

새로운 S-Chain 모델을 이용한 MR 햅틱 시뮬레이터 제어

오종석

공주대학교 기계자동차공학부 조교수

Control of MR Haptic Simulator Using Novel S-chain Model

Jong-Seok Oh

Assistant Professor, Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 의료 현장에서의 최소침습수술(MIS)의 어려움 때문에 시뮬레이터 훈련이 활발히 연구되고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 S-chain 모델을 사용하여 가상 장기와 변형과정을 표현하고 반발력 제공이 가능한 햅틱 시뮬레이터를 개발하고자 한다. S-chain 알고리즘의 주요 원리는 반발력이 체인 요소의 수에 비례하는 것이며, 대상인 장기의 변형이 클수록 많은 계산 시간을 요구한다. 이에 본 연구에서는 계산속도가 개선된 S-chain 알고리즘을 회전움직임에 적용하여 제어 성능을 평가하였다. 본 연구에서는 자기 점성 점성(MR) 유체를 사용하는 햅틱 마스터 시스템을 제안하고 S-chain 모델을 개발한다. 결과적으로, 이 S-chain 모델을 사용하여 가상의 장기와 실제 마스터 장치를 결합함으로써 반발력과 수술로봇의 좌표 위치를 서로 전달하는 햅틱 시스템을 구축하여, 햅틱 시뮬레이터의 제어 성능을 실험을 통해 평가하였다.

주제어 : 반발력, 스마트유체, 자기점성유체, MR 클러치, S-chain 모델

Abstract Due to difficulty in minimally invasive surgery, training simulator is actively researched. A volumetric deformable organ is created by employing a shape-retaining chain-linked (S-chain) model to realize positioning a human organ model in virtual space. Since the main principle of the S-chain algorithm is that the repulsive force is proportional to the number of chain elements, the calculation time can be increased according to the magnitude of deformation. In this work, the advanced S-chain algorithm is used to calculate the repulsive torque according to spin motion. Finally, haptic architecture was constructed using this S-chain model by incorporating the virtual organ with a real master device, which allows the repulsive force and target position to be transferred to each other. The control performance of S-chain algorithm has been evaluated via experiment.

Key Words : Repulsive Force, Smart Fluid, Magneto-Rheological (MR) Fluid, MR Clutch, S-Chain Model

1. 서론

로봇 기술의 눈부신 발전으로 최소침습수술기법이 제 안되었으며, 로봇 보조 최소침습수술(RMIS)은 마스터-슬레이브 로봇 시스템을 통해 환자와 의사가 떨어진 채

로 수술이 진행된다 [1-3]. 예를 들어, 환자의 복부에 RMIS가 있는 동안, 작은 절개부위를 통해 비디오 카메라와 수술 도구가 있는 로봇 팔이 그 부위에 삽입된다. 환자들은 통증이 적고 입원 기간이 짧기 때문에 RMIS를 통해 큰 혜택을 보지만, 의사에게는 RMIS의 과정을 배

*This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP; Ministry of Science, ICT & Future Planning) (No. 2017R1C1B5018204).

*Corresponding Author : Jong-Seok Oh (jongseok@kongju.ac.kr)

Received August 16, 2018

Revised October 15, 2018

Accepted November 20, 2018

Published November 28, 2018

우는 것은 매우 어렵다. 이에 외과용 로봇수술 시뮬레이터의 개발은 RMIS의 상용화를 위해 매우 필수적이다. 게다가, 마스터의 촉각 피드백 기능을 추가할 수 있다면 외과 의사들에게 매우 도움이 될 수 있기에, 본 논문에서는 가상 환경에서 햅틱 외과용 시뮬레이터를 개발하는 것이 주요 목적이다.

최근 스마트 소재 액추에이터를 특징으로 하는 다양한 햅틱 마스터가 제안되었다. Senkal 교수 연구진은 가상 시험의 3 자유도 MR 원구형 브레이크를 평가하였다 [4]. Ahmadhanlou 교수 연구진은 반응동적 피드백을 위한 원격 로봇 수술용 햅틱 시스템을 개발했으며 [5], Yamaguchi 교수 연구진은 로봇 시스템의 안전을 확립하기 위해 낮은 관성, 높은 토크/관성 비율 및 높은 반응성을 지닌 MR액추에이터를 개발하였다 [6]. 인하대 최승복 교수 연구진은 4자유도 햅틱 마스터를 제안하고 제어 성능 평가를 수행하였다 [7]. 그리고 가상 환경을 재현하기 위해 수많은 알고리즘이 제안되었다. 실시간 계산의 복잡성으로 인해 빠른 실시간 상호 작용을 보여 주는 형상 저장 체인(S-chain)모델이 제안되었다 [8-10]. S-chain 모델은 변형량에 따라 계산속도가 비례하기 때문에 3-D 가상장치에 적용하여 실시간 제어장치에 적용하기 매우 어려운 점이 있으며 격자 구조로 배열된 체인의 특성상 회전 움직임에 대한 변형을 표현하기 어려운 점이 있다.

따라서, 본 논문은 4 자유도 자기 점성 가변적(MR) 햅틱 마스터 시스템과 가상 공간의 장치기관 사이에 햅틱 인터페이스를 제안한다. 제안된 햅틱 장치에는 근감각적인 반발력에 대한 햅틱 피드백 기능이 있다. 가상 장치의 변형률을 실시간 제어장치에 적용하기 위해 계산속도 성능이 매우 개선되고 회전움직임에 따른 변형과정을 표현 가능한 S체인 모델을 개발하였다. 수술용 햅틱 시스템에서, 햅틱마스터와 가상장치는 토크정보와 로봇 이동정보가 실시간으로 상호 교환되며, 이때 햅틱마스터의 토크 추종성능을 평가하였다.

2. MR 햅틱 마스터

RMIS를 수행하기 위해서는 3 축 회전 운동과 1 축 병진 운동을 필요로 한다고 알려져 있다. 그리고 수술동작을 수행하면서 근감각적인 반발력을 구현하기 위하여 MR햅틱 마스터를 제안하였다. 조작자의 복잡한 동작이 반발력 액추에이터로 전달될 수 있도록 짐벌 메커니즘이

채택되었다. 제안된 MR햅틱 마스터 시스템은 그림 1과 같이 유성 기어 시스템이 있는 양방향 MR클러치 2개가 아래 짐벌 구조와 연결되며, 짐벌구조 상부에는 베벨 기어 시스템이 있는 MR클러치이 핸들과 일체형으로 구성된다 [11]. 조작자의 움직임에 반응하는 반발력은 짐벌 메커니즘을 통해 다시 전달된다. 피칭 및 롤링 회전 운동을 위한 반발력을 생성하기 위해 2개의 양방향 MR클러치와 유성 기어가 고안되었다. 또한, 배선 및 변환 동작에 대한 MR브레이크가 그림 1에 부착되어 있다. 엄지 손가락의 변환 운동을 수행하기 위해 베벨 기어 메커니즘이 사용된다. MR클러치 및 브레이크의 생성된 토크는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{bc} = \pi D^2 h_c \tau_{y,a}(B) + \frac{\pi \eta D^3 h_c |\Omega_1 - \Omega_2|}{2t_f} \quad (1)$$

여기서 D 는 클러치와 브레이크 로터의 지름, h_c 는 클러치와 브레이크의 높이, t_f 는 하우징과 로터사이의 두께, Ω_1 와 Ω_2 는 로터와 하우징의 상대속도를 뜻하게 된다 [5, 12-14].

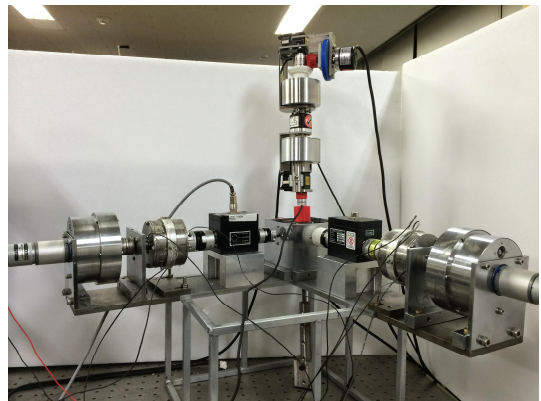


Fig. 1. Manufacture MR Haptic Master

3. 새로운 S-chain 알고리즘

햅틱 시뮬레이터를 구현하기 위하여 S-chain 알고리즘을 이용하여 가상장치의 변형을 표현하였다. S-chain 모델은 일반적으로 매트릭스 반전 연산과 같은 압도적인 연산 시간이 요구되는 다른 모델보다 빠른 연산을 가능하게 하는 것으로 알려져 있기 때문에, 이 모델을 선택하였다. S-chain 알고리즘의 주된 원리는 반발력이 초기 위

치에서 이동하는 체인 요소의 수에 비례한다는 것이다. 그림 2에 표시된 것처럼, 사용자는 하단 체인 요소를 아래로 이동시킨다. 첫번째 체인(e1)은 직렬로 이동하는 체인 요소에 연결되어 있지만, 이동 가능한 체인을 병렬로 연결하여 반응력 합계를 계산한다. 하나의 체인 요소가 최대변형 길이보다 작은 거리(D_{x1})를 이동하게 되면 반발력은 $k_1 D_{x1}$ 이 되고, 여기서 k1는 체인 요소의 스프링 상수가 된다. 첫번째 체인요소를 최대 변형 거리까지 당기면 두번째 체인요소(e2)가 이동하고 반발력은 $k_1 D_{max} + k_2 D_{x2}$ 가 된다. 두번째 체인요소(e2)가 최대 변형 거리보다 더 많이 이동하면 세번째 체인요소가 움직이게 된다. 이러한 방법에 기초하여 n번째 체인 요소의 총 변위와 반발력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

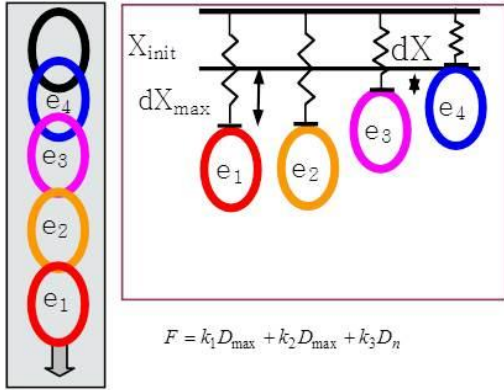


Fig. 2. Concept of S-chain Algorithm

$$\Delta X = (n - 1)D_{max} + D_{xn} \quad (2)$$

$$F = \left(\sum_{i=1}^{n-1} k_i D_{max} \right) + k_n D_{xn} \quad (3)$$

이러한 방법을 통해 1-D S-chain 모델링 기법을 2-D 및 3-D로 쉽게 확장할 수 있다. 2-D또는 3-D케이스에서의 반발력은 전적으로 각 축의 구성 요소 힘의 벡터 합이다[5].

하지만 회전움직임에 대한 변형은 S-chain 모델만으로 설명하기 매우 어려운 점이 있다. S-chain 모델은 초기 위치에서의 변형이 근처 체인으로 확장되어 가는 것인데, 격자배열로 이루어진 체인과 노드들에서는 회전운동에 따른 근처 체인을 격자구조로 상정하게 되면 변형 과정이 실제와 매우 다르게 된다. 이에 본 논문에서는

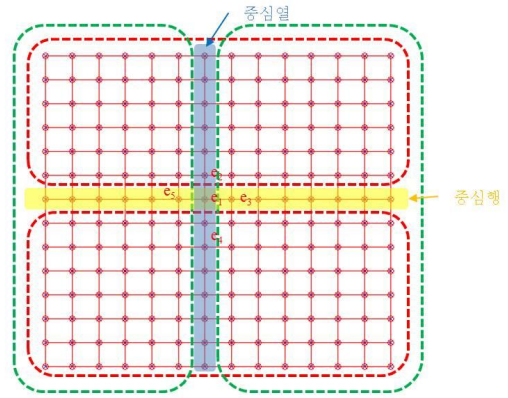
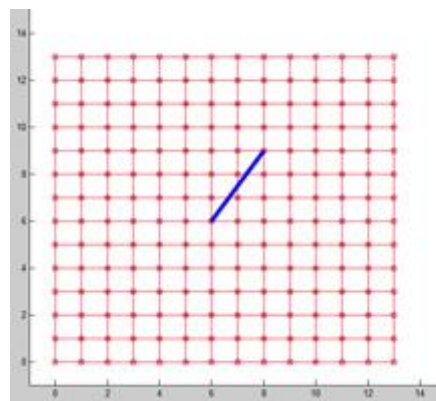
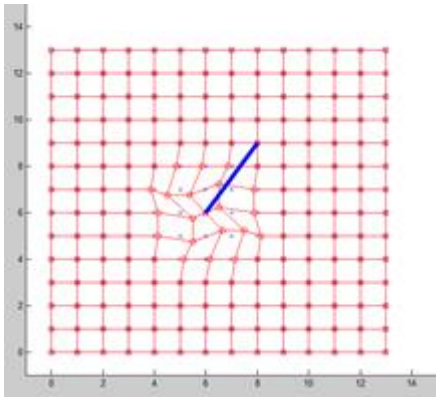


Fig. 3. Configuration of New S-chain Algorithm

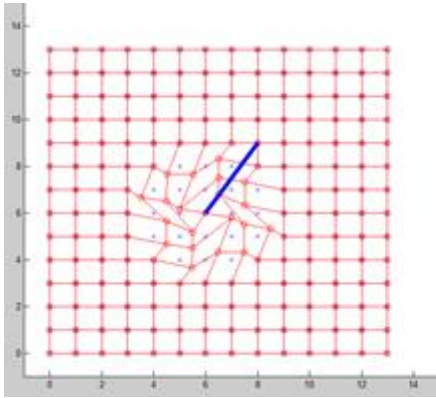
그림 3과 같이 격자구조로 이루어진 체인과 노드들을 중심행과 중심열로 구역을 나누어 회전에 따른 변형을 설명하고자 한다. 먼저 회전의 중심 노드인 e1에서는 회전토크만 가해지고 위치변화는 없다고 보았으며, e1을 중심으로 상하좌우에 존재하는 4개의 노드가 회전방향에 따라 상하좌우로 움직인다고 가정하였다. 4개의 노드들의 변형량이 최대 변형거리를 넘어서게 되면 이때 회전하게 되며, 인접한 상하좌우의 노드들이 움직이며 앞의 변형과정과 똑같은 과정을 거친다고 가정하였다. 이러한 가정을 적용한 변형과정은 그림 4에 나타내었다. 그림4에서 확인가능하듯이 회전각도에 따라 노드들이 자연스럽게 변형된 것을 확인할 수 있다. 이때 중심행과 중심열의 반발력은 아래와 같이 계산된다.



(a) initial state



(c) 40° rotation



(e) 80° rotation

Fig. 4. Deformed Object According to New S-chain Model

$$T_{center} = 2(Y_{initial} \sum_{i=1}^{d_y} i \cdot k_i D_{max}) + 2(d_y + 1)Y_{initial} \cdot (k_y)D_y + 2(X_{initial} \sum_{i=1}^{d_x} i \cdot k_i D_{max}) + 2(d_x + 1)X_{initial} \cdot (k_x)D_x \quad (4)$$

여기서 $X_{initial}$, $Y_{initial}$ 는 노드간의 x축과 y축 방향으 로의 거리를 뜻하게 된다. 는 아래와 같이 계산되며, d_x, d_y 는 아래와 같이 정의되며, 이때 []는 “보다 작거나 같은 가장 큰 정수”를 뜻하는 하한연산을 의미한다.

$$d_x = \left\lfloor \frac{\Delta X}{D_{max}} \right\rfloor, d_y = \left\lfloor \frac{\Delta Y}{D_{max}} \right\rfloor \quad (5)$$

또한 4개의 구역중 위쪽의 좌우 구역의 반발력은 아래 와 같이 계산되며, 아래쪽 2개의 구역도 유사하게 계산된다.

$$T_x = \sum_{i=1}^{d_x} (t_x)_i = \sum_{i=1}^{d_x} (d_x - i + 1)X_{initial} (2 \sum_{p=1}^i (k_x)_p D_{max} k_x D_x)$$

$$T_y = \sum_{i=1}^{d_y} (t_y)_i = \sum_{i=1}^{d_y} (d_y - i + 1)Y_{initial} (2 \sum_{p=1}^i (k_y)_p D_{max} k_y D_y) \quad (6)$$

4. 제어실험

새로운 S-chain 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 그림 5에 표시된 것처럼 실험 기구를 제작하였다. 제어 시스템 구성은 센서로부터 측정된 현재 측정값과 목표값과 의 오차를 제거하기 위해 제어기에서 계산된 제어입력이 햅틱 마스터 시스템에 입력된다 [15-18]. 제작된 MR햅틱 마스터는 사용자가 자유롭게 이동할 수 있다. 마스터의 그리퍼를 이동하면 회전 각도 및 변위와 같은 위치 정보 가 엔코더 및 LVDT와 같은 센서에 입력된다. 입력된 정보 는 먼저 컨트롤러로 전송된 다음 컴퓨터가 MR장치에 적용할 제어 입력을 계산한다. 햅틱 마스터로 전달된 제

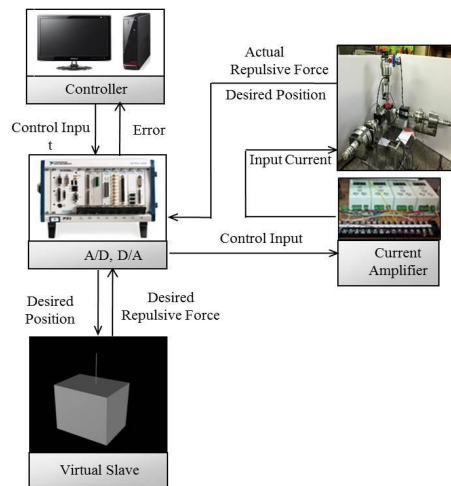


Fig. 5. Experimental Apparatus of Control Test

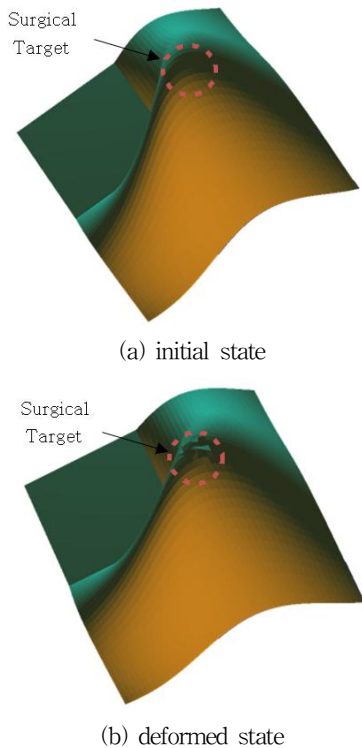


Fig. 6 Virtual Organ Results

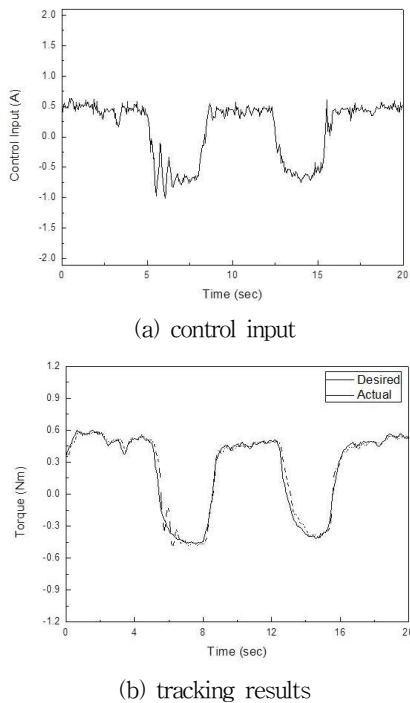


Fig. 7 Control Test Results

어 입력과 생성된 토크 및 힘은 6축 힘/토크 센서에 의해 측정된다. 모든 신호는 디지털화되어 NIexpress 새시 (PXIe-1082)인 AD/DA 보드를 통해 전송된다.

측정된 위치 정보는 가상의 슬레이브 시스템으로 전송되며, 이 정보에 기초하여 변형 가능한 물체의 변형과 반발력이 S-chain 모델을 통해 계산되고, 모니터를 통해 참가자에게 시각적 정보가 전송된다. 가상의 수술 기기의 끝이 가상 물체의 표면을 관통하도록 움직인다고 가정할 때, 수술기기의 말단은 계속해서 표면을 관통할 수 있고 원하는 대로 끌어낼 수도 있다. 동시에 사용자에게 반사된 힘이 계산된 후 햅틱 마스터 장치를 통해 참가자에게 전달된다. S-chain 모델을 사용한 햅틱 렌더링은 70×70×35의 치수를 가진 가상 입방 개체에 적용된다. 변형 가능한 물체에 대한 그래픽 및 햅틱 시뮬레이션은 Microsoft Visual C++ 및 OpenGL에서 그래픽 라이브러리로 작성한 프로그램에 의해 수행된다. 가상 환경에서의 가상 슬레이브는 가상 개체의 USCE(사용자 선택 체인 요소)와 연결하기 위해 움직인다. 이 물체는 S-chain 모델에 의해 그림 6과 같이 변형된다. 회전에 따른 변형을 원활히 표현하기 위해 입방개체의 z축상 최고점에 변형을 가하였으며, 그림 6에서 확인할 수 있듯이 회전에 따른 변형이 적절히 표현되고 이러한 변형과정이 실시간으로 조작자에게 모니터를 통해 제공된다.

가상 환경에서의 원하는 반발력 정보가 최대 0.6 Nm 이며, MR 햅틱마스터가 원하는 반발력을 작은 오차로 생성함을 실험을 통해 확인하였으며 그림 7에 나타내었다. 제안된 S-chain 알고리즘을 통해 계산하여 부드럽고 연속적인 힘 정보를 얻을 수 있다는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다. 제안된 마스터 슬레이브 시스템의 힘 업데이트 속도는 1000Hz, 그래픽 업데이트 속도는 100Hz로 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 가상 슬레이브 시스템이 활성화되고 시간 지연의 문제 없이 마스터와 성공적으로 통신하는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 MR유체를 사용하는 4 자유도 햅틱 마스터를 RMIS 수술중 생기는 근감각적인 반발력을 구현하기 위하여 제안하였으며, 4 자유도의 수술 동작중의 생기는 반발력을 발생시킬 수 있다. 또한 가상의 공간에서 인체 기관 모델을 구현하기 위해 S-chain 모델을 사용하

여 형체 변형 기관을 구현하였으며, 이때 변형에 따른 반발력을 계산하여 햅틱마스터를 통해 구현하도록 하였다. 본 연구에서 개발된 S-chain 모델은 가상 장치의 변형 과정을 기존 S-chain 모델보다 신속하게 계산할 수 있었다. 마지막으로 본 연구에서 제안된 MR 햅틱 마스터가 가상 수술 로봇 및 가상환경을 통합하여 제어 실험을 수행하였다. 실험결과를 통해 본 연구에서 제안하는 햅틱 마스터와 가상환경 연동 장치는 매우 성공적으로 개발한 것을 알 수 있었으며, 향후 연구에서는 실제 장치와 햅틱 마스터의 제어 성능을 실험적으로 고찰할 예정이다.

REFERENCES

- [1] R. Abovitz. (2001). Digital surgery: the future of medicine and human-robot symbiotic interaction. *Industrial Robot: An International Journal*, 28(5), 401-406.
DOI: 10.1108/EUM000000005842
- [2] M. C. Cavusoglu, F. Tendick, M. Cohn & S. S. Sastry. (1999). A laparoscopic telesurgical workstation. *IEEE Transactions on Robotics and automation*, 15(4), 728-739.
DOI: 10.1109/70.782027
- [3] W. H. Li, B. Liu, P. B. Kosasih. & X. Z. Zhang. (2007). A 2-DOF MR actuator joystick for virtual reality applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 137(2), 308-320.
DOI: 10.1016/j.sna.2007.03.015
- [4] D. Senkal & H. Gurocak. (2009). Spherical brake with MR fluid as multi degree of freedom actuator for haptics. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(18), 2149-2160.
DOI: 10.1177/1045389X09348925
- [5] Ahmadkhanlou, F., Washington, G. N., & Bechtel, S. E. (2009). Modeling and control of single and two degree of freedom magnetorheological fluid-based haptic systems for telerobotic surgery. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(10), 1171-1186.
DOI: 10.1177/1045389X09102262
- [6] Yamaguchi, Y., Furusho, J., Kimura, S., & Koyanagi, K. (2005). Development of high-performance MR actuator and its application to 2-D force display. *International Journal of Modern Physics B*, 19(7), 1485-1491.
DOI: 10.1142/S0217979205030487
- [7] Oh, J. S., Han, Y. M., Lee, S. R., & Choi, S. B. (2012). A 4-DOF haptic master using ER fluid for minimally invasive surgery system application. *Smart Materials and Structures*, 22(4), 045004.
DOI: 10.1088/0964-1726/22/4/045004
- [8] Gibson, S. F. (1997). 3D chainmail: a fast algorithm for deforming volumetric objects. *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, 149-ff.
DOI: 10.1145/253284.253324
- [9] Kim, S. Y., Park, J., & Kwon, D. S. (2005). Real-time haptic rendering of a high-resolution volumetric deformable object in a collaborative virtual environment. *Advanced Robotics*, 19(9), 951-975.
DOI: 10.1163/156855305774307022
- [10] Park, J., Kim, S. Y., Son, S. W., & Kwon, D. S. (2002). Shape retaining chain linked model for real-time volume haptic rendering. In *Volume Visualization and Graphics, Proceedings. IEEE/ACM SIGGRAPH Symposium*, 65-72.
DOI: 10.1109/SWG.2002.1226511
- [11] Song, B. K., Oh, J. S., & Choi, S. B. (2014). Design of a new 4-DOF haptic master featuring magnetorheological fluid. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 843498.
DOI: 10.1155/2014/843498
- [12] Q. H. Nguyen, Y. M. Han, S. B. Choi & N. M. Wereley, (2007), "Geometry Optimization of MR Valves Constrained in a Specific Volume Using the Finite Element Method", *Smart Materials & Structures*, 16 (6), 2242-2252.
DOI: 10.1088/0964-1726/16/6/027
- [13] Lord Corporation, Lord Technical Data, <http://www.lordfulfillment.com>.
- [14] Y. M. Han & K. C. Jang. (2017). MR Haptic Device for Integrated Control of Vehicle Comfort Systems. *Journal of the Korea Convergence Society*. 8(12), 291-298.
DOI: 10.15207/JKCS.2017.8.12.291
- [15] M. G. Cho. (2018). Design of 3-Sectored Oxygen Chamber with Automatic Control Function based on Embedded System. *Journal of Convergence for Information Technology*, 8(3), 71-77.
DOI: 10.22156/CS4SMB.2018.8.3.071
- [16] K. T. Kim & K. J. Lee. (2017). Performance Evaluation and Analysis of Zero Reduction Codes for Effective Dimming Control in Optical Wireless Communications using LED Lightings. *Journal of Convergence for Information Technology*, 7(3), 97-103.
DOI: 10.22156/CS4SMB.2017.7.3.097
- [17] P. S. Shin, S. K. Kim & J. M. Kim. (2014). Intuitive Controller based on G-Sensor for Flying Drone. *The*

Society of Digital Policy & Management, 12(1),
319-324.

DOI: 10.14400/JDPM.2014.12.1.319

- [18] Y. J. Park. (2014). Using High Brightness LED Light Source Controller for Machine Vision. *The Society of Digital Policy & Management*, 12(4), 311-318.

DOI: 10.14400/JDC.2014.12.4.311

오 중 석(Oh, Jong-Seok)

[정회원]



- 2015년 8월 : 인하대학교 기계공학
학과(공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 공주대학교
기계자동차공학부 조교수
- 관심분야 : 제어, 동역학
- E-Mail : jongseok@kongju.ac.kr