한국기계가공학회지, 제21권, 제9호, pp. 98～104(2022.09) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 9, pp. 98～104(2022.09) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.09.098

양방향 동시 구동이 가능한 고유수용성 구동기의 설계

박희창*,**, 조용준*,***, 윤해룡*,#, 오장석*, 홍형길*, 강민수*, 박관형*, 송재복**,#

*한국로봇융합연구원 농업로봇자동화연구센터, **고려대학교 기계공학과,

***안동대학교 바이오ICT융합공학과

Design of the Proprioceptive Actuator Capable of Simultaneous Bidirectional Driving

Hui-Chang Park*,**, Yong-Jun Cho*,***, Hae-Yong Yun*,#, Jang-Seok Oh*,
Hyung-Gil Hong*, Min-Su Kang*, Kwan-Hyung Park* and Jae-Bok Song**,#

*Korea Institute of Robotics & Technology Convergence, **Dept. of Mechanical Engineering, Korea University, ***Dept. of Bio-ICT Engineering, Andong National University

(Received 31 July 2022; received in revised form 08 August 2022; accepted 26 August 2022)

ABSTRACT

Because a robot actuator is directly affected by the external force of the robot and accounts for the largest portion of the robot system weight, developing an optimized actuator suitable for each characteristic of the robot system is essential. Although there have been many developments and studies related to robot actuators in various industrial fields, lightweight and compact actuator designs that can control force are still lacking. In this study, a novel actuator module was developed, and its performance was verified experimentally. The structure and control of various robot systems can be optimized by utilizing the proposed actuator. It can be used for various tasks by sensing external force and through feedback control.

Keywords : Robot Actuator(로봇 구동기), Proprioceptive Actuator(고유수용성 구동기), Driving Mechanism(구동 메커니즘), Joint Module(관절 모듈)

1. 서 론

산업현장에서 작업의 효율을 높이고 안전한 작업을 가능하게하기 위해 다양한 로봇기술이 개발되고 적용되고 있다. 과거부터 로봇 기술은 생산 및 제조업 등의 현장에서 로봇을 활용한 자동화에 관한 연구가 주로 수행되었으나[1-3], 근래에는 서비스업, 농업, 의료업 등 사람과 로봇이 밀접하게 교류해야하는 현장에서도 활발하게 적용되고 있다[4-7]. 이처럼 로봇이 사람과 같은 공간에서 작업을 수행하기 위해서는 안전을 확보하는 것이 중요하며 이러한 연구의 일환으로 외력을 탐지(sensing)할 수 있는 기술[8], 탐지한 외력을 이용하여 제어적으로 안전성을 확보하는 기술[9,10], 그리고 로봇

Corresponding Author : hyyun@kiro.re.kr, jbsong@korea.ac.kr
Lead Author : huichang.park@kiro.re.kr
Tel: +82-54-820-2841, 2821 Fax: +82-54-820-2891

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 경량화하여 기구적으로 안전성을 확보[11]하는 기술 등 다양한 연구들이 수행되고 있다.

로봇의 구동기(robot actuator)는 로봇의 관절(joint)에 구성되어 로봇이 동작할 때 외부의 힘에 직접적인 영향을 받으며 로봇 시스템의 무게 중 가장 큰 부분을 차지하기 때문에 외력을 탐지하고 로봇 무게를 경량화하기 위해서는 로봇 시스템의 특성에 따라 최적화된 구동기의 개발이 필수적이다. 생산, 제조업에서는 산업용 협동로봇을 위해 안전한 관절 모듈(safe joint module)과 해당 기술이 적용된 다자유도 로봇 팔[12]이 연구되어 적용되고 있으며, 서비스업에서는 실내외에 적용 가능한 플랫폼으로 고유수용성 구동기(proprioceptive actuator)가 적용된 4족 보행 로봇이 연구되고 있다. 또한 의료업에서는 직렬 탄성 구동기(series elastic actuator)와 경량형 구동기 등이 적용된 재활치료용 웨어러블 로봇(wearable robot)[13]이 활발히 연구되고 있다. 이처럼 로봇의 구동기는 다양한 분야에서 많은 개발과 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 외력 탐지가 가능하고 하나의 구동축으로 서로 다른 방향의 구동을 가능하게 하는 양방향 고유수용성 구동기 구조를 제안하고자 한다. 제안하는 구조는 서로 다른 방향에 대해 유사한 작업이 필요한 로봇 시스템에서 구조 및 제어를 최적화할 수 있으며 외력을 탐지하여 피드백 제어를 통해 다양한 작업에 활용 할 수 있다.

2. 양방향 고유수용성 구동기

2.1 고유수용성 구동기

일반적인 전자기 구동기(electromagnetic actuator)는 높은 힘(토크) 출력을 위해 모터와 출력단 사이에 높은 기어비의 감속기가 구성된다. 또한 힘을 센싱(sensing)하는 메커니즘에 따라 감속기와 출력단 사이에 Fig. 1(a)처럼 적절한 강성의 토크 센서를 구성하거나 Fig. 1(b)처럼 탄성체와 각도센서를 구성하여 설계된다. Patrick M. Wensing의 연구[14]에서는 Fig. 1(c)처럼 높은 토크밀도를 가진 모터와 낮은 회전관성의 출력단 사이에 낮은 감속비의 감속기를 구성하는 것이 특징인 고유수용성 구동기를 Fig. 1(a),(b)의 일반적인 형태의 전자기

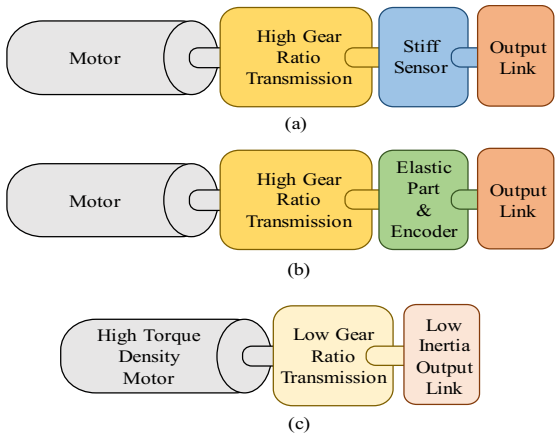


Fig. 1 Three different electromagnetic actuator concepts[14]: (a) High-ratio geared motor with torque sensor, (b) Series elastic actuator and (c) Proprioceptive force control actuator

구동기와 비교하여 고유수용성 구동기가 제시하는 새로운 패러디임(paradigm)을 서술하였다.

고유수동성 구동기는 동역학적 주요 특성인 토크 밀도(torque density), 에너지 효율(energy efficiency), 충격 완화(impact mitigation)를 고려하여 개발되었는데, 추가적인 힘/토크 센서 없이도 모터의 전류만을 활용하여 접촉을 통해 원하는 힘을 전달 할 수 있고, 낮은 기어비 덕분에 높은 역구동성(backdrivability)을 가진다. 이로써 충격 및 개방 루프 힘 제어(open-loop force control)를 다루는데 큰 이점이 있으며 구조화되지 않은 환경에 대응할 수 있는 고대역폭(high-bandwidth) 및 힘-임계 능력(force-critical capability)을 제공할 수 있다. 이러한 고유수용성 구동기의 특성을 활용하면 웨어러블 로봇, 보행 로봇, 주행 로봇 등 외력에 대해 상호적인 제어가 필요한 다양한 시스템을 효과적으로 구현할 수 있다.

본 논문에서는 고유수용성 구동기 설계 조건을 만족하는 새로운 형태의 구동기 구조를 제안하여 다양한 로봇 시스템에 적용하고 제어에 활용할 수 있도록 한다. Wensing의 논문[14]에 따르면 충격력을 최소화하고 대역폭을 최대화 하는 고유수용성 구동기의 특성을 갖기 위해서는 다음과 같은 설계 조건을 만족해야한다:

- 구동 반사 관성(reflected actuator inertia) 최소화
- 출력 링크의 무게 최소화
- 구동기의 컴플라이언스(compliance) 최소화

2.2 양방향 동시 구동 메커니즘

본 논문에서는 2단 유성기어(planetary gear) 구조를 이용해 하나의 구동축으로 다른 방향의 구동이 가능한 양방향 동시 구동 메커니즘을 제안한다. 유성기어는 Fig. 2와 같이 캐리어(carrier), 선기어(sun gear), 내접기어(planet gear), 링기어(ring gear)로 구성되는데 입력, 출력, 고정 부품의 조합에 따라 Table 1처럼 변속비, 회전 방향, 감가속 등에서 다양한 출력을 구현할 수 있다.

Table 1(d)와 (f)의 두 조합은 각각 선기어를 입력축으로 하고 캐리어와 링기어가 출력이 되도록 구성 되는데 이 두가지 조합을 2단으로 구성하면 Fig. 3처럼 하나의 입력축으로 다른 방향의 감속이 가능한 감속기어 시스템을 구성할 수 있게 된다. 이때, Table 1의 (d)와 (f) 두 조합으로 구성된 2단 유성기어가 동일한 기어비를 갖기 위해서는 다음과 같은 수식 (1)이 성립해야 한다.

Table 1 Output results according to the planetray gear combination.

	Ring gear	Carrier	Sun gear	Gear ratio	Output speed
(a)	Output	Driving (input)	Fixed	$\frac{Z_r}{Z_c}$	Increase
(b)	Driving (input)	Output	Fixed	$\frac{Z_c}{Z_r}$	Decrease
(c)	Fixed	Driving (input)	Output	$\frac{Z_s}{Z_c}$	Increase
(d)	**Fixed**	**Output**	**Driving (input)**	$\frac{Z_c}{Z_s}$	**Decrease**
(e)	Driving (input)	Fixed	Output	$-\frac{Z_s}{Z_r}$	Reverse Increase
(f)	**Output**	**Fixed**	**Driving (input)**	$-\frac{Z_r}{Z_s}$	**Reverse Decrease**
(g)	Fixed two parts			1:1	Direct
(h)	All Free			-	Neutral

Z_r : Number of teeth of ring gear
Z_c : Equivalent number of teeth of carrier
Z_s : Number of teeth of sun gear

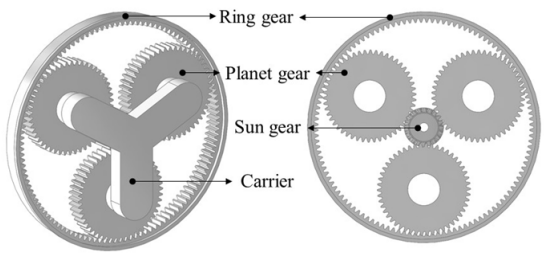


Fig. 2 Structure of the general planetary gear

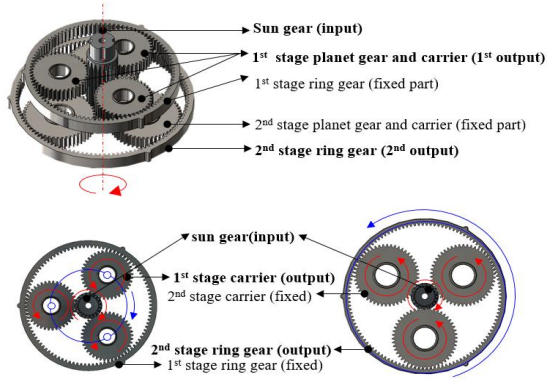


Fig. 3 Simultaneous bidirectional driving mechanism by two-stage planetary gears.

$$\frac{Z_{(d)c}}{Z_{(d)s}} = \frac{Z_{(f)r}}{Z_{(f)s}} \tag{1}$$

캐리어의 상당 잇수(Z_c)는 선기어의 잇수(Z_s)와 링기어의 잇수(Z_r)의 합과 같고 2단 유성기어의 입력축으로 동일한 선기어를 사용하기 때문에 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$Z_{(d)s} + Z_{(d)r} = Z_{(f)r} \tag{2}$$

따라서, 양방향 동시 구동이 가능한 고유수용성 구동기를 구현하기 위해서는 식 (2)와 2장 1절에서 서술한 고유수용성 구동기의 설계조건을 동시에 만족해야 한다.

2.3 양방향 고유수용성 구동기 모듈

2장 1절에서 서술한 고유수용성 구동기의 설계조건과 2장 2절에서 서술한 양방향 동시 구동 메커니즘을 만족하기 위해 제안하는 구동기 모듈은

Table 2의 특징을 갖는다.

제안하는 구동기 모듈은 역구동성을 높이고 구동 반사 관성을 최소화하기 위해 6:1의 기어비로 구성되었으며, 출력링크의 무게를 최소화하기 위해 와이어 구동 기반으로 설계되었다. 또한 유성기어와 베어링 구조를 적용하여 구동기의 컴플라이언스를 최소화하였다. 이 때, 양방향 동시 구동이 가능하기 위해서 식 (2)를 만족하는 2단의 유성기어가 구성되며, 이러한 구조에 적합하고 질량 대비 높은 출력을 낼 수 있는 외륜 회전형 로터 (Outer rotor type) 모터가 적용되었다.

제안하는 양방향 고유수용성 구동기 모듈의 구조는 Fig. 4(b)에서처럼 PCB board, 각도 센서, 모터의 로터와 스테이터, 다수의 베어링과 하우징 부품, 1단

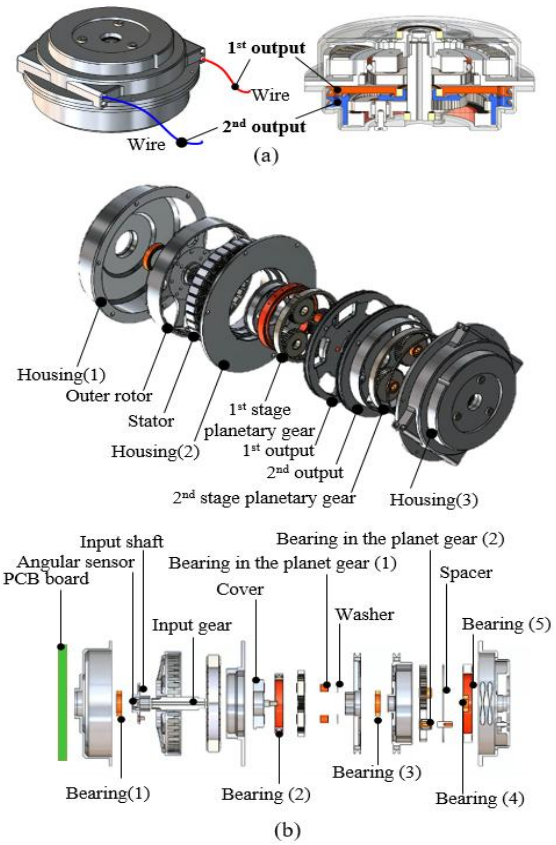
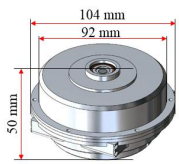


Fig. 4 Structure of the proposed bidirectional proprioceptive actuator : (a) cross section and (b) exploded view

Table 2 Characteristics of the proposed bidirectional proprioceptive actuator

Detailed characteristic	
Reducer type	Planetary gear (two-stage)
Gear ratio	6:1
Output link	Reel and wire (wire driven)
Motor type	Outer rotor type
Equation (2)	$Z_{1sun} + Z_{1ring} = Z_{2ring}$

Table 3 Specification of the proposed bidirectional proprioceptive actuator

Picture	Specification	
	Weight	770 g
	Size	Ø104 x 50mm
	Motor (24V)	U8 II (T-motor)
	Rated torque	6 Nm
	Max. torque	12 Nm
	Rated speed	365 rpm
	Max. speed	430 rpm

유성기어, 2단 유성기어 등으로 구성된다. 첫 번째 출력단의 릴(1st output)은 1단 유성기어의 캐리어에 결합되고 두 번째 출력단의 릴(2nd output)은 2단 유성기어의 링기어에 결합된다. 릴의 안쪽으로는 와이어가 고정될 수 있어서 Fig. 4(a)처럼 서로 다른 두 Wire를 출력링크로 하여 서로 다른 방향의 구동을 가능하게 하는 구동기 모듈로 활용할 수 있다.

본 논문에서는 위에서 서술한 특성 및 조건을 만족하는 양방향 고유수용성 구동기 모듈의 시제품을 제작하였으며 Table 3의 세부 사양을 갖는다. 제안하는 구동기 모듈은 회전속도 430rpm내에서 최대 토크 12Nm, 최대 장력 150N의 힘을 낼 수 있도록 설계되었으며, 770g의 가벼운 무게와 최대 직경 104mm, 최대 높이 50mm의 컴팩트한 크기로 제작되어 다양한 로봇 시스템에서의 활용성을 높였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험 환경 구성

본 논문에서 제안하는 구동기 모듈의 성능을 검증하기 위해 Fig. 5와 같이 실험 환경을 구성하였다. 구성된 실험 환경에서는 제안한 구동기의 서로 다른 두 출력 와이어(wire)의 양방향 동시구동 메커니즘과 두 출력 와이어의 최대 가용 길이를 확인할 수 있다. 또한 역회전에 필요한 물리적인 힘을 측정하여 역구동 성능을 확인할 수 있다. 간단한 모터제어를 위해 T-motor사의 모터 드라이버와 연결장치 및 소프트웨어가 사용되었다.

3.2 구동 메커니즘 검증

양방향 동시 구동 메커니즘 검증에 대한 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 두 출력 와이어의 표시점 변화를 통해 하나의 입력축이 구동될 때 서로 다른 두 출력 와이어가 동시에 동일한 길이만큼 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6(b)와 (c)에서 출력 와이어의 최대 가용 길이가 745mm임을 확인할 수 있다.

3.3 고유수용성 구동기 특성 검증

고유수용성 구동기의 특성 검증에 대한 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 모터가 구동되지 않는 상태에서 구동기의 출력단을 역구동(backdrive)하는데 필요한 최대 힘은 모터가 정지한 상태에서의 5.2N이었으며, 최소 힘은 Fig. 7(b)에서처럼 모터가 역구동 중일 때의 2.5N이다. 이 때, 와이어가 감겨있는 릴의 직경이 80mm임을 고려하면 출력단 기준 역구동 토크는 최대 0.4Nm, 최소 0.2Nm이며 최대 출력토크 12Nm와 비교했을 때 각각 3.3%, 1.6% 수준이다.

결과적으로, 제안하는 구동기 모듈은 약 530g의 힘만으로도 회전이 가능할 정도로 역구동성이 높으며 무게 대비 토크 효율이 높다. 이는 제안하는 구조에서 입력축과 함께 구성된 회전 부품들의 무게가 가볍고, 6:1의 낮은 기어비를 갖기 때문이며 회전관성이 최소화되어 고유수용성 구동기의 특성을 가지기 때문이다.

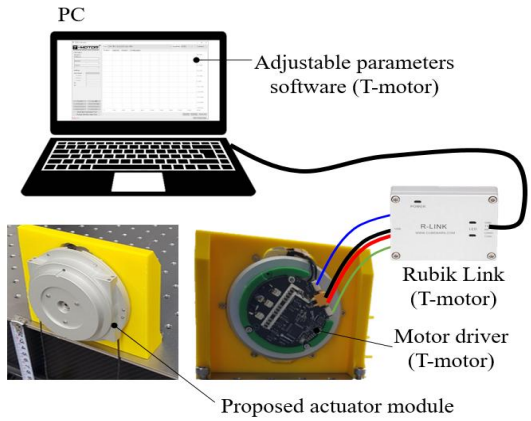


Fig. 5 Experimental setup

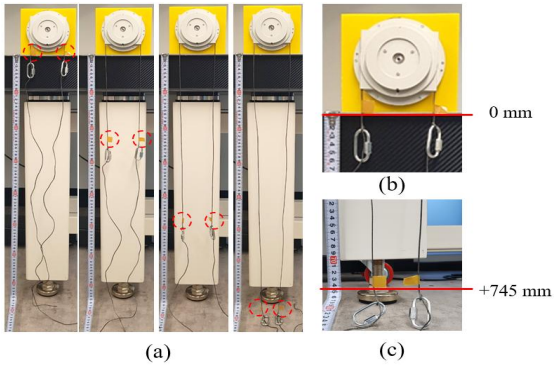


Fig. 6 Experimental results: verification of the simultaneous bidirectional driving mechanism

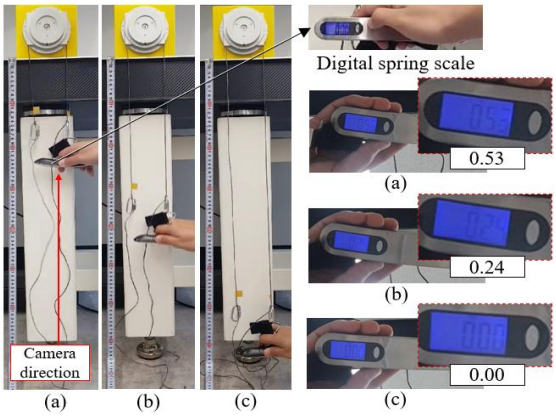


Fig. 7 Experimental Results: Verification of proprioceptive actuator characteristics (backdrivability)

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 로봇 시스템에 활용 가능한 새로운 형태의 고유수용성 구동기 구조를 제안하였다. 제안한 구조를 기반으로 구동기 모듈의 시제품을 개발하였고 실험을 통하여 성능을 검증하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 제안된 양방향 고유수용성 구동기 모듈은 하나의 입력축으로 양방향의 구동이 가능하므로 서로 다른 방향에 대해 유사한 작업이 필요한 로봇 시스템의 기구 및 제어를 단순화 할 수 있다.
2. 제안된 양방향 고유수용성 구동기 모듈은 작은 구동 반사 관성, 가벼운 출력 링크의 무게, 작은 컴플라이언스의 특성을 갖기 때문에 고유수용성 구동기로서 충격 및 힘 제어를 다루는 시스템에 이점이 있다.
3. 제안된 양방향 고유수용성 구동기 모듈은 770g의 가벼운 무게와 손바닥 크기의 작은 부피를 가지면서 무게 대비 높은 출력을 낼 수 있기 때문에 무게의 경량화가 중요한 로봇 시스템에서의 활용도가 높다.

향후에는 제안하는 구동기 모듈을 외력에 대해 상호적인 제어가 필요한 다양한 로봇 시스템에 적용하여 시제품을 개발하고 최적화된 제어를 구현하여 성능을 검증할 예정이다.

후 기

"본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업 및 첨단농기계산업화기술개발사업 의 지원을 받아 연구되었음(320028-03)."

REFERENCES

1. Park, C. H. and Park, K. T., "Design and Control of Industrial Dual Arm Robot", Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 11, pp. 58-65, 2008.
2. Lee, S. W., Park, J. W. and Park, S. S., "Master Arm and Control System for Teleoperated Bolting Robot", Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 185-193, 2013.
3. Hong, J. R., Jo, H. M., Chung, W. J., Park, S. K. and Noh S. H., "Implementation of a 2-axis Additional Axes Strategy on a 6-axis Articulated Robot for Improving Welding Process Efficiency", ournal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 6, pp. 55-62, 2017.
4. Kim, D. W., Hong, H. G., Cho, Y. J., Yun, H. Y., Oh, J. S., Kang, M. S., Park, H. C. and Seo, K. H., "Improvements to a Modular Agricultural Robot Platform for Field Work", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vo. 20, No. 10, pp. 80-87, 2021.
5. Wise, M., Ferguson, M., King, D., Diehr, E., and Dymesich, D., "Fetch & Freight : Standard Platforms for Service Robot Applications", Computer Science, 2016.
6. Paul, P. K., Sinha, R. R., Aithal, P. S., Ricardo Saavedra, Bashiru Aremu and Mewada, S., "Agricultural Robots: The Applications of Robotics in Smart Agriculture—Towards More Advanced Agro Informatics Practice", Asian Review of Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 38-44, 2021.
7. Holland, J., Kingston, L., McCarthy, C., Armstrong, E., D'Dwyer, P., Merz, F. and McConnell, M., "Service Robots in the Healthcare Sector", Robotics 2021, Vol.10, No.1, 47, 2021.
8. Kim, I. M., Kim, H. S. and Song, J. B., "Design of Joint Torque Sensor with Reduced Torque Ripple for a Robot Manipulator", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 10, pp. 1773-1779, 2012.
9. Cho, C. N. and Song, J. B., "Collision Detection Algorithm Robust to Model Uncertainty",

International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 776-781, 2013.

10. Lee, S. D. and Song, J. B., “Sensorless Collision Detection based on Friction Model for a Robot Manipulator”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 17, No. 1, pp. 11-17, 2016.
11. Park, H. C., Ahn, K. H., Min, J. K. and Song, J. B., “5 DOF Home Robot Arm based on Counterbalance Mechanism”, The Journal of Korea Robotics Society, Vol.15, No.1, pp.48-54, 2020.
12. Min, J. K., Ahn, K. H., Park, H. C. and Song, J. B., “A novel reactive-type joint torque sensor with high torsional stiffness for robot applications”, Mechatronics, Vol. 63, 2019.
13. Cho, H. J., “Assistance of a Person with Muscular Weakness Using a Joint-Torque -Assisting Exoskeletal Robot”, Applied Sciences 2021, Vol. 11, No. 7, 2021.
14. Wensing, P. M., Wang, A., Seok, S. G., Otten, D., Lang, J. and Kim, S. B., “Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah: Impact Mitigation and High-Bandwidth Physical Interaction for Dynamic Legged Robots”, 2017 IEEE Transactions on Robotics, Vol. 33, No. 3, pp. 509-522, 2017.