEIICHIRO KATSURA[†]

Recently, real-world haptics has been attracted as a third multimedia technology. By transmitting haptic information, humans carry out some tasks without the transportation to the remote place. It means that only human's sensation exists in remote place. One of the applications of the bilateral control is macro-micro bilateral control which deals with force feedback to the operator from the micro environment. Since operators obtain not only visual information but also haptic information, they can feel as if they are touching the real micro environment, and the more precise and safety manipulation are realized compared with visual based manipulation. In this paper, the validity of the macro-micro bilateral control is verified by Nano-hapto which is the micro manipulation system with force feedback.

1. はじめに

マルチメディア技術は様々なコミュニケーションツールに応用され発展してきている。聴覚や視覚はその代表例であり、それらの基盤技術は広く社会に浸透している。近年、聴覚情報や視覚情報に次ぐ第3のメディア技術として触覚情報が注目されてきており、特に実世界の物に対して触覚情報を扱う学問である実世界ハプティクスの研究が盛んに行われている。触覚情報は、対象物に接触してはじめて知覚することができる作用・反作用の法則という物理法則に支配されているため、情報を双方向に伝達すること必要となり、視聴覚情報とは異なる性質がある。触覚情報を伝達するために、マスタスレーブシステムから成るバイラテラル制御に関する研究が数多く行われてきた^{1)~4)}。しかしながら、マスタシステムで力制御しスレーブシステムで位置制御を行う力帰還型等、各アクチュエータ単位で

力制御と位置制御の情報が共有されない制御系が考えられてきたために、精度の高い触覚情報の伝達ができなかった。これに対し、加速度制御に基づくバイラテラル制御では座標変換によりアクチュエータの空間から和の空間と差の空間により構成される仮想モード空間に分解することで、和の空間と差の空間で独立に制御剛性を設計することが可能となった。これにより力制御と位置制御を同時に統合することができるため、鮮明な触覚情報の伝達が実現できるようになった⁵⁾。

本稿では、バイラテラル制御の応用であるマクロマイクロバイラテラル制御に注目している。マクロマイクロバイラテラル制御とは、異なるスケールのマスタおよびスレーブ間での力覚伝達手法であり、人間が直接操作することができない領域へ拡張することができる。従来のマイクロマニピュレーションでは、視覚情報のみに基づいていたため、接触状態も視覚から判断しなければならない。したがって、人間は力加減を知覚することができず器具や試料を破壊してしまう可能性が生じる。そこでマクロマイクロバイラテラル制御を用いることで視覚情報に加えて、触覚情報もフィー

[†] 慶應義塾大学
Keio University

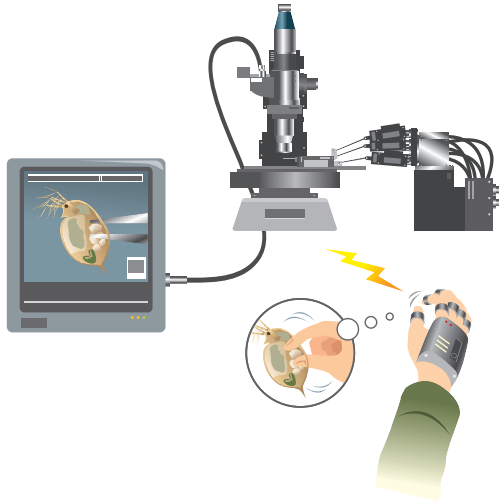


図 1 ナノハプトのコンセプト
Fig. 1 Concept of Nano-hapto.

ドバックすることで操作の正確性および安全性を向上することが期待される．この研究に関しても様々な制御法^{6)~9)}が提案されてきたが，加速度制御に基づく制御法¹⁰⁾により鮮明な力覚伝達を実現される．本稿では，加速度制御に基づくマクロマイクロバイラテラル制御の有用性を開発した力覚フィードバック付きマイクロマニピュレーションシステムであるナノハプト (Nano-hapto) を用いて確認する．

2. ナノハプト

本章では，力覚フィードバック付きマイクロマニピュレーションシステムであるナノハプト (Nano-hapto) について説明する．ナノハプトのコンセプトを図 1 に表し，実際のシステムを図 2 に示す．図 2 では砂糖 1 粒を把持している状態である．また図 3 はスレーブシステムの拡大図であり，姿勢は 6 自由度のスチュワートプラットフォーム，把持は先端 1 自由度で制御される．把持に関しては，先端のモータが駆動することでピンセットが動作する構造となっている．各モータにロッド型リニアモータを採用することで機構的に摩擦を除去しており，それぞれ外乱オブザーバおよび反力推定オブザーバが実装されているため，力センサレスで力情報を取得することができる¹¹⁾¹²⁾．図 2 ではマスタの 1 自由度と先端 1 自由度間でバイラテラル制御を行っている．

ナノハプトでは，スレーブ先端の画像を顕微鏡により拡大して視覚情報を与え，さらにマクロマイクロバイラテラル制御によって微細環境からの力覚情報をフィードバックすることが可能となる．

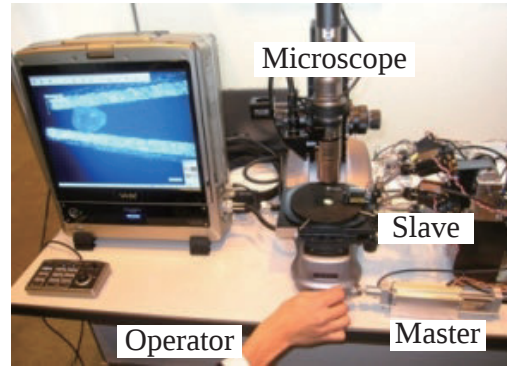


図 2 ナノハプトの全体図
Fig. 2 Overview of Nano-Hapto.

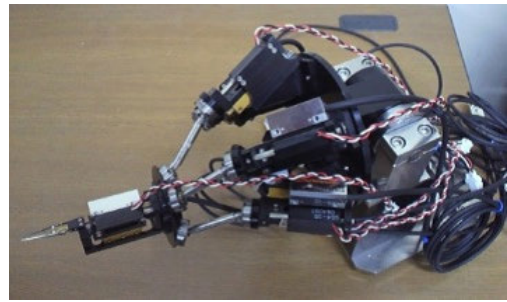


図 3 スレーブシステム
Fig. 3 Slave system.

3. マクロマイクロバイラテラル制御

本研究では人間が微細環境に対して操作することを考えているため，マスタおよびスレーブ間で位置と力のスケーリングを行う必要がある．微細環境を対象とするマクロマイクロバイラテラル制御の目標式は (1) 式，(2) 式で表すことができる．

$$\alpha x_m - x_s = 0 \quad (1)$$

$$\beta F_m + F_s = 0 \quad (2)$$

ここで x, F はそれぞれ位置と力を表し，下付き文字 m, s はマスタおよびスレーブを表している．また α は位置のスケーリングゲイン， β は力のスケーリングゲインである．バイラテラル制御では力制御と位置制御を同時に実現することが求められる．そこで各モータから得られる情報をスケーリングゲイン行列 S_2 により，モード空間に変換する．

$$S_2 = \begin{bmatrix} \beta & 1 \\ \alpha & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} F_C \\ F_D \end{bmatrix} = S_2 \begin{bmatrix} \hat{F}_m^{ext} \\ \hat{F}_s^{ext} \end{bmatrix} \quad (4)$$

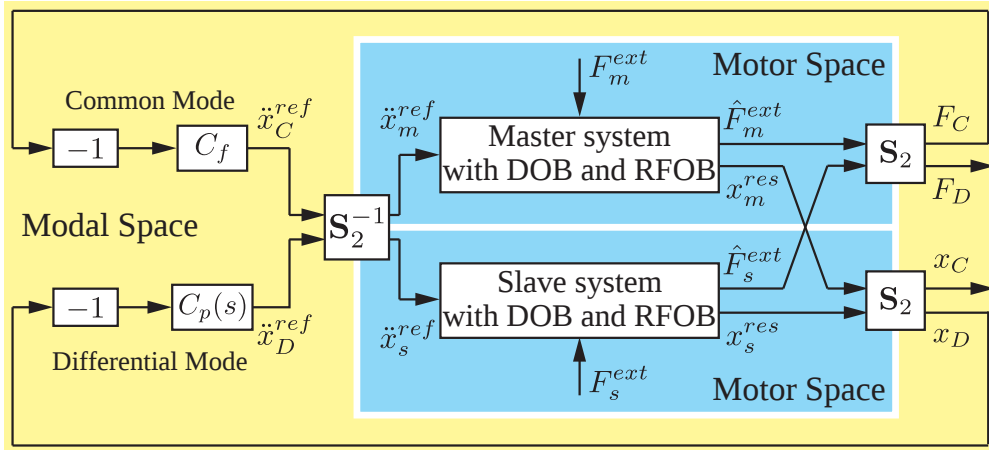


図 4 マクロマイクロバイラテラル制御のブロック線図

Fig. 4 Block diagram of the micro-macro bilateral control.

$$\begin{bmatrix} x_C \\ x_D \end{bmatrix} = S_2 \begin{bmatrix} x_m^{res} \\ x_s^{res} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで下付き文字 C, D は和のモードおよび差のモードを表している．力の和のモードを力制御，位置の差のモードを位置制御することによりモード空間における加速度参照値を得ることができる．

$$\begin{aligned} \ddot{x}_C^{ref} &= C_f(0 - F_C) \\ &= -K_f F_C \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_D^{ref} &= C_p(s)(0 - x_D^{res}) \\ &= -(K_p + K_v s)x_D^{res} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで K_f, K_p, K_v はそれぞれ力ゲイン，位置ゲイン，速度ゲインであり，上付き文字 ref は参照値である．各モータの加速度参照値はスケーリングゲイン行列の逆行列 S_2^{-1} によって得られる．

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_m^{ref} \\ \ddot{x}_s^{ref} \end{bmatrix} = S_2^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_C^{ref} \\ \ddot{x}_D^{ref} \end{bmatrix} \quad (8)$$

マクロマイクロバイラテラル制御のブロック線図を図 4 に示す．

4. 実験

本稿ではマクロマイクロバイラテラル制御の有用性を示すために，ナノハプトにより実験を行った．各リニアモータは RTAI3.7 により制御され，制御周期は 0.2 ms である．エンコーダの分解能はマスタが 50 nm，スレーブが 10 nm である．また実験パラメータを表 1 に示す．環境は砂糖 1 粒とし，制御系にとって砂糖の剛性などのパラメータは未知となっている．

表 1 実験パラメータ

Table 1 Experimental parameters.

Parameter	Description	Value
M_{mn}	Nominal mass of master	0.245 kg
K_{tmn}	Force coefficient of master	3.33 N/A
M_{sn}	Nominal mass of slave	0.01 kg
K_{tsn}	Force coefficient of slave	0.906 N/A
α	Position scaling gain	0.0333
β	Force scaling gain	0.0333
K_f	Force gain	3.0
K_p	Position gain	10000.0
K_v	Velocity gain	200.0
g_{dis}	Cut-off frequency of disturbance observer	1000.0 rad/s
g_{reac}	Cut-off frequency of reaction force observer	1000.0 rad/s
g_{pd}	Cut-off frequency of pseudo derivation	2000.0 rad/s

実験結果を図 5，図 6 に示す．図 5 は位置応答値であり，マスタのスケーリングが行われた位置とスレーブの位置が同期していることがわかる．また図 6 は力応答値であり，マスタスレーブ間で作用・反作用の法則が達成されており，マスタにおいて環境反力を人工的に再現できていることが確認できる．実験結果より，微細環境からの力覚フィードバックが実現され，開発したナノハプトおよびマクロマイクロバイラテラル制御の有用性を示すことができた．

5. おわりに

本稿では，微小環境からの力覚フィードバックを実現するマイクロマニピュレーションシステムであるナノハプト (Nano-hapto) を紹介した．ナノハプトを用いることにより，従来の視覚情報に加えて微細環境からの力覚情報も人間は知覚することができる．した

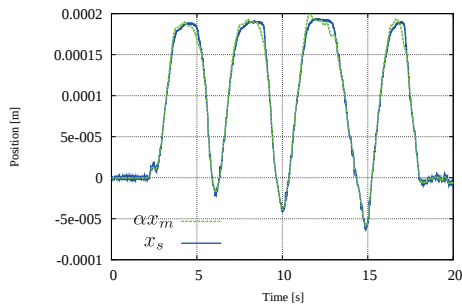


図 5 位置応答値の実験結果

Fig. 5 Experimental results of position responses.

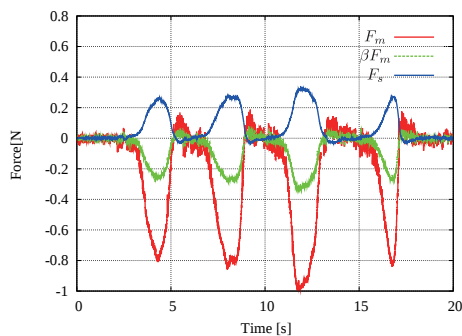


図 6 力応答値の実験結果

Fig. 6 Experimental results of force responses.

がって、より多くの情報に基づく操作が可能となり、正確性および安全性を高めることができると期待される。ナノハブの有用性を示すために微細環境に対し実験を行ったが、理論的には大きな環境に対してもスケーリングゲインの設定により適用することができる。このように実世界において力覚情報の伝達がリアルタイムに可能になることで人間は物理的な移動を伴わず、電気信号により感覚だけを遠隔地・極限環境下へ伝達することができ、さらには情報を加工することによって人間のスケールを越えた領域への人間の感覚伝送を実現することも可能となる。

謝辞 本研究の一部は、NEDO 産業技術研究助成事業 (プロジェクト ID: 07C46047a) 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) B. Hannaford : "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 426–434, 1989.
- 2) D. A. Lawrence : "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 624–637, 1993.

- 3) K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean : "On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1863–1869, 1999.
- 4) Y. Yokokohji and T. Yoshikawa : "Bilateral Control of Master-slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling – Formulation and Experiment," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 605 – 620, 1994.
- 5) 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, 2005.
- 6) S.E. Salcudean and J. Yan : "Towards a Force-reflecting Motion-Scaling System for Microsurgery," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '94*, Vol. 3, pp. 2296 – 2301, 1994.
- 7) K. Takeo and K. Kosuge : "Implementation of the Micro-macro Teleoperation System without Using Slave-side Force Sensors," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '97*, Vol. 2, pp. 1600 – 1605, 1997.
- 8) A. Sano, H. Fujimoto and T. Takai : "Personal Scaling on Micro-Teleoperation," *Proceedings of the 26th IEEE Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'00*, Vol. 1, pp. 7 – 12, 2000.
- 9) M. Sitti and H. Hashimoto : "Teleoperated Touch Feedback from the Surfaces at the Nanoscale: Modeling and Experiments," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 287 – 298, 2003.
- 10) T. Shimono, S. Katsura, S. Susa, T. Takei, and K. Ohnishi : "Transmission of Real World Force Sensation by Micro/Macro Bilateral Control Based on Acceleration Control with Standardization Matrix," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 128-D, No. 6, pp. 726–732, 2008.
- 11) K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami : "Motion control for advanced mechatronics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 56–67, 1996.
- 12) 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, 1993.