

다중 케이블 기반 평면형 자세제어, 하중계측 시스템 개발

Development of a Planar Cable Suspension and Balance System

박 금 용¹, 한 재 흥², 성 열 훈^{3,*}
 (Keum-Yong Park¹, Jae-Hung Han², and Yeol-Hun Sung^{3,*})

¹Agency for Defense Development (ADD)

²Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

³School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH)

Abstract: This study introduces a multi-purpose planar cable suspension and balance system, capable of controlling an end effector across a wide workspace via four cables and measuring external loads through cable tension. Designed using cable-driven parallel robot theory, the system's performance was evaluated experimentally. Kinematic calibration enhanced motion control, while an artificial neural network improved load measurement performance. The system's versatility and high precision provide a foundation for future research.

Keywords: Cable-driven parallel robot, cable suspension and balance system, kinematic calibration, artificial neural network

I. 서론

병렬형 케이블 로봇(cable-driven parallel robot, CDPR)은 복수의 케이블을 활용하여 엔드 이펙터를 제어하는 병렬 로봇의 일종으로, 비교적 넓은 작업 공간, 높은 페이로드 대 중량비 및 우수한 동적 특성 등의 장점을 가진다[1]. 전세계적으로 화물운반, 건설, 시뮬레이터, 방송, 전파망원경 등 다양한 분야에 활발히 응용되고 있으며[1-7], 국내에서도 산업용 및 학술연구 목적의 몇몇 개발 사례가 보고되고 있다[8-11].

대부분의 경우 엔드 이펙터의 단순 지지 또는 자세제어를 통한 활용에 초점을 두고 있지만, 더 나아가 케이블로 구동된다는 특성으로부터 비행체 풍동시험 시 발생하는 기계적 지지장치에 의한 공기역학적 간섭현상을 저감할 수 있어 고전적인 풍동시험의 한계를 극복하기 위한 대안으로 제시되는 등[6,7], 정밀 하중측정이 요구되는 분야에서의 활용도 연구되고 있다. 국내의 경우 이러한 목적의 병렬형 케이블 로봇은 국방과학연구소에서 개발된 것이 유일한 사례로 알려져 있으나[11], 기관 특성상 일반 목적의 접근 및 활용이 제한된다.

본 연구에서는 전문인력 양성교육 및 기초 연구에의 적용을 위하여 정밀 자세제어 및 하중계측이 동시에 가능한 다목적 평면형 케이블 로봇을 개발하였다. 선행연구를 통해 개발된 서브시스템[12,13]을 통합하여 전체 시스템을 구성하였으며, 성능평가 및 교정을 통해 향후 학술 연구에 응용 가능한 수준의 제어·계측 정밀도를 확보하였다.

개발된 케이블 로봇은 엔드 이펙터 지지, 자세제어 및 하

중계측이 동시에 가능하다는 특징을 갖기 때문에 평면형 CSBS(planar Cable Suspension and Balance System)라고 명명하였다. 케이블 기반의 로봇 시스템은 최근 가상현실 햅틱장치나 우주분야 제사용 발사체 회수장치에 제안되는 등[14] 첨단산업 분야로 그 영역을 넓혀가고 있는 만큼, 개발된 CSBS의 다기능성 및 본 연구를 통해 획득한 기반 기술은 국내 케이블 로봇 저변 확대에 밑거름이 될 것이다.

II. 평면형 케이블 로봇 개발

1. 하드웨어 설계

그림 1은 본 연구에서 개발된 평면형 CSBS의 개략도로, 4개의 케이블을 이용하여 엔드 이펙터에 해당하는 시험모델의 위치/자세를 제어하도록 구성하였으며, 이 때 마찰력, 관성력 등 제어, 계측에 방해가 되는 요소들을 최소화할 수 있

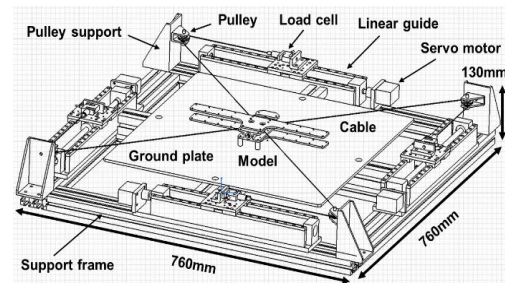


그림 1. 평면형 CSBS 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of the planar CSBS.

* Corresponding Author

Manuscript received July 7, 2025; revised November 14, 2025; accepted December 4, 2025

박금용: 국방과학연구소 수석연구원(peccoom@add.re.kr, ORCID[®] 0009-0004-2548-4977)

한재흥: 한국과학기술원 항공우주공학과 교수(jahunghan@kaist.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-5311-9855)

성열훈: 한국기술교육대학교 기계공학부 조교수(yhsung110@koreatech.ac.kr, ORCID[®] 0009-0002-0424-4099)

※ 이 논문은 2023년도 한국기술교육대학교 신입교원 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00515354).

도록 전체적인 형상을 설계하였다.

모델과 연결된 케이블의 길이 및 속도를 독립적으로 제어하기 위하여 단축 이동 정밀도 RMSE (Root Mean Square Error) 0.02mm의 정밀 선형구동기 4개가 활용되었다. 높이방향으로의 케이블 처짐을 방지함과 동시에, 모델의 평면상 자유로운 움직임을 구현하기 위하여 모델 하부에는 Ground plate와 접촉을 위한 테프론 소재의 다리 4개를 부착하였으며, Ground plate 표면 또한 매끄럽게 정밀 가공되었다.

CSBS의 하중계측 기능 확보를 위하여, 그림 2와 같이 각 선형구동기 동작부에 케이블 장력을 측정하기 위한 정격하중 30kgf의 단축 로드셀을 장착하였다. 로드셀에 연결된 케이블은 그림 1과 같이 방향 전환을 위한 도르래를 경유해 시험모델에 위치한 4개의 회전 조인트에 연결된다.

로드셀의 하중 방향과 케이블 장력 방향이 일치하도록 도르래 위치를 설계하였으며, 도르래 직경은 회전 관성력을 줄임과 동시에 모델 위치 변화에 따른 케이블-도르래 교차점 위치 변화를 최소화하기 위하여 가능한 작도록 설계하였다. 도르래 회전 시 마찰력 최소화를 위하여 회전축에 베어링을 적용하였으며, 케이블은 인장강도, 강성 등을 종합적으로 고려하여 직경 1mm의 스틸 소재를 선정하였다.

지지구조물, 선형구동기 등 케이블 구동과 모델 제어를 위한 주요 서브시스템들은 본 연구진의 선행연구를 통해 개발되었으며, 각 구성품에 대한 시험 결과 통합 시스템 구축을 위한 성능을 만족함을 확인하였다[12,13].

2. 자세제어 시스템

본 연구에서 고려한 평면형 CSBS의 간략화된 모델링은 그림 3과 같으며, 케이블 벡터($\mathbf{L}_i$)는 도르래 위치 벡터($\mathbf{A}_i$), 모델 위치 벡터($\mathbf{P}$), 모델 내 케이블 연결 위치 벡터($\mathbf{b}_i$)를 이용하여 식 (1)과 같은 벡터 관계식으로 표현될 수 있다. 이때 $\mathbf{L}_i$, $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{P}$ 는 지면 고정 좌표계(ground-fixed, X-Y)에서, $\mathbf{b}_i$ 는 모델 고정 좌표계(body-fixed, x-y)에서 정의되며, $\mathbf{R}$ 은 두 좌표계 사이 회전변환행렬을 의미한다.

$\mathbf{A}_i$, $\mathbf{b}_i$ 는 CSBS와 모델의 설계 형상으로부터 결정되므로, 모델의 위치 및 자세에 따른 케이블 길이를 계산할 수 있다. 본 연구의 경우 4개의 도르래는 660×660mm의 정사각형 모서리에, 모델 내 케이블 연결 조인트는 120×40mm 직사각형 모서리에 위치한다. 이러한 실제 수치를 반영한 행렬을 식 (1)에 같이 제시하였으며, 이 때 $\mathbf{P}$, $\mathbf{R}$ 행렬을 구성하는 X, Y, ψ 는 모션 캡처 시스템으로부터 획득된 모델의 위치/자세 정보로 II-4절에서 상세히 기술한다.

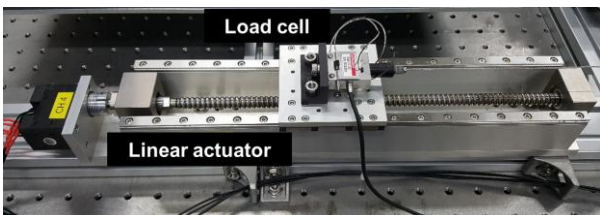


그림 2. 케이블 장력 측정용 로드셀이 장착된 선형구동기.

Fig. 2. Load cell installed at linear actuator for measuring the cable tension.

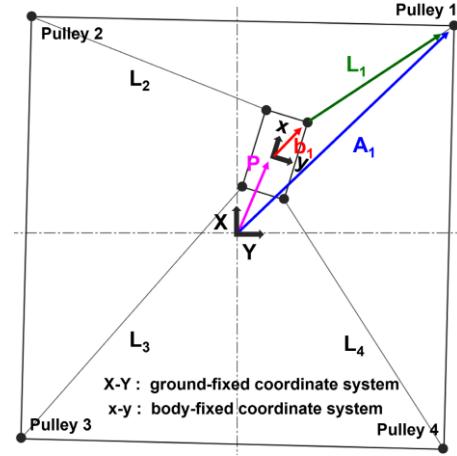


그림 3. 평면형 CSBS 기구학.

Fig. 3. Kinematics of the planar CSBS.

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{A}_i - \mathbf{P} - \mathbf{R}\mathbf{b}_i \quad (1)$$

$$\text{where } \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 330 \\ 330 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 330 \\ -330 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -330 \\ -330 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -330 \\ 330 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} 60 \\ 20 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 60 \\ -20 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -60 \\ -20 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -60 \\ 20 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}$$

또한 케이블은 인장력이 주어진 상태에서만 지지 구조물로서 기능할 수 있다는 특성상, 과도한 인장력 작용 혹은 장력 상실을 방지하기 위하여 각 케이블의 속도 역시 적절히 제어되어야 한다. 각 케이블의 속도($\dot{\mathbf{L}}$)는 역기구학으로부터 모델의 속도($\dot{\mathbf{Q}}$)와 CSBS의 자코비안(Jacobian, $\mathbf{J}$) 행렬을 이용하여 식 (2)의 관계로부터 계산 가능하다[15,16].

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{L}} \quad (2)$$

3. 하중계측 시스템

모델에 작용하는 외력은 케이블 장력에 의한 외력($\mathbf{F}_{\text{cable}}$)과 그 외의 외력($\mathbf{F}_{\text{ext}}$)으로 구분될 수 있으며, 모델이 정적평형 상태에 있을 때의 평형방정식은 식 (3)과 같다. 이 때 $\mathbf{F}_{\text{ext}} = [F_x \ F_y \ M]^T$, $\mathbf{F}_{\text{cable}} = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]^T$ 이며, T_i 는 i 번 케이블에 작용한 장력으로 그림 2의 로드셀로 계측된다. $\mathbf{W}$ 는 케이블 장력에 의한 하중을 3자유도 힘과 모멘트로 변환하는 역할을 하는 렌치 행렬(Wrench matrix)로, 케이블의 단위 방향벡터 $\mathbf{d}_i$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{ext}} + \mathbf{W}\mathbf{F}_{\text{cable}} = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 & \mathbf{d}_2 & \cdots & \mathbf{d}_4 \\ \mathbf{R}\mathbf{b}_1 \times \mathbf{d}_1 & \mathbf{R}\mathbf{b}_2 \times \mathbf{d}_2 & \cdots & \mathbf{R}\mathbf{b}_4 \times \mathbf{d}_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

렌치 행렬은 CSBS 형상 및 모델 자세에 의해 결정되므로, 모델에 작용하는 추가적인 외력은 케이블의 인장력 변화를 계측함으로써 계산할 수 있다.

한편, 가상일의 원리로부터 CSBS에서 자코비안 행렬과 렌치 행렬 사이의 관계를 식 (5)와 같이 유도할 수 있으며[16], 일반적으로 계산이 복잡한 자코비안을 비교적 간단히 얻을 수 있으므로 본 연구에서 식 (2)에 의해 케이블 속도를 계산하는데 활용하였다.

$$\mathbf{J}^{-1} = -\mathbf{W}^T \quad (5)$$

4. 통합 시스템 구성

앞서 소개된 CSBS 모델링 및 자세제어, 하중계측 이론에 따라 평면형 CSBS 통합 시스템을 그림 4와 같이 구성하였다. 운용 소프트웨어는 NI LabVIEW를 활용하여 구성하였으며, 모션 제어/계측, 하중 계측, 케이블 인장력 조절, 실험 데이터 모니터링/저장 등의 기능을 탑재하였다.

모델은 식 (1), (2)에 따라 계산된 케이블 길이 및 속도로 선형구동기를 작동함으로써 제어되며, 모델의 3자유도 운동 방향(X, Y, ψ)은 그림 4 <Main frame>에 정의된 바와 같다. 모델의 실시간 위치/자세 측정을 위하여 적외선 카메라 2대로 구성된 스테레오 영상 기반의 모션 캡처 시스템(위치측정 정밀도 RMSE~0.05mm)을 활용하였다.

모델에 작용하는 하중은 로드셀로 계측된 케이블 인장력을 조합하여 산출되지만, 이렇게 측정된 하중의 비교·검증을 위하여 6분력 내장형 밸런스를 추가 적용하였으며 이는 III장에서 상세히 기술한다. 로드셀 및 6분력 밸런스 데이터 수집을 위하여 NI Compact DAQ를 활용하였다.

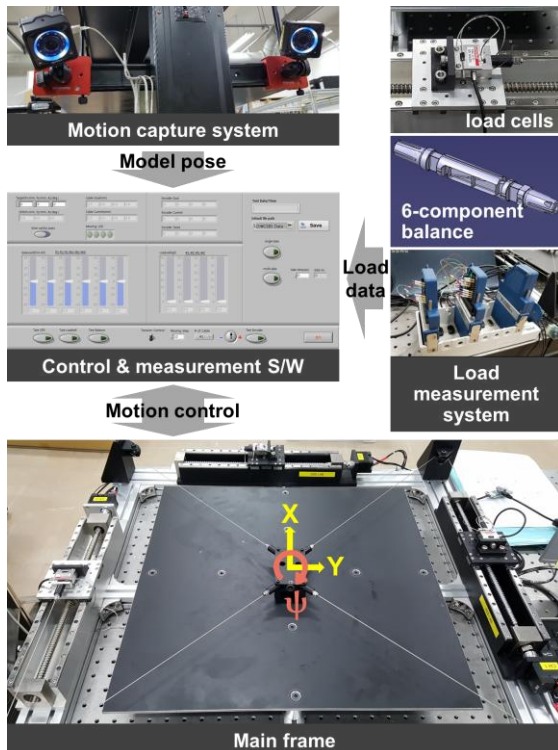


그림 4. 평면형 CSBS 구성도.

Fig. 4. Configuration of the planar CSBS.

III. 평면형 케이블 로봇 성능평가

1. 자세제어 성능평가 및 운동학적 교정

개발된 평면형 CSBS의 정상동작 확인 및 자세제어 성능평가를 위하여, 3자유도 각각에 대한 시험을 그림 5와 같이 수행하였으며 그 결과는 그림 6과 같다. 병진방향(X, Y)에 대하여 $\pm 150\text{mm}$ 범위에서 5mm 간격으로 이동하며 입력된 제어 명령과 모션 캡처 시스템으로 실제 계측된 좌표를 비교하였으며, 회전방향(ψ)의 경우 $\pm 20^\circ$ 범위에서 2° 간격으로 시험을 수행하였다. 시험 결과 각 방향에 대한 제어 오차(RMSE)는 X방향 0.65%, Y방향 0.87%, ψ 방향 0.90%로, 조립/가공 공차, 모델링 시 단순화 등에 의한 오차가 소폭 발생하지만 전반적으로 3자유도 모두 제어명령을 잘 추종하였다.

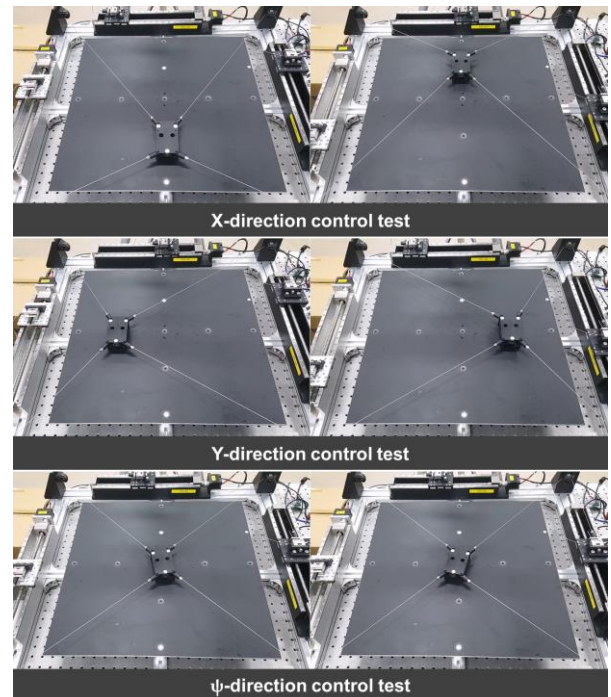


그림 5. 3자유도 자세제어 시험.

Fig. 5. 3-DOFs motion control test.

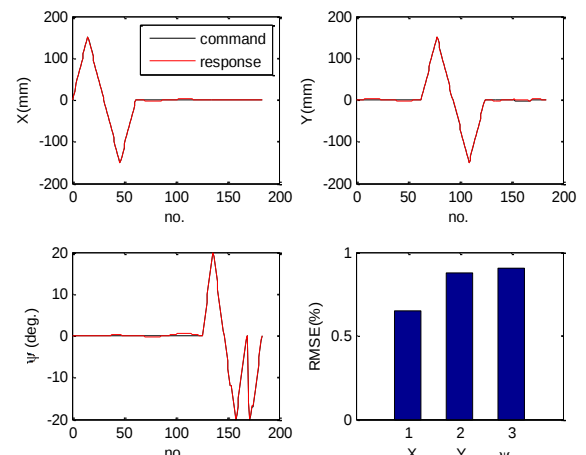


그림 6. 3자유도 자세제어 시험 결과.

Fig. 6. 3-DOFs motion control test result.

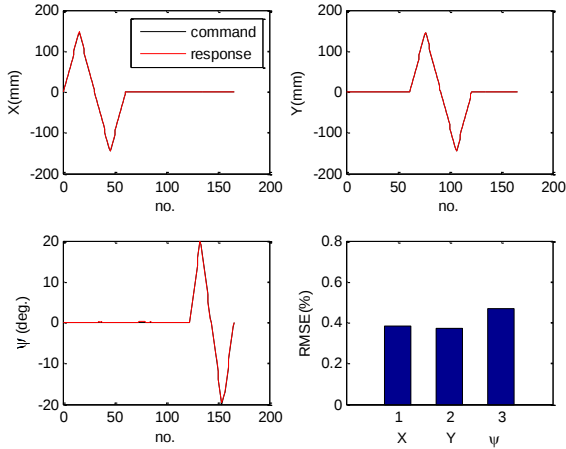


그림 7. 3자유도 자세제어 시험 결과(운동학적 교정 적용).
Fig. 7. 3-DOFs motion control test result (with kinematic calibration).

이처럼 교육 및 기초 연구로의 운용 목적을 고려할 때 적절한 수준의 제어성능을 보였으나, 향후 더욱 심도있는 연구로의 확장을 고려하여 오차 개선을 위한 운동학적 교정(kinematic calibration)을 추가로 수행하였다.

운용 소프트웨어 내에서 제어명령을 적절히 보상하기 위한 교정 함수를 적용하였으며, 제어명령(C_i)과 실제 움직임(R_i) 사이 비선형 간섭효과를 반영할 수 있도록 식 (6)과 같은 2차 다항식 교정 모델을 선정하였다. 교정계수($k_{i,j}$)는 시험 결과를 토대로 잔차의 제곱합이 최소가 되도록 하는 최소 제곱법을 통해 산출하였으며, i 는 자유도 식별 번호이다.

$$C_i \approx k_{i,0} + k_{i,1}R_1 + k_{i,2}R_2 + k_{i,3}R_3 + k_{i,4}R_1^2 + k_{i,5}R_2^2 + k_{i,6}R_3^2 + k_{i,7}R_1R_2 + k_{i,8}R_1R_3 + k_{i,9}R_2R_3 \quad (6)$$

그림 7은 운동학적 교정 후 자세제어 시험 결과이다. 각 방향에 대한 제어 오차(RMSE)는 X방향 0.37%, Y방향 0.36%, ψ 방향 0.47%로, 다항식 함수 교정을 통하여 모든 방향에 대하여 더욱 정밀한 자세제어가 가능하였다.

2. 하중계측 성능평가 및 교정

본 연구에서 개발된 CSBS의 케이블 장력 측정을 이용한 하중계측 성능평가를 위하여, 다양한 자세 조건에서 모델에 하중을 부여하며 로드셀 측정값으로부터 산출된 하중을 실제 하중과 비교하였다.

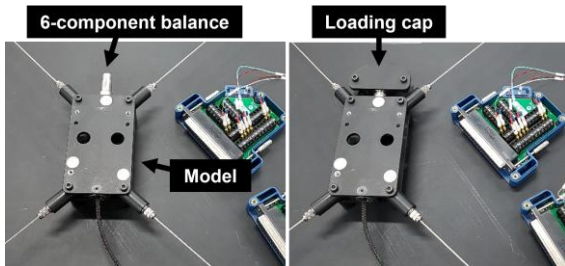


그림 8. 하중시험을 위한 6분력 내장형 밸런스 및 로딩 캡.
Fig. 8. 6-component balance installed inside the model and the loading cap to apply arbitrary loads.

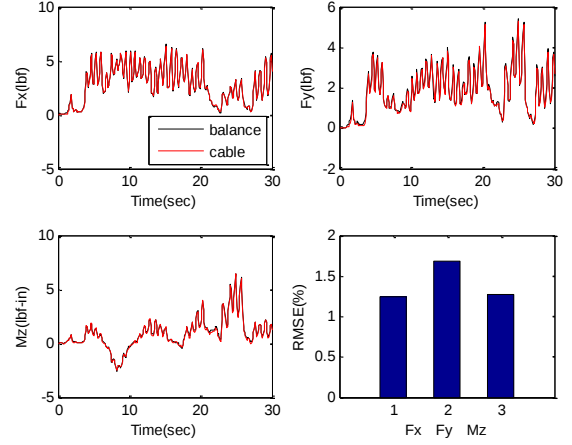


그림 9. 하중시험 결과(X=20mm).
Fig. 9. Loading test result at X=20mm.

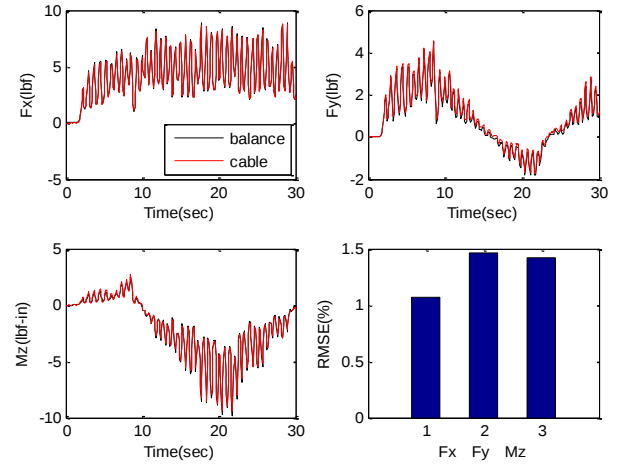


그림 10. 하중시험 결과(Y=20mm).
Fig. 10. Loading test result at Y=20mm.

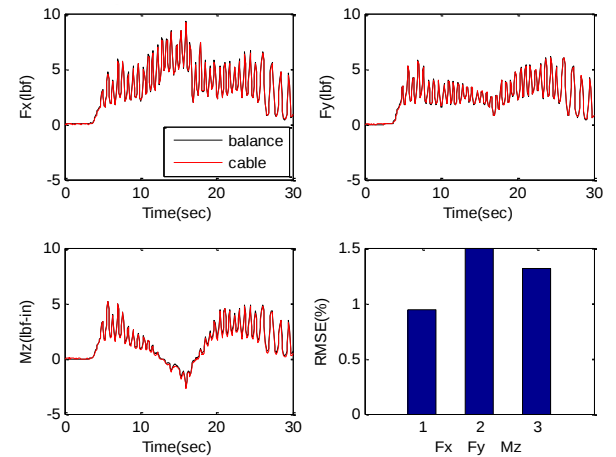


그림 11. 하중시험 결과($\psi = -10\text{deg}$).
Fig. 11. Loading test result at $\psi = -10\text{deg}$.

모델에 작용하는 실제 하중을 정밀하게 계측하기 위하여 별도의 사전 교정을 마친 6분력 내장형 밸런스(RMSE ~0.1%)를 그림 8과 같이 모델 내부에 장착하였고, 하중 인가용 치구 역할을 하는 로딩 캡을 밸런스 끝단에 부착하였다. 외부

표 1. 하중계측 성능.

Table 1. Load measurement performance with and without the load correction using MLP.

	F_x	F_y	M_z
Max. loading	12 lbf	8 lbf	10 lbf·in
RMSE(교정 전)	0.67 %	1.17 %	1.10 %
RMSE(교정 후)	0.33 %	0.73 %	0.73 %

로부터 임의의 시험 하중이 로딩 캡에 작용하면 6분력 밸런스에 의해 계측되며, 동시에 구조적으로 연결된 4개의 케이블로 전달된다. 다양한 자세 조건(X : 20mm, Y : 20mm, ψ : 0° , $\pm 10^\circ$ 등)에서 임의의 외부 하중을 로딩 캡에 부여하며 수행한 주요 시험 결과를 그림 9-11에 정리하였다.

시험 결과 획득된 2,300여 개의 데이터를 토대로 분석된, 6분력 밸런스 계측값 대비 각 방향 분력 측정 오차(RMSE)는 X 방향 힘(F_x) 0.67%, Y 방향 힘(F_y) 1.17%, 모멘트(M_z) 1.10%로, 전반적으로 약 1% 내외 오차로 하중을 계측 가능함을 확인하였다.

이러한 하중계측 오차는 시험 중 발생하는 마찰, 제작공차 등에서 기인하는 것으로 생각되며, 이는 전체 시스템을 포괄하는 교정 과정을 통해 개선될 수 있다. 본 연구에서는 하중계측 성능을 더욱 향상시키기 위하여, 입출력 값을 신뢰할 수 있다면 별도의 수식화, 변환 과정 없이도 복잡한 상관관계를 효과적으로 추론할 수 있는 인공신경망(artificial neural network) 기반 end-to-end 학습을 적용하였다.

하중교정을 위하여 1개의 은닉층(hidden layer)을 가진 다층 퍼셉트론(multi-layer perceptron, MLP)을 적용하였으며, 학습을 위한 입력 변수로는 모션 캡처 시스템으로 계측된 좌표(X , Y , ψ)와 로드셀 4조의 하중 데이터(T_i)를, 출력 변수로는 6분력 밸런스로 계측된 실제 하중 데이터(F_x , F_y , M_z)를 적용하였다. 은닉층은 20개의 뉴런으로 구성되며 활성화 함수로 시그모이드(sigmoid) 함수를, 학습 최적화를 위하여 회귀 분석에 강점을 갖는 것으로 알려진 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 적용하였다[17].

이와 같이 7개의 입력 변수, 3개의 출력 변수로 구성된 총 2,300여 개의 데이터셋을 활용하여 인공신경망 형태의 케이블 하중계측 교정함수를 학습하였으며, 학습에 사용하지 않은 데이터를 이용하여 성능을 평가하고 표 1에 정리하였다. 교정 전과 비교하여 측정오차가 확연히 감소하였으며, 복잡한 하중교정 절차 없이 더욱 정밀한 하중계측 성능을 확보하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 복수의 케이블을 이용하여 넓은 영역에서 시험모델의 자세제어가 가능하면서도, 동시에 케이블 장력 측정을 통한 하중계측이 가능한 평면형 CSBS를 개발하였다. 케이블 구동 병렬로봇 이론을 토대로 하드웨어 및 소프트웨어를 포함한 통합 시스템을 구성하였으며, 다양한 시험운동을 통해 성능을 평가하였다.

더 나아가 다항식 함수를 이용한 운동학적 교정을 적용하여 자세제어 성능을 향상하였으며, 최종적으로 3자유도 모두

에 대하여 최대오차 0.5%이내의 정밀한 자세제어가 가능하였다. 또한 하중계측 성능 향상을 위하여, 인공신경망 기반 end-to-end 학습을 적용함으로써 최대오차 0.7%수준의 3분력 힘/모멘트 계측 성능을 확보하였다.

개발된 평면형 CSBS는 엔드 이펙터의 관성력을 무시할 수 있는 소형 모델의 저속 운동을 가정하고 설계되었기에, 고중량 또는 고속 운동으로 활용 범위를 확장할 경우 관성력 영향이 추가적으로 고려되어야 하는 등 일부 한계를 가진다. 그럼에도 불구하고 시험 운용 결과 확인된 넓은 구동영역, 우수한 자세제어·하중계측 성능 및 개발 과정에서 획득한 핵심 기술은 향후 인력양성교육[18], 풍동시험장치, 시뮬레이터, 가상현실 햅틱장치, 스마트 공장 물류 이송·생산장치 등 다양한 교육·연구·산업 분야로의 응용을 위한 기반이 될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] S. Qian, B. Zi, W.-W. Shang, and Q.-S. Xu, "A review on cable-driven parallel robots," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 31, 66, 2018.
doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0267-9>
- [2] P. Miermeister, M. Lachele, R. Boss, C. Masone, C. Schenk, J. Tesch, M. Kerger, H. Teufel, A. Pott, and H. H. Bulthoff, "The CableRobot simulator large scale motion platform based on cable robot technology," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Daejeon, Korea, pp. 3024-3029, 2016.
doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759468>
- [3] K. Iturralde, M. Feucht, D. Illner, R. Hu, W. Pan, T. Linner, T. Bock, I. Eskudero, M. Rodriguez, J. Gorrotxategi, J. B. Izard, J. Astudillo, J. Cavalcanti Santos, M. Gouttefarde, M. Fabritius, C. Martin, T. Henninge, S. M. Nomes, Y. Jacobsen, A. Pracucci, J. Cañada, J. D. Jimenez-Vicaria, R. Alonso, and L. Elia, "Cable-driven parallel robot for curtain wall module installation," *Automation in Construction*, vol. 138, 104235, 2022.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104235>
- [4] Z. Shao, G. Xie, Z. Zhang, and L. Wang, "Design and analysis of the cable-driven parallel robot for cleaning exterior wall of buildings," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 18, no. 1, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1177/1729881421990313>
- [5] T. Dallej, M. Gouttefarde, N. Andreff, P.-E. Hervé, and P. Martinet, "Modeling and vision-based control of large-dimension cable-driven parallel robots using a multiple-camera setup," *Mechatronics*, vol. 61, pp. 20-36, 2019.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.05.004>
- [6] M. Rognant and E. Courteille, "Improvement of cable tension observability through a new cable driving unit design," *Cable-Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science*, vol. 53, pp. 280-291, 2018.
doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61431-1_24
- [7] Y. Ji, M. Peng, Q. Lin, and C. Yin, "Wire-driven parallel robot suspension system for SDM in a low-speed wind tunnel," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 4, 2023.
doi: <https://doi.org/10.1177/16878132231170262>

- [8] S.-H. Bach and S.-Y. Yi, "Flexible motion of a cable-driven parallel robot on 3D curved surface," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 29, no. 1, pp. 66-71, 2023.
doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2023.22.0081>
- [9] S. Lee, "Development of a cable driven haptic cube," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 25, no. 7, pp. 641-646, 2019.
doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2019.19.0088>
- [10] S.-H. Ha, M.-C. Kim, J. Piao, B.-J. Park, K. Lee, and C.-S. Kim, "Structural analysis and position control for a high payload logistics cable driven parallel robot," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A (in Korean)*, vol. 46, no. 11, pp. 995-1002, 2022.
doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2022.46.11.995>
- [11] K.-Y. Park, Y.-H. Sung, and J.-H. Han, "Cable suspension and balance system with low support interference and vibration for effective wind tunnel tests," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 22, no. 5, pp. 1048-1061, 2021.
doi: <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00390-y>
- [12] Y.-H. Sung, K.-Y. Park, and J.-H. Han, "Development of subsystems of KAIST cable-driven parallel robot for wind tunnel test," *Proc. of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference 2019*, Buan, Korea, pp. 689-690, Apr. 2019.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08753281>
- [13] K.-Y. Park, Y.-H. Sung, and J.-H. Han, "Development and verification of the multiple cable driven 2-D motion control system," *Proc. of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference 2024*, Jeju, Korea, pp. 1020-1021, Apr. 2024.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11813983>
- [14] H. Zhang, Z. Zhao, G. Ren, P. Hu, Y. Yang, Z. Pan, and F. Sanfedino, "Arresting-cable system for robust terminal landing of reusable rockets," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 58, no. 2, pp. 425-443, 2021.
doi: <https://doi.org/10.2514/1.A34646>
- [15] L. Gagliardini, S. Caro, M. Gouttefarde, and A. Girin, "Discrete reconfiguration planning for cable-driven parallel robots," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 100, pp. 313-337, 2016.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.02.014>
- [16] S. Niku, *Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications*, Prentice Hall, 2001.
- [17] D. Baptista and F. Morgado-Dias, "Comparing different implementations for the levenberg-marquardt algorithm," *10th Portuguese Conference on Automatic Control*, Funchal, Portugal, 2012.
- [18] S. Han, "Inverted pendulum systems for effective control engineering education," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 4, pp. 464-472, 2024.
doi: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2024.24.0034>



박 금 용

1993년 한국항공대학교 항공기계공학과(공학사). 1995년 KAIST 항공우주공학과(공학석사). 2021년 KAIST 항공우주공학과(공학박사). 1995년~현재 국방과학연구소 수석연구원. 관심분야는 실험공기역학, 지능형 로봇시스템.



한 재 hung

1991년 KAIST 기계공학과(공학사). 1993년 KAIST 항공우주공학과(공학석사). 1998년 KAIST 항공우주공학과(공학박사). 2003년~현재 KAIST 항공우주공학과 교수. 관심분야는 스마트 구조 및 항공우주시스템, 우주 구조물, 생체모방비행체.



성 열 훈

2011년 KAIST 항공우주공학과(공학사). 2016년 KAIST 항공우주공학과(공학석사). 2021년 KAIST 항공우주공학과(공학박사). 2023년~현재 한국기술교육대학교 기계공학부 조교수. 관심분야는 지능형 기계 및 항공우주시스템.