



2차원 와이어 구동식 중량물 권양 시스템을 위한 퍼지제어 기 설계

Design of Fuzzy Controller for a 2-Dimensional Wire-Driven Heavy Material Lifting System

이용찬* · 이형준* · 이연정†

Yong-Chan Lee, Hyeng-Jun Lee and Yun-Jung Lee†

*경북대학교 IT대학 전자공학부

†School of Electronics Engineering, College of IT Engineering, Kyungpook National University

요 약

본 논문에서는 중량물을 들어 올리는 작업자를 돕기 위한 2차원 와이어 구동식 중량물 권양 시스템과 퍼지제어기를 제안한다. 2차원 와이어 구동식 중량물 권양 시스템은 사람이 전체 제어루프에 포함된 인간지원시스템의 일종이다. 기존 인간 지원시스템 대부분의 제어 방식이 사용자의 특성을 고려하지 못하는 단점을 해결하기 위하여 물건을 들어 올리는 작업자의 힘을 덜어주어야 하는 요구조건과 사람의 작업 모션을 고려한 퍼지제어기 설계 방식을 제안한다. 실험을 통해 제안된 시스템의 2차원 작업 모션의 성능을 검증한다.

키워드 : 인간지원시스템, 인간-기계 동시제어, 중량물 권양, 근력 지원 시스템

Abstract

A fuzzy controller and a 2-dimensional wire-driven heavy material lifting system helping human operator are proposed in this paper. The 2-dimensional wire-driven heavy material lifting system is a kind of human-assistive systems in which a human is involved in the control loop. Most of the existing human-assistive control systems cannot consider human operator's characteristic. To consider human operator's characteristic, human's operating motion and requirement of reducing operator's force to lift a heavy material are considered in the design process of the proposed fuzzy controller. The performance of the proposed system is verified by experiments.

Key Words : Human-assistive device, Human-in-the-loop system, Heavy material lifting system, Power assist system.

Received: Mar. 17, 2015
Revised : Apr. 5, 2015
Accepted: Apr. 10, 2015
†Corresponding author(yjlee@ee.knu.ac.kr)

1. 서 론

의료 분야에서의 환자 이송작업, 물류 창고에서의 택배물 상차, 하차 작업, 공항에서의 수하물 운반 작업처럼 우리 주변에는 사람에 의해 수작업으로 중량물을 이동하는 경우가 많다. 이러한 작업은 물체가 무거운 경우가 많고 피로에 따른 작업자의 부상 위험, 물품의 파손 위험 또는 이송되는 환자의 부상 위험 등이 많다. 중량물 이동 작업의 특성 상 대부분의 경우 작업 위치가 고정적이지 않고 작업 환경이 규격화되기 어렵기 때문에 자동화 시스템, 화물이송 이동로봇[1, 2] 등이나 특정 위치에 고정된 시스템[3]의 적용이 어렵다.

이에 따라 작업자를 보조하여 작업자가 중량물을 보다 가볍고 빠르게 옮기는 것을 도와주는 로봇에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다. 기존에 연구된 중량물 이동 로봇을 형태에 따라 분류해보면, 크게 작업자가 몸에 기구를 착용하는 형태인 착용형 시스템과 별도의 착용 없이 사용 가능한 비착용형 시스템으로 분류할 수 있다. 착용형 시스템은 다시 탄성체를 이용한 PLAD(personal lift assistive device), 착용형 로봇 등으로, 비착용형 시스템의 경우 세부적으로 와이어형, 직렬링크형, 병렬링크형 등으로 분류할 수 있다. 착용형과 비착용형 시스템의 종류와 특징을 비교해보면 그림 1과 같다.

착용형 시스템의 경우 측정된 작업자의 힘, 근전도 신호 등을 이용하여 작업자의 의도를 파악하고 그에 따라 힘을 보조해주는 형태이며 착용 시 이동성에 장점이 있다. 하지만 착용하는 형태이므로 작업자의 신체적 조건에 따라 조정이 필요하며 PLAD의 경우 역동작에서 오히려 더 큰 힘을 필요로 하는 단점이 있고, 착용형 로봇의 경우 다관절의 복잡한 시스템이므로 고가이다. 그 외에 배터리 문제, 착용자가 느끼는 불편함 등 해결해야 할 문제점이 많다[4, 5].

이 논문은 2014년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 연구 결과임(No. 2012R1A1A2008856). 또한 이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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.

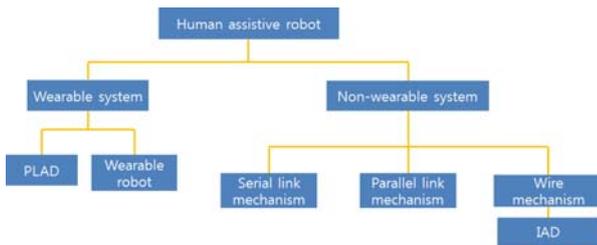


그림 1. 인간 지원 로봇의 분류
Fig. 1. Classification of human assistive robots

비착용형 시스템의 경우 착용형 시스템에 비해 시스템의 이동이 어려운 단점이 있으나, 작업자에 관계없이 사용이 용이한 장점이 있다. IAD(intelligent assist device) 시스템은 비착용형이며 와이어로 구동되는 인간지원시스템으로서 기구부 구조가 간단하며, 다른 형태의 시스템에 비해 작업 공간 효율이 우수하다. 구동 방식에 따라 작업자가 버튼 등의 입력을 통해 제어하는 방식이 있으며, 최근에는 핸들러, 센서 등 다양한 방법을 통해 작업자가 가하는 힘의 방향 및 크기를 측정하여 작업자의 의도를 파악하여 로봇과 작업자가 협업하는 형태의 시스템에 대한 연구도 활발히 진행 중이다^{6, 7}. 최근 연구된 비착용형 중량물 이동 시스템들을 살펴보면, Kazerooni 등은 개발한 핸들러를 사용하여 작업자의 힘을 측정해 의도를 파악하는 방식의 IAD 시스템을 제안하였으며⁸, Song 등은 로드셀 센서를 사용하여 자체 무게 측정이 가능한 알고리즘을 가지는 1차원 WHAD 시스템을 개발하였다⁹. 앞서 연구된 사례들을 살펴보면 작업자의 정확한 작업 의도 파악 및 중량물의 무게 측정, 자연스러운 모션 생성이 주된 연구의 목표임을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 작업 위치가 일정하지 않은 경우에도 쉽게 활용할 수 있는 와이어형 구조의 비착용형 시스템을 대상으로 연구를 진행한다. 또한, 기존 IAD 시스템과 달리 와이어에 로드셀 센서를 부착하여 별도의 핸들러 없이 맨손으로 직접 물체나 와이어 손잡이를 쥐고 조작이 가능하고, 기존의 인간지원시스템들이 1차원만의 힘을 보조해주는 것에 비해, 와이어만으로 2차원 이동이 가능한 중량물 권양 시스템에 대해 논하고자 한다. 앞으로 본 논문의 대상 시스템인 2차원 중량물 권양 장치를 WHAD-II(wire-driven human assistive device II)로 칭한다. WHAD-II 시스템은 작업자를 도와 중량물을 2차원으로 이동시키는 동작을 하므로, 전체 시스템은 제어 관점에서 살펴보면 중량물의 위치 및 속도를 WHAD-II 시스템이 사람과 함께 제어하는 형태인 Human-in-the-loop 제어시스템이다. 제어기 설계를 위해 WHAD-II 시스템의 기구학 파라미터들을 모델링하고 와이어의 길이 측정을 통해 중량물의 위치에 따른 와이어의 장력을 파악하며, 사람이 느끼는 중량물의 무게와 안정성을 고려하여 제어기를 설계한다.

본 논문은 먼저 전체 시스템 구성 및 WHAD-II 시스템 모델링에 대해 언급하고, 다음으로 제어시스템 설계를 다루며, WHAD-II 시스템의 성능 검증을 위한 실험과정을 소개한다. 마지막으로는 결론과 향후 과제에 대해 요약한다.

2. 전체 시스템 모델링 및 작업자 패턴

WHAD-II 시스템의 전체 개념도와 구성은 그림 2와 같다. 작업자는 시각 및 감각 정보를 통해 중량물의 최종 목표위치(p)와 중량물의 이동속도(v)를 인식하고, 중량물 이동을 위해 힘(F_h)을 물체

에 인가한다. 제어기는 중량물의 무게와 작업자의 힘이 포함된 와이어 장력(T_1, T_2)을 로드셀 센서를 통해 측정하고, 각 와이어의 길이(L_1, L_2)를 측정한다. 와이어 길이에 대한 장력의 크기와 작업자가 가한 힘의 크기와 방향(F_h)에 따라 중량물을 들어 올리는 액추에이터의 속도(v_{m1}, v_{m2})를 조절하는 방식으로 WHAD-II 시스템이 동작한다.

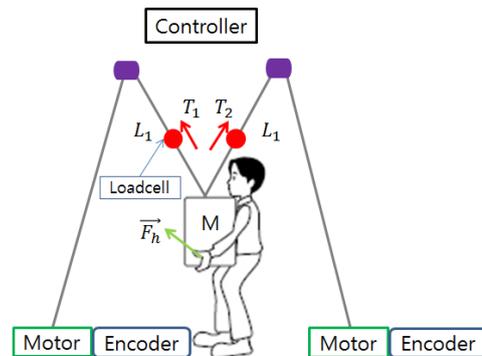


그림 2. 2차원 와이어 구동 인간지원시스템의 전체 개념도
Fig. 2. Schematic drawing of WHAD-II system

WHAD-II 시스템은 2개의 와이어가 병렬형태로 연결된 구조이다. 따라서 두 와이어의 길이가 변하면 P점에서의 중력방향 힘을 분배하여 장력이 변화하는 관계를 가진다¹⁰. 와이어의 연결 형태를 살펴보면 중량물이 연결되어 각 와이어의 장력이 유지될 경우 그림 3과 같은 삼각형 형태로 나타낼 수 있다. 양쪽 풀리 사이의 직선거리(d)는 시스템 설계 시 결정되는 값이다.

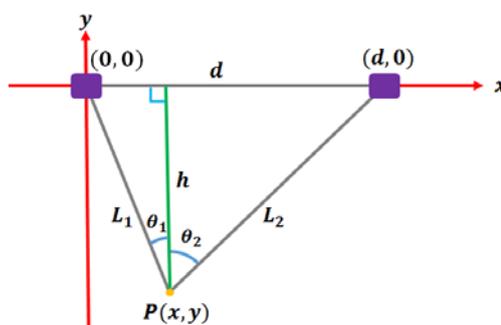


그림 3. 두 와이어 시스템의 기구학적 파라미터들
Fig. 3. Kinematic parameters of 2-wire system

위의 경우에 식 (1) ~식 (4)와 같이 P점의 좌표와 각 와이어의 길이 값인 L_1, L_2 와의 관계를 기구학, 역기구학 식을 통해 나타낼 수 있다. 이때, 구한 P점의 y 좌표 값의 크기는 그림 3의 h 에 해당하는 높이 값이고, h 값을 통해 식 (5)와 같이 각 와이어가 지면과 수직으로 이루는 각도 값의 \cos 결과인 $\cos\theta_1, \cos\theta_2$ 값을 구할 수 있다.

$$L_1^2 = x^2 + y^2 \tag{1}$$

$$L_2^2 = (d-x)^2 + y^2 \tag{2}$$

$$x = \frac{L_1^2 - L_2^2 + d^2}{2d} \tag{3}$$

$$y = \pm \sqrt{L_1^2 - \left(\frac{L_1 - L_2 + d^2}{2d}\right)^2} \quad (4)$$

$$\cos\theta_i = |y|/L_i = h/L_i, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

앞서 구한 식 (5)의 $\cos\theta_i$ 값으로부터 그림 4와 같이 중량물이 연결되어 있을 경우, 각 와이어에 걸리는 장력의 크기 관계를 구할 수 있다. 그림 4의 \vec{F}_h 는 작업자가 가하는 힘을 의미하고, \vec{F}_a 는 합력에 의한 힘을 의미한다. 이때, 작업자가 가하는 힘이 없고($\vec{F}_h = 0$), 중량물이 정지해있는 경우($\vec{F}_a = 0$), 식 (6)과 같이 중량물의 중력 가속도에 의한 힘(\vec{F}_g)과 두 와이어의 장력의 합에 의한 힘(\vec{F})의 합은 0이 된다. 힘 \vec{F} 는 식 (7)과 같이 벡터의 분해 성질을 이용하여 각 와이어에 걸리는 장력의 합으로 나타낼 수 있다. 지면에 수평방향으로 작용하는 힘의 성분은 없기 때문에 수평방향의 힘의 관계식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 WHAD-II 시스템은 두 개의 와이어가 병렬로 연결되어 있으므로 각 와이어의 길이에 따라 장력이 변화한다. 따라서 본 논문에서는 엔코더 센서를 통해 각 와이어의 길이를 작업 중 실시간으로 측정하여 와이어의 장력을 정확히 파악함으로써 작업자의 의도를 보다 정확하게 파악할 수 있도록 한다.

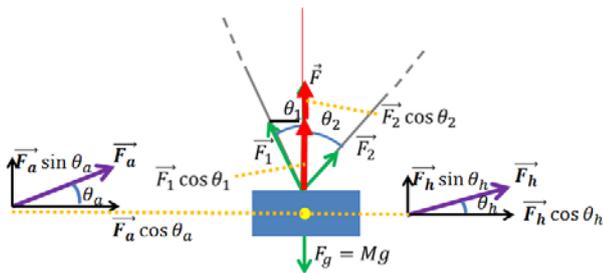


그림 4. 평형상태에서의 힘의 관계
Fig. 4. Force relationship in force equilibrium

$$\vec{F}_g + \vec{F} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_1 \cos\theta_1 + \vec{F}_2 \cos\theta_2 \quad (7)$$

$$\vec{F}_1 \sin\theta_1 + \vec{F}_2 \sin\theta_2 = 0 \quad (8)$$

작업자가 중량물을 2차원 공간에서 이동하는 패턴을 살펴보기 위해 3차원 모션 캡처 장비인 VICON을 사용하여 작업자가 5kg의 물체를 WHAD-II 시스템을 사용하지 않고 자연스럽게 2차원으로 이동하는 모션에 따른 중량물의 위치 데이터를 측정된 결과는 그림 5와 같다. 측정된 위치 패턴의 미분연산을 통해 얻은 수평속도와 수직속도의 패턴을 살펴보면(그림 6, 그림 7 참조), 수평속도 패턴과 수직속도 패턴의 경우 모두 최고 속도까지 증가하다가 최종 목표 위치에 도달하기 직전에 반대 방향으로 속도가 다시 증가하다가 정지하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 작업자가 중량물을 이동할 경우 마지막 순간에 중량물을 위에서 살짝 내려놓는 동작을 의미한다. 수평방향의 경우 최고속도가 약 0.2m/sec로 측정되었고 수직방향의 경우 약 0.25m/sec 정도이다. 실험에 사용된 중량물의 무게 5kg은 작업자가 WHAD-II 시스템을 사용하여 작업할 때, 무거운 중량물을 가볍게 느끼는 무게의 기준으로 사용한다. 본 실험에서 작업자의 중량물 이동 작업시간은 약 5초 정도이며, 최고 속도와 작

업시간 데이터는 4장에서 WHAD-II 시스템 성능 검증을 위한 실험 결과 데이터와 비교한다.

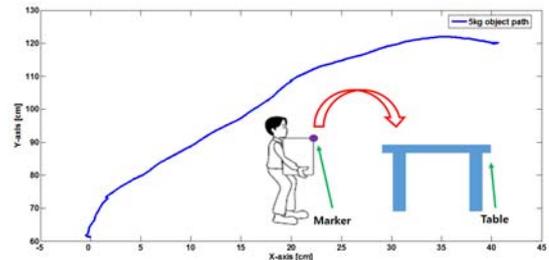


그림 5. 사람이 중량물을 들어 올릴 때의 위치 패턴
Fig. 5. Path pattern when lifting 5kg object

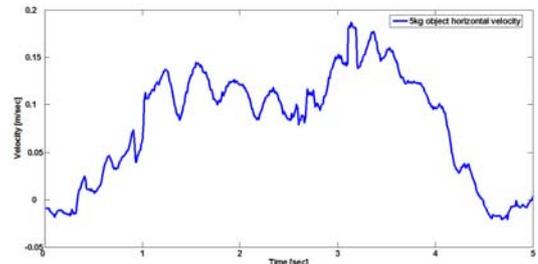


그림 6. 사람이 중량물을 들어 올릴 때의 수평속도 패턴
Fig. 6. A horizontal velocity pattern when lifting 5kg object

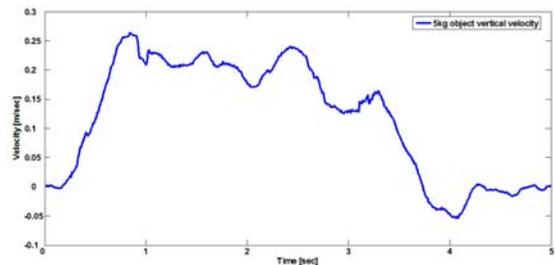


그림 7. 사람이 중량물을 들어 올릴 때의 수직속도 패턴
Fig. 7. A vertical velocity pattern when lifting 5kg object

3. 제어 시스템 설계

WHAD-II 시스템이 작업자와 협업하여 중량물 이동 작업을 수행하는 경우 작업자를 포함한 WHAD-II의 전체 제어기 구성은 그림 8과 같다.

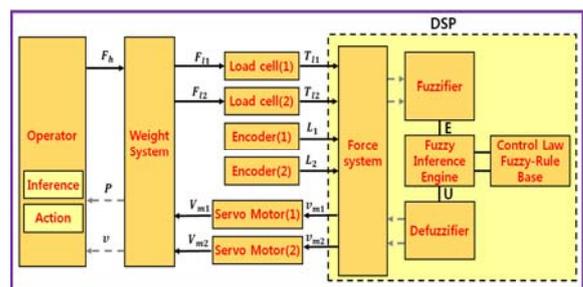


그림 8. WHAD-II 시스템 제어기 구조
Fig. 8. Architecture of control system in WHAD-II

먼저 작업자가 물체를 이동시킬 때 와이어에 연결된 로드셀 센서를 사용하여 각 와이어의 장력(F_{l1} , F_{l2})을 측정하고 엔코더 센서를 통해 각 와이어의 길이(L_1 , L_2)를 측정한다. 측정된 결과를 통해 중력방향의 가속도를 측정하고 물체의 무게 정보를 사용하여 작업자가 인가한 힘(F_h)을 계산한다. 제어기에서는 퍼지추론을 거쳐 작업자의 힘의 크기와 방향에 따라 작업자의 의도를 파악한 뒤, 각 액추에이터를 구동시키는 속도(v_{m1} , v_{m2})를 제어하기 위한 전압 값을 출력한다.

물체에 가하는 작업자 힘의 수직성분과 모터 출력의 수직성분의 합은 중력을 보상하고 물체를 지면에 수직인 방향으로 가속시키게 된다. 또한 지면에 수평방향인 힘의 성분의 합은 수평방향으로 물체를 가속시키게 된다. 적절한 제어를 통하여 모터의 출력 힘을 증가시키면 작업자는 원래보다 더욱 작은 힘으로도 동일하게 물체의 2차원 운동을 발생시킬 수 있다. 즉, 모터의 힘과 작업자의 힘은 상호 보완적인 관계를 갖게 되는데 이를 분석하면 수평방향의 경우 그림 9와 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며 수직방향의 경우 그림 10과 식 (10), 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 그림 10의 Gravity 성분은 작업자의 힘과 모터 출력의 합에 의해 물체의 무게와 상쇄되는 관계를 가지며, Inertial Force 성분은 중력이 상쇄된 후 물체를 가속시키는 힘을 의미한다.

$$F_h \sin \theta_h + F_{m1} \sin \theta_1 + F_{m2} \sin \theta_2 = Ma \sin \theta_a \quad (9)$$

$$F_h \cos \theta_h + F_{m1} \cos \theta_1 + F_{m2} \cos \theta_2 = Mg + Ma \cos \theta_a \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & (F_{h.g} \cos \theta_h + F_{h.acc} \cos \theta_h) + (F_{m1.g} \cos \theta_1 + \\ & F_{m1.acc} \cos \theta_1) + (F_{m2.g} \cos \theta_2 + F_{m2.acc} \cos \theta_2) \\ & = m_1 a \cos \theta_a + (M - m_1) a \cos \theta_1 + m_2 g + (M - m_2) g \quad (11) \\ & = (m_1 a \cos \theta_a + m_2 g) + ((M - m_1) a \cos \theta_1 + (M - m_2) g) \end{aligned}$$



그림 9. 수평성분 힘의 관계
Fig. 9. Relationship of horizontal force

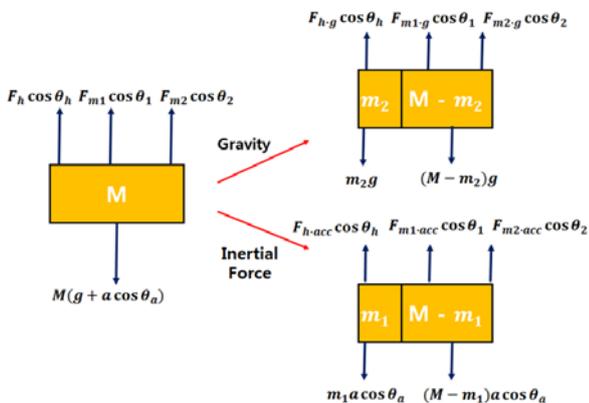


그림 10. 수직성분 힘 관계
Fig. 10. Relationship of vertical force

그림 9에서 a 는 합력에 의해 물체에 작용하는 가속도를 의미하고, $F_h \sin \theta_h$ 는 그림 4의 작업자의 힘 중 수평방향 성분의 힘을 나타낸다. $F_{m1} \sin \theta_1$ 는 좌측에 위치한 와이어가 지면에서 수직인 직

선과 이루는 각도가 θ_1 일 경우 와이어에 걸리는 장력 중 수평방향 성분의 힘의 크기를 나타내며 $F_{m2} \sin \theta_2$ 는 우측에 위치한 와이어가 수직선과 이루는 각도가 θ_2 인 경우 와이어에 걸리는 수평방향 성분의 힘의 크기를 나타낸다. 각각 물체의 수평방향의 힘의 관계를 살펴보면 작업자의 수평성분 힘과 각 와이어의 수평성분 힘의 합이 중량물에 작용하는 합력의 수평성분과 같아진다. 그림 10에서 m_1 과 m_2 는 각각, 작업자가 중량물에 대해 관성력에 의해 느끼는 질량, 중력에 의해 느끼는 질량의 크기를 나타낸다. $F_{m1} \cos \theta_1$, $F_{m2} \cos \theta_2$ 는 각각 왼쪽, 오른쪽 와이어에 걸리는 장력 중 수직성분의 크기를 나타낸다. Mg 는 중량물에 영향을 미치는 중력에 의한 힘, $M_a \cos \theta_a$ 는 최종적으로 중량물에 작용하는 합력 중 수직성분의 힘을 나타낸다. 이 중에서 사람이 가하는 힘의 크기는 $m_1 a \cos \theta_1$ 와 $m_2 g$ 이며 각 성분은 중량물의 합력, 중력보상에 연관되어있는 힘 성분이다. 이 경우 모터에 의해 발생하는 힘 성분 즉, 위의 식에서 $(M - m_1) a \cos \theta_1$, $(M - m_2) g$ 의 크기를 증가시키면 총 힘의 크기가 일정한 경우 작업자가 가하는 힘의 크기는 그만큼 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제어기 설계 시 앞선 사항을 고려하여 작업자가 중량물에 가해야 하는 힘의 크기가 감소하도록 한다. 하지만 힘의 크기가 과도하게 감소할 경우 작업자의 실수나 진동 등과 같은 외부 환경에 대해 시스템이 민감해져 안전에 문제가 있으므로 반복 실험을 통해 적절한 값을 선정한다.

다음으로 WHAD-II 시스템의 힘 관계를 고려한 퍼지 제어기에 대해 기술한다. 설계 시 사람의 힘(F_h)이 입력으로 가해지면 일차식의 관계를 가지는 출력(V_{m1} , V_{m2})이 생성되도록 한다. 추가적으로 다양한 제어 조건을 반영하기 위하여 WHAD-II 시스템 설계 시 다음의 경우를 고려하여 설계한다. 먼저, 사람이 발휘하는 힘은 기계처럼 일정한 힘을 유지하기 어려우므로 작업자가 중량물을 정지시키기 위해 힘을 일정하게 유지할 경우 와이어, 중량물, 시스템 기구부의 진동과 로드셀 센서의 노이즈 등에 둔감하도록 제어기를 설계한다. 다음으로, 과도한 힘이 입력될 경우 시스템의 안전성을 위해 중량물의 무게가 무겁게 느껴지도록(속도가 제한되도록) 설계한다. 퍼지 제어기는 위 3가지 특성을 구간별로 수식 형태의 표현이 가능한 TS(Takagi-Sugeno) 퍼지 방식을 사용하여 설계한다. 기본 설계는 작업자가 중량물에 가한 힘(F_h)에 비례하여 모터의 출력(V_{m1} , V_{m2})이 생성되도록 하고, 작업자의 힘이 설정한 안전속도의 출력에 대한 입력보다 크다고 판단될 경우에는 서보 모터의 속도 출력을 $V_{m.safe}$ 인 안전 속도의 크기로 제한한다. 안전 속도는 작업자가 5kg의 중량물을 자연스럽게 이동시키는 실험 결과를 바탕으로 정한다. 작업자가 어떤 무게의 중량물을 이동하더라도 5kg의 물체로 느끼며 작업할 수 있는 것을 목표로 설계한다. 그림 11은 작업자가 인가한 힘 정보의 입력함수에 따른 소속도를 나타낸다. 20 부분은 중량물에 힘이 가해지지 않는 상태이므로 제어기에서 출력을 생성하지 않는 구간이다. 이 부분의 소속도를 다른 부분의 소속도보다 넓게 설정함으로써 작업자가 힘을 가하지 않았을 경우에도 발생할 수 있는 노이즈, 외란 등에 시스템 출력이 둔감하도록 한다. 또, NB , NS , PS , PB 는 각각 작업자가 아래쪽으로 큰 힘, 작은 힘을 주었을 경우, 위쪽으로 큰 힘, 작은 힘을 주었을 경우의 입력 상태를 의미한다. NB 와 PB 구간에서는 작업자가 큰 힘을 주는 경우이므로 작업자의 안전을 고려하여 제어기에서 제한된 안전속도 이하로 출력을 생성한다. 또, NS 와 PS 구간은 작업자가 정상 범위의 힘을 내는 구간으로 작업자 힘에 비례한 출력을 제어기에서 생성한다. 앞서 설명한 조건을 고려하여 퍼지 속도제어기를 If/then

방식의 퍼지규칙으로 구성하였다(그림 12 참조). α , β 는 WHAD 제어기에서 제안한 상수 관계식을 이용하여 각각 7.15, -21.45의 값으로 정하고 안전 속도 $V_{m.safe}$ 는 약 0.3m/sec로 정한다. 선정된 파라미터의 상수 값들은 4장의 실험에서도 동일하게 한다. 입력에 대한 출력 관계 그래프는 그림 13과 같다. 입력과 출력 관계를 살펴보면 양쪽 방향의 최대 안전속도로 제한되어 있는 구간, 비례 구간 그리고 정지 구간이 있으며 각 구간들은 부드러운 형태로 연결되어 있다. 각 모터에는 동일한 퍼지 제어기가 별개로 사용되어 각 입력에 대해 독립적으로 출력을 생성한다.

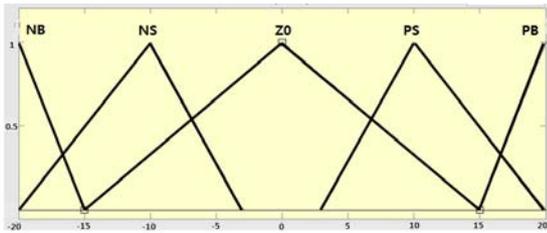


그림 11. 작업자의 힘 정보 입력함수에 대한 소속도
Fig. 11. The membership function for variable F_h

- Rule 1. If F_{h_i} is NB, then $v_{mi} = -V_m \cdot safe$.
- Rule 2. If F_{h_i} is NS, then $v_{mi} = \alpha F_{h_i} + \beta$.
- Rule 3. If F_{h_i} is ZO, then $v_{mi} = 0$.
- Rule 4. If F_{h_i} is PS, then $v_{mi} = \alpha F_{h_i} - \beta$.
- Rule 5. If F_{h_i} is PB, then $v_{mi} = V_m \cdot safe$.

그림 12. WHAD-II 시스템 제어기의 퍼지규칙
Fig. 12. Fuzzy rules for WHAD-II system controller

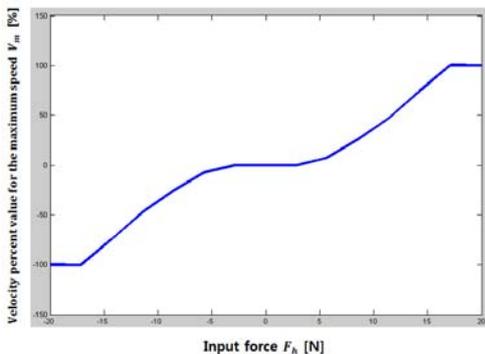


그림 13. WHAD-II 제어기의 입 · 출력 관계
Fig. 13. Input versus output of WHAD-II controller

4. 실험 및 결과

이 장에서는 본 논문에서 제안한 중량물 권양을 위한 2차원 와이 어 구동형 인간지원시스템의 성능을 평가한다. 그림 14는 실험에 사용된 WHAD-II 시스템의 기구부 구성과 서보모터 및 서보 드라이 버의 구성을 나타낸다. 기구부는 양쪽의 와이어에 연결되어있는 무 게 측정용 로드셀 센서와 액추에이터로 사용된 서보모터, 중량물과 모터를 연결해주는 와이어와 지지대, 전원 제어반 등으로 구성된다. 시스템의 워크스페이스는 그림 15를 참고한다. 실험은 작업자가 중 량물을 초기 위치에서 특정 위치까지 자연스럽게 올려놓는 동작을

가정하고 진행한다. 실험에서 사용된 중량물의 무게는 25kg이며 작 업자는 중량물을 2차원의 워크스페이스 내에서 중량물을 위치나 이 동방향에 관계없이 이동시키는 동작을 한다.

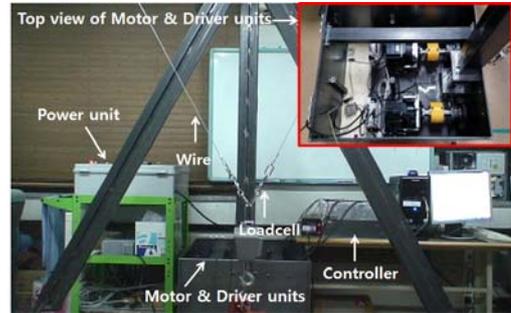


그림 14. WHAD-II의 이미지
Fig. 14. Image of WHAD-II

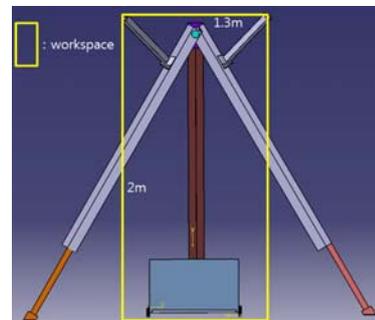


그림 15. WHAD-II의 워크스페이스
Fig. 15. Workspace of WHAD-II

WHAD-II 시스템 구동에 필요한 기구부 및 제어부 구성품의 제 원은 표 1과 같다.

표 1. WHAD-II의 제원
Table 1. Parameters of WHAD-II components

Component	Specification
Main Processor (DSP)	<ul style="list-style-type: none"> • TMS320F28335 • 32bit integer C28X Core + FPU • 150MHZ / 150MMAC / 300MFLOPS • RAM: 68KByte / Flash: 512KByte
Force Sensor (loadcell)	<ul style="list-style-type: none"> • CDFS-100 • Standard Force Range: 100kg(980N) • Combined error: 0.5%
Actuator	<ul style="list-style-type: none"> • SGMP5-08A2AH76C • Rated Output: 750W, Power Supply Voltage: 200VAC • Max. Speed: 6000rpm, Rated, Speed: 3000rpm • Instantaneous Peak Torque: 5.4Nm • Rated Torque: 2.39Nm • Serial Encoder: 17bit absolute • Option: Holding break(24VDC)
SMPS	<ul style="list-style-type: none"> • 1CH: 24V/1.5A (for holding break) • 4CH: 5V/10A, 12V/4.2A, 12V/4.2A, 24V/2.5A (for motor, loadcell and control unit)

다음으로 물체의 위치 측정을 위한 와이어 길이 측정 실험에 대해 나타낸다. 그림 16은 물체의 위치에 따른 와이어 장력 변화를 위해 중량물을 위쪽, 아래쪽, 왼쪽, 오른쪽 방향으로 각각 이동시키며 엔코더 센서를 통해 양쪽의 와이어 길이를 측정된 결과를 나타낸다. 엔코더 센서는 서보모터에 부착된 17bit 절대치 엔코더를 사용한다. 와이어의 길이는 그림 3의 L_1 , L_2 와 같으며, A와 B는 각각 왼쪽, 오른쪽 와이어를 의미한다. 결과 그래프를 살펴보면 초기에는 길이가 약 127cm, 134cm로 길이를 유지하고 있으며, 물체의 위치에 따라 와이어의 길이 변화가 측정되는 것을 확인할 수 있다.

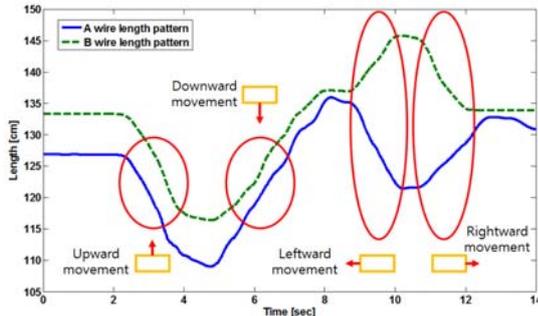


그림 16. 와이어 길이 변화 측정 실험 결과
Fig. 16. Experimental result of wire length changes

WHAD-II 시스템의 성능 검증을 위해 작업자가 2차원 작업 공간 내에서 25kg의 중량물을 WHAD-II 시스템을 사용해 들어 올리는 동작을 실험한 중량물 위치 패턴 결과를 그림 17에 나타낸다.

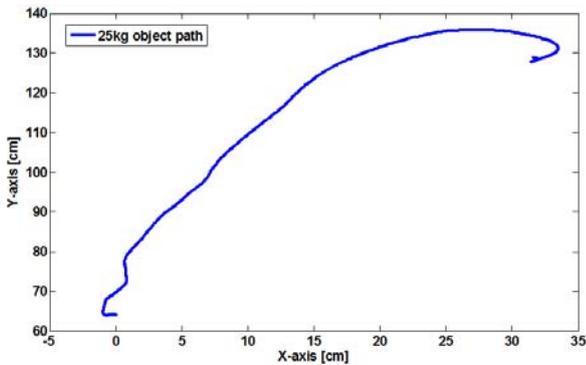


그림 17. 25kg 중량물 권양 위치 패턴
Fig. 17. Path pattern when lifting 25kg object

실험 결과를 살펴보면, 작업자가 WHAD-II 시스템을 사용하지 않고 자연스럽게 5kg의 중량물을 2차원으로 들어 올리는 패턴과 유사한 위치 패턴 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 WHAD-II 시스템을 사용하더라도 작업자가 원하는 위치로 자유롭게 중량물을 2차원 이동시킬 수 있음을 나타낸다. 위 그래프에서 Y 축은 중량물의 상단 즉, 와이어와 중량물이 연결된 위치를 기준으로 한다. 위치 패턴을 미분 연산하여 수평방향과 수직방향의 속도 패턴을 구한 결과를 그림 18과 그림 19에 나타낸다.

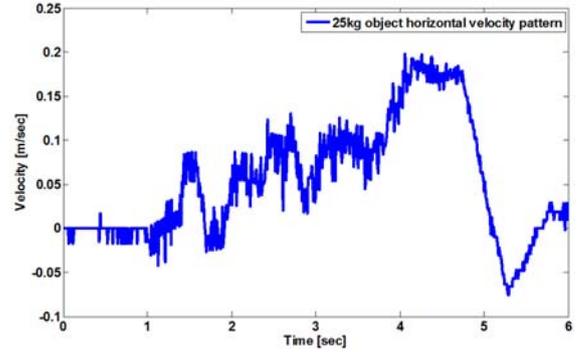


그림 18. 수평방향 속도 패턴

Fig. 18. A horizontal velocity pattern when lifting 25kg object

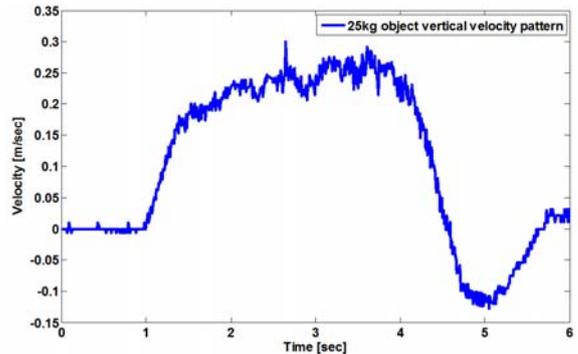


그림 19. 수직방향 속도 패턴

Fig. 19. A vertical velocity pattern when lifting 25kg object

결과를 살펴보면 수평방향과 수직방향 모두 5kg의 중량물을 작업자가 자연스럽게 이동시킨 패턴과 유사한 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 수평방향의 경우 속도가 증가하는 패턴을 나타내다 최종 목표에 도달하기 직전 반대 방향으로 감소하는 패턴을, 수직방향의 경우에도 유사하게 최고 속도까지 증가하여 반대방향으로 속도가 증가하다 정지하는 형태를 나타낸다. 최고속도도 수평방향의 경우 약 0.2m/sec, 수직방향의 경우 약 0.25m/sec로 5kg의 중량물을 WHAD-II 시스템의 사용 없이 이동시킨 결과(그림 6, 그림 7 참조)와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 결과를 살펴보면 속도 값이 미세하게 진동하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 위치 패턴을 미분연산하며 생긴 오차, 엔코더 측정 오차 등으로 인한 결과이다.

작업자가 실제로 WHAD-II 시스템을 사용하여 중량물 이동 작업을 할 경우 작업자가 느끼는 힘의 크기에 대한 결과를 그림 20에 나타낸다. 작업자는 실제 25kg의 중량물을 작업하지만 WHAD-II 시스템을 사용한 작업자는 이보다 적은 힘을 느끼며 작업 하게 된다. 각 와이어의 길이에 따른 기준 장력에 대해 측정되는 로드셀 센서의 값과의 연산을 통해 실제로 작업자가 느끼는 힘의 크기를 측정한다. 측정된 결과를 살펴보면 중력방향으로 작업자가 약 50N의 힘의 크기로 무게를 느끼는 것을 확인할 수 있다. 최대로 작업자가 힘을 느끼는 경우 100N, 약 10kg의 무게로 중량물을 느끼게 되는데, 이는 중량물 진행 방향의 반대 방향으로 작업자가 힘을 주는 부분이므로 더 큰 힘으로 무게를 느끼게 된다. 또한 마지막 구간도 반대 방향이므로 최대 150N까지 큰 힘을 느끼게 되는 것을 확인할 수 있다.

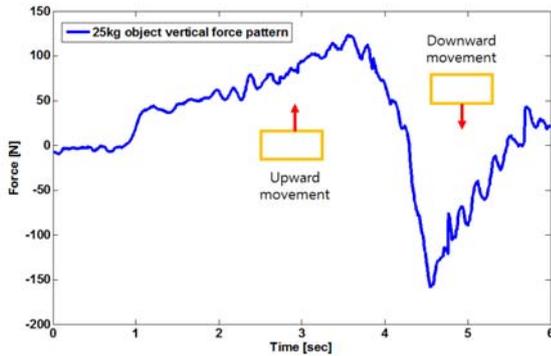


그림 20. 작업자 중력방향 힘 패턴
Fig. 20. Operator's gravitational force pattern

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 기존의 2차원으로 작업자가 중량물을 들어 올리는 작업을 보조하기 위한 2차원 와이어 구동식 인간지원시스템에 대한 퍼지제어기 설계 및 시스템 모델링 방식을 소개하였다. 와이어에 연결된 2개의 로드셀 센서를 통해 각 와이어의 장력 측정과 와이어의 길이 관계로부터 작업자의 힘을 측정하여 작업 의도를 파악하였으며, 와이어가 병렬로 연결된 형태이기 때문에 중량물을 목표 위치까지 보다 신속하고 부드럽게 이동시킬 수 있는 장점이 있다. 시스템 모델링에서는 와이어의 길이에 따른 장력 관계를 실시간으로 파악하였으며 퍼지 제어를 통해 안전을 위한 속도 제한 제어, 힘에 비례한 속도 제어, 정지 제어의 제어 목적을 달성할 수 있었다. 또, 실험을 통해 WHAD-II 시스템을 사용하지 않았을 경우와 유사한 패턴으로 작업자가 자연스럽게 2차원 중량물 이동 작업이 가능함을 확인하였다.

앞으로, WHAD-II 시스템을 사용할 경우 중량물의 무게를 자체적으로 측정할 수 없는 문제, 기구부의 마찰과 진동 문제 등은 추가로 연구되어야 할 부분이다.

References

- [1] S. Woo, K. Jung, J. Kim, J. Park, and S. Kim, "Velocity Control Method of AGV for Heavy Material Transport," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 394-399, 2010.
- [2] D. Jeong, J. Park, and Y. Kim, "Study on Design of Mobile Robot for Autonomous Freight Transportation," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 202-207, 2013.
- [3] S. Garrido, M. Abderrahim, A. Giménez, R. Diez, and C. Balaguer, "Anti-Swinging Input Shaping Control of an Automatic Construction Crane," *IEEE Transactions Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 549-557, 2008.
- [4] H. D. Lee, S. N. Yu, S. H. Lee, J. S. Han, and C. S. Han, "Development of Human-Robot Interfacing Method for Assistive Wearable Robot of the Human Upper Extremities," *Proceedings of SICE Annual Conference*, pp. 1755-1760, 2008.
- [5] C. A. Lotz, M. J. Agnew, A. A. Godwin, and J. M. Stevenson, "The Effect of an On-Body Personal Lift Assist Device (PLAD) on Fatigue During a Repetitive Lifting Task," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 19, pp. 331-340, 2009.
- [6] J. E. Colgate, M. A. Peshkin, and S. H. Klostermeyer, "Intelligent Assist Devices in Industrial Applications: a review," *Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, 2003.
- [7] D. Surdilovic, R. Bernhardt, and L. Zhang, "New intelligent power-assist systems based on differential transmission," *Robotica*, vol. 21, pp. 295-302, 2003.
- [8] H. Kazerooni, D. Fairbanks, A. Chen, G. Shin, "The Magic Glove", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 757-763, 2004.
- [9] B. W. Song, H. D. Seo, and Y. J. Lee, "Operator Modeling and Design of Fuzzy Controller for a Wire-Driven Heavy Material Lifting System," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 23, no. 5, pp. 436-443, 2013.
- [10] C. Gosselin, P. Ren, and S. Foucault, "Dynamic Trajectory Planning of a Two-DOF Cable-Suspended Parallel Robot," *Proceedings of Robotics and Automation Conference*, Minnesota, USA, 2012.

저 자 소 개



이용찬 (Yong-Chan Lee)

2013년: 경북대학교 전자공학부 공학사
2015년: 경북대학교 전자공학부 석사
2015년~현재: 경북대학교 대학원
전자공학부 박사과정

관심분야 : 지능 제어, 임베디드 시스템, 서비스 로봇
E-mail : leeyc@knu.ac.kr



이형준 (Hyeng-Jun Lee)

2014년: 경북대학교 전자공학부 공학사
2014년~현재: 경북대학교 대학원
전자공학부 석사과정

관심분야 : 지능 제어, 임베디드 시스템, 서비스 로봇
E-mail : hjlee2145@ee.knu.ac.kr



이연정 (Yun-Jung Lee)

1984년 : 한양대학교 전자공학과 공학사

1986년 : 한국과학기술원 전기 및 전자
공학 석사

1994년 : 한국과학기술원 전기 및 전자
공학 박사

1995년~현재 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수

관심분야 : 생체모방 로봇, 서비스 로봇, 지능 제어, 임베디드 시스템

E-mail : yjlee@ee.knu.ac.kr