

특집논문(Special Paper)

방송공학회논문지 제25권 제4호, 2020년 7월 (JBE Vol. 25, No. 4, July 2020)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2020.25.4.497>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

## 실감 입체 형상 생성을 위한 카멜레온형 핀아트 장치 개발

권 오 흥<sup>a)</sup>, 김 진 영<sup>a)</sup>, 이 설 희<sup>a)</sup>, 김 주 혜<sup>a)</sup>, 이 상 원<sup>a)</sup>, 조 자 양<sup>a)</sup>, 김 형 태<sup>a)</sup><sup>#</sup>

## Development of a Chameleonic Pin-Art Equipment for Generating Realistic Solid Shapes

Ohung Kwon<sup>a)</sup>, Jinyoung Kim<sup>a)</sup>, Sulhee Lee<sup>a)</sup>, Juhea Kim<sup>a)</sup>, Sang-won Lee<sup>a)</sup>, Jayang Cho<sup>a)</sup>,  
and Hyungtae Kim<sup>a)</sup><sup>#</sup>

### 요 약

본 논문에서 제안된 카멜레온형 서피스 (chameleonic surface)는 핀 아트 (pin-art) 장치로서 임의 형상 발생용 입체 디스플레이 장치이다. 슬림 텔레스코픽 액츄에이터 (slim telescopic actuator)와 고탄성의 복합 소재로 생성되는 부드럽고 연속적인 곡면 위에 동적 매핑 영상을 투사하여 사실적인 입체 형상을 연속적으로 생성할 수 있다. 슬림 텔레스코픽 액츄에이터는 적층을 위하여 긴 행정거리를 가지면서 최소 접유 면적을 기지도록 설계하였다. 3차원 형상은 다수의 슬림 텔레스코픽 액츄에이터가 고탄성 소재를 밀어서 돌출시켜서 만들어진다. 이와 같은 구조는 임의의 연속적인 곡면 형상 생성, 동적 영상 투사 및 장치 경량화 등의 장점이 있었다. 수백 개의 슬림 텔레스코픽 액츄에이터가 원활하게 동작하기 위하여 실시간 동기화가 가능한 이더캣 (EtherCAT) 통신 기반의 분산 제어기를 적용하였다. 통합 운영 소프트웨어로 돌출 형상과 입체 영상을 정합하고 다수 영상 투사기로 투사하여 실감 영상을 연속적으로 생성할 수 있었다. 실제 공연을 위하여 오페라용 콘텐츠를 제작하면서 카멜레온 서피스에 최적화하였고, 일반인들을 대상으로 상영하였다.

### Abstract

A chameleonic surface proposed in this study was a pin-art and 3D display device for generating arbitrary shapes. A smooth and continuous surface was formed using slim telescopic actuators and high-elasticity composite material. Realistic 3D shapes were continuously generated by projecting dynamic mapping images on the surface. A slim telescopic actuator was designed to show long strokes and minimize area for staking. A 3D shape was formed by thrusting and extruding the high-elasticity material using multiple telescopic actuators. This structure was advantageous for generating arbitrary continuous surface, projecting dynamic images and lightening weight. Because of real-time synchronization, a distributed controller based on EtherCAT was applied to operate hundreds of telescopic actuators smoothly. Integrated operating software consecutively generated realistic scenes by coordinating extruded shapes and projecting 3D image from multiple projectors. An opera content was optimized for the chameleon surface and showed to an audience in an actual concert.

Keyword : kinetic art, pin-art device, chameleon surface, slim telescopic actuator, distributed network control

## I. 서 론

키네틱 아트 (kinetic art)는 물, 바람, 전기, 열 등의 다양한 물리적 에너지를 활용한 동적인 설치 예술의 한 분야이다<sup>[1]</sup>. 일반적으로 시간의 흐름에 따라 조명 및 물체 등 장치의 동작에 의하여 시각적인 표현을 목적으로 한다. 키네틱 아트는 시각적, 기계적 및 자연적으로 인지할 수 있는 현상이나 에너지를 이용하는 아이디어로 장치를 제작한다<sup>[2]</sup>. PC의 대중화 이후에는 키네틱 아트는 전기나 LED를 이용하여 군집화된 모듈을 제어 자동화하여 입체적인 효과를 볼 수 있는 스크린 디스플레이로 발전하였다<sup>[3]</sup>. 키네틱 서피스 (kinetic surface)는 전기적인 신호를 물리적인 운동으로 변환함으로써 가상의 표면을 3차원 곡면으로 변화시킬 수 있는 디스플레이 장치를 의미한다<sup>[4]</sup>.

고올소프 (Goulthorpe) 등은 금속 판과 공압 실린더를 활용하여 3차원 동적 재구성이 가능한 에이지스 하이포서피스 (Aegis Hyposurface)를 선보였다. 에이지스 하이포서피스는 8m×7m 크기로 500mm 사이즈의 직각 삼각형의 금속판 576개로 제작하였다. 제어 시스템과 공압 시스템의 반응 속도는 각각 14msec 및 3Hz 내외이며, 바람이 부는 모습을 형상화 하였다<sup>[5]</sup>. 독일의 화이트보이드 (WHITEvoid)사는 키네틱 서피스 관련 전문 회사로 다국적 전문 기업과 플레이어 퍼세이드 (Flare facade) 등 여러 작업을 공동으로 기획하였다. 건축물 측면에 조약돌 형상으로 금속 조각들을 배열하고, 공압 피스톤으로 각도를 조절하는 사례가 있는데, 햇빛의 각도를 조절함으로써 픽셀의 밝기를 바꿀 수 있어서 전체적으로 애니메이션을 볼 수 있는 스크린 효과를 보여주었다<sup>[6]</sup>. 이와 유사하게 사각뿔 배열을 회전하거나 높이를 조정함으로써 디스플레이가 가능한 구조도 있다.

a) 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문(Korea Institute of Industrial Technology, Human Convergence Technology R&D Department)

‡ Corresponding Author : 김형태(Hyungtae Kim)

E-mail: htkim@kitech.re.kr

Tel: +82-31-8040-6878

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5711-551X>

\* 본 연구는 문화체육관광부가 지원하는 문화기술연구개발사업(R2016030020 및 R2019050038)의 성과물임을 알립니다.(This work was supported by the Culture Technology R&D Program funded by the Ministry of Culture, Sports and Tourism (MCST, R2016030020 and R2019050038))

· Manuscript received May 26, 2020; Revised June 29, 2020; Accepted June 29, 2020.

두 개의 서보모터와 아두이노 (Arduino) 제어기를 사용하여 동적인 표면을 제작하고 가죽같은 느낌을 표현하도록 제작하였다<sup>[7]</sup>. 소치 올림픽에서는 디지털 얼굴 사진을 3차원 표면으로 만들어 주는 옥외 구조물 메가 페이스 (mega face)를 선보였다. 소프트웨어에 의하여 11,000개의 액츄에이터와 3색 LED를 개별 퍼셀로서 제어하였다. 메가 페이스는 핀토이 (pin-toy) 방식의 액츄에이터에 의한 돌출에 의하여 거대한 3차원 얼굴을 연출할 수 있었다<sup>[8]</sup>. 매사추세츠 공과대학교 (MIT)에서는 백색 사각형 펀을 책상 위에 30\*30개로 배열하여 평면 상에 동적인 곡면을 생성할 수 있는 인폼 (inFORM)을 발표하였다. 인폼은 모터를 사용하여 양방향으로 미끄러지는 메카니즘으로 구성되어 있어서 높이를 자유롭게 조정할 수 있다. 그리고, 인폼은 실제 구동된 높이를 측정하여 PID 제어 기법이 적용되어 있어서 외부의 부하가 작용하더라도 신뢰성 있는 동작이 가능하다<sup>[9]</sup>. 노르웨이의 룬딘사 (Lundin)는 529개의 서보 모터와 이더캣 (EtherCAT) 통신을 이용하여 “브레이킹 더 서피스 (Breaking the Surface)”라는 장치를 제작하였다. 인더스티리 4.0 (Industry 4.0)에서 사용되는 이더캣 통신으로 대용량 데이터를 처리함으로써, 23×23 배열 투브를 서보 모터 (servo motor)로 구동하여 물결치는 장면을 연출하였다. 일부 투브에는 노르웨이 대륙붕에서 발견된 석유 탐사 샘플을 밀봉하여 관람객의 집중을 유도하였다<sup>[10]</sup>. 이러한 키네틱 서피스 보다 발전된 기술로 키네틱 스킨 (kinetic skin)이 있는데, 삼각뿔 구조를 조합하여 텐트나 커튼을 조합해내는 모듈을 개발한 사례도 있다<sup>[11]</sup>. 전기에 의해 팽창 및 수축되는 유연 재료를 사용하여 프레임을 제작하고, 프레임 내부 에너지를 최소화 하는 방향으로 변형하는 것을 이용하였다. 키네틱 스킨으로는 보다 자유로운 3차원 형상을 만들 수 있는 장점이 있으나, 현재까지는 공연용 대형 스크린에 적용하기는 다소 어렵다.

국내의 경우 2012년 여수 엑스포에서 선보인 하이퍼매트릭스 (HyperMatrix)가 대표적인 키네틱 서피스의 사례이다. 실내 3면의 벽면을 32cm×32cm의 사각형 스티로폼 판으로 메꾸고, 스텝 모터 (step motor)로 각 스티로폼 판을 전진 및 후진하여 동적인 장면을 연출하였다. 카멜레온형 서피스는 2017년에 개발되어, 프로젝션 매핑 (projection mapping)으로 영상을 투사하는 방법을 제안된 사례가 있다

[12]. 변형 곡면과 프로젝션 매핑을 결합하여 보다 극적인 효과를 얻을 수 있었으나, 구동 장치의 한계로 얼굴만 연출할 수 있었다. 국내의 경우도 키네틱 서피스를 활용한 사례가 증가하고 있으나, 아직은 초기 단계로 모듈화된 기술적인 정립이 필요한 실정이다.

카멜레온형 서피스의 경우 다양한 액츄에이터의 기계적 특성에 대한 이해가 필요하고, 수백 개의 픽셀 배열에 대한 다축 액츄에이터 제어 및 실시간 네트워킹 기술이 필요하다. 본 논문에서는 임의 형상 대하여 부드럽고 연속적인 질감을 표현하기 위한 카멜레온형 서피스 (*chameleonic surface*)를 개발하였으며, 대변형 스크린, 슬림 텔레스코픽 액츄에이터 (*slim telescopic actuator*), 네트워크 분산 제어 시스템 및 통합 운영 소프트웨어를 소개한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 카멜레온형 핀 아트 장치의 구조와 하드웨어 기반의 요소 기술을 소개한다. 둘째, 스크린에 투사할 콘텐츠 영상 투사와 통합 운영 소프트웨어를 설명하고 실제 공연 사례를 소개한다. 마지막으로 결론과 향후 연구 과제를 도출한다.

## II. 카멜레온형 핀 아트 장치

### 1. 연속적인 표현을 위한 서피스 스크린

카멜레온형 서피스는 핀 아트 장치 구조를 기반으로 하며, 정면에는 임의 형상 발생을 위한 스크린이 장착되어 있다. 연속적이고 임의 형상이 발생되는 서피스 스크린은 일반적인 키네틱 서피스 위에 고신장 및 고탄성 재질로 마감하여 보다 부드러운 질감을 표현할 수 있다. 그림 1은 본

연구에서 개발한 카멜레온형 서피스로 3.80m×1.74m의 크기이며, 고탄성 스크린을 핀으로 밀어서 최대 1m까지 돌출시켜 임의 형상을 연출할 수 있다. 본 카멜레온형 서피스는 400여개의 직선형 액츄에이터를 사용하여 각 핀을 전후진하여 임의의 3차원 입체 형상을 생성한다. 그리고, 입체 표현의 극대화를 위하여 카멜레온형 서피스 (*chameleonic surface*) 자체를 회전할 수 있도록 하부에 턴 테이블 (*turn table*) 구조가 적용되어 있다. 고탄성 스크린은 평면에서 최대 1m까지 변형해야 하므로, 고신축 및 내구성의 신소재를 적용하였다. 스크린용 소재는 주로 스포츠 의류 및 운동 보조 테이프로 적용되는 고신축 소재를 개선 및 가공하여 제작하였다. 그리고, 동적 영상 투사와 연동하기 위하여 스크린 소재의 색상은 백색으로 선정하였다.

스크린 소재는 스크린, 대변형, 내구성, 액츄에이터 접합 및 곡면 유지 등의 조건을 만족해야 하므로, 소재 선정 시 다양한 특성 분석과 물성 평가를 수행하였다. 스크린 소재가 요구되는 구체적인 특성은 서피스 변형 유지, 반복 신축 및 굽힘 후 크랙이나 절단 발생이 없음, 신장 후 탄성 회복, 4방향 신장 내구성 등이다. 원사 조성, 직조 방법 및 스펙을 검토하여 결정된 22종의 후보 소재에 대한 스크린 적합성 여부를 평가하기 위하여 인장강도, 인열강도, 신장률 및 탄성 회복률을 측정하였다. 가장 우수한 평가를 받은 1차 선정 소재에 구김 감소, 처짐 방지 및 탄성 회복을 강화할 목적으로 폴리우레탄(*polyurethane*)을 합성하여 복합 직물을 제작하였다. 복합 직물의 경우 박리 문제가 발생하여 조성을 최적화하며 원단을 제작하였으며, 내구성 확보를 위하여 500,000회 반복 시험을 실시였다.

최종 개발 소재의 원단은 카멜레온형 서피스 전체 사이즈로 생산 불가하여서, 다수의 원단을 연결해야 했었는데,



그림 1. 카멜레온형 서피스의 스크린 돌출 예

Fig. 1. An example of extrusion on a screen in curved chameleonic surface

연결 방법이 중요하였다. 다양한 기계적 결합과 화학적 접착 방식을 검토하여 화학적 접합 한 후 자수기법의 봉제기술을 접목하는 방식으로 연결하였다. 원단과 핀의 결합 방법으로 벨크로, 스냅, 나사 등을 검토하였고, 결합력을 기준으로 스냅-나사 결합으로 결정하였다. 그리고, 스크린 변형 시곡면이 완만하고 부드럽게 형성하기 위하여 핀 끝단에 부착할 지지체를 개발하였다. 지지체는 최적 형상으로 설계하였고, 원추형 패드 몰드에 실리콘을 이용하여 유연하게 제작하였다. 개발된 스크린 소재의 탄성력은 수식 (1)과 같이 핀에 의하여 돌출 변위의 2차 함수으로 나타났으며, 전형적인 비선형 스프링의 특성을 보였다.

$$F_k = k_1 z + k_2 z^2 \quad (1)$$

## 2. 슬림 텔레스코픽 액츄에이터

임의 형상 발생을 위한 카멜레온형 서피스에서는 한 개의 핀이 한개의 픽셀에 대응하므로, 수백개의 핀과 직선형 액츄에이터를 적층하여야 한다. 다수의 직선형 액츄에이터를 한정된 공간에 배치하기 위하여 각 액츄에이터는 스크린을 늘리기 충분한 출력과 긴 돌출 변위 및 작은 접유 면적 등이 필수 사항이다. 따라서, 최소 접유 면적으로 긴 행정 거리를 발생할 수 있도록 그림 2와 같이 2단의 구조를 가지는 슬림 텔레스코픽 액츄에이터를 개발하였다<sup>[13]</sup>. 슬림 텔레스코픽 액츄에이터는 2개의 볼스크류 (ball-screw)와 모터, 기어, 레일 및 브라켓으로 구성된다. 모터가 제 1 볼스크류를 회전하면, 브라켓이 레일을 따라 직선 방향으로 미끄러지면서 이동한다. 브라켓에는 제 2 볼스크류가 설치되어 있는데 모터에서 전달받은 기어에 의하여 회전한다. 제 2 볼스크류의 회전은 핀을 직선 방향으로 이동하게 함으로

써 좁은 면적에서 긴 행정 거리를 발생할 수 있다. 핀의 끝에는 지지체를 장착하여 스크린을 수직 방향으로 돌출시킨다. 여기서, 모터의 회전각과 돌출 변위  $z$ 의 관계는 다음과 같이 기어 비, 피치 및 전달 효율로 계산할 수 있다.

$$z = (\eta_1 \eta_2 p_2 \frac{N_2}{N_1} + \eta_1 p_1) \theta \quad (2)$$

만일 더 큰 돌출 변위를 얻기 위하여  $n$ 단으로 볼스크류를 늘리면 다음과 같은 수식으로 돌출 변위를 계산할 수 있다.

$$z = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \prod_{j=1}^i \eta_j \right) p_i \frac{N_i}{N_{i-1}} \right] \theta \quad (3)$$

이러한 구조는 최소의 접유 면적으로 경량화가 가능하고, 작은 구동 토크로 큰 힘과 긴 돌출 변위를 발생할 수 있다. 또한, 모터의 전원선과 엔코더 (encoder) 선의 움직임이 발생하지 않으므로 배선이 용이하고, 단선의 위험이 적다. 실제 설계에서는 스킨의 탄성력을 고려하여 추력은 5kgf 이상 전달되고, 속도는 1.0m/s 이상이 되도록 하였다. 4.2kg으로 최적 설계된 액츄에이터를 카멜레온형 서피스 내부에 소정 간격으로 이격하여 적층한 구조는 그림 2의 배치도와 같다<sup>[15]</sup>. 설치와 유지 보수를 용이하게 할 목적으로 각각의 슬림 텔레스코픽 액츄에이터는 상하면을 어긋나게 다이아몬드 모양으로 배치하였다. 총 15 레이어로 적층하였으며, 픽셀 사이즈는 131mm×131mm이다. 각 슬림 텔레스코픽 액츄에이터는 2<sup>17</sup> 분해능과 200W 출력의 서보 모터로 구동하므로, 엔코더에서 실제 움직인 각도와 오차를 기반으로 정확한 위치 제어와 위치 유지가 가능하다.

슬림 텔레스코픽 액츄에이터 제어시 스크린 재질의 특성

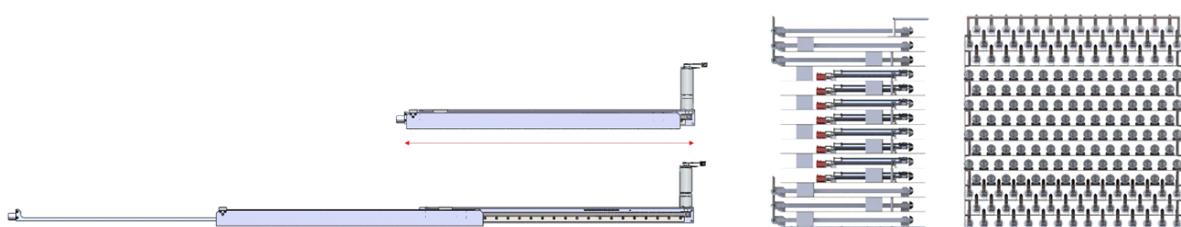


그림 2. 슬림 텔레스코픽 액츄에이터와 카멜레온형 서피스 내의 배치도  
Fig. 2. A slim telescopic actuator and a layout in chameleonic surface

을 고려해야 스크린의 탄성에 의한 성능 저하나 과도한 추력 발생 및 스크린 파단을 방지할 수 있다. 일반적으로 스크린의 탄성은 수식 (1)과 같이 비선형적으로 정확한 제어 계수를 획득하기 어려우므로, 적절한 제어를 위하여 모델 불화성을 고려한 임피던스 모델을 적용하였다. 임의의 형상으로 스크린이 변형할 때 수학적인 모델을 스프링과 댐퍼로 가정하였고, 반복적인 테스트를 통해서 극사적으로 제어 계수들을 구하였다<sup>[16]</sup>.

### III. 콘텐츠 영상 제어

#### 1. 콘텐츠와 동적 영상 투사

카멜레온형 서피스 콘텐츠는 변하는 부조 조각같이 임의의 형상으로 곡면을 돌출시키고, 콘텐츠영상을 투사하여 실감성을 높이는 두 가지 관점으로 제작하였다. 첫 단계로 콘텐츠를 2D 스크린용 이미지로 제작하고, 3D 모델링 및 랜더링 과정을 거쳐 3D 애니메이션으로 재구성하였다. 두

번째 단계로 3D 애니메이션의 데이터를 기반으로 스크린의 돌출 변위를 결정하고, 스크린에 투사할 동영상은 프로젝션 매핑으로 변환하였다. 프로젝션 매핑은 스크린과 프로젝터 간의 기하학적인 정합을 고려한 변환 알고리즘이다. 돌출 변위 결정시 스크린 모션 가상 시뮬레이터를 활용하여 슬립 텔레스코픽 액츄에이터에 의하여 스크린에 가해지는 응력을 사전에 검토하였다<sup>[17]</sup>. 시뮬레이터에서는 슬립 텔레스코픽 액츄에이터의 가감속 곡선에 의한 스크린의 파손 방지, 돌출 특성 분석 및 성능 개선 인자도 도출할 수 있었다. 세 번째 단계로 스크린의 돌출 시 음영 발생을 고려하여 동적 영상 투사는 4면으로 분할하였다<sup>[18]</sup>. 마지막으로, 4면의 프로젝터 영상과 스크린의 실제 모션 간의 동기화를 위한 정밀 보정 작업 후에 동적 영상을 투사하였다. 이러한 작업 프로세스를 비전문가도 효율적으로 진행하기 위하여 직관적인 저작 도구로 통합 운영 소프트웨어를 제작하였다.

#### 2. 통합 운영 소프트웨어 플랫폼

통합 운영 소프트웨어에는 콘텐츠 제작, 스크린 변형 검

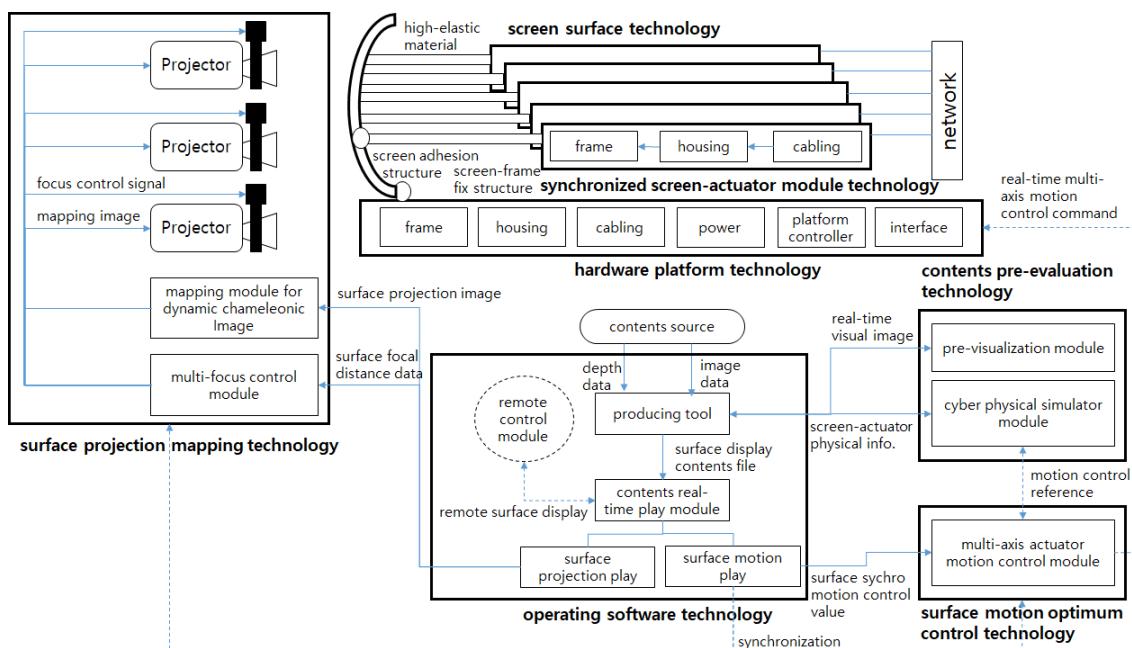


그림 3. 동적 영상 투사 및 카멜레온형 서피스의 통합 플랫폼

Fig. 3. Integrated platform of dynamic image projection and chameleonic surface

토, 동적 영상 투사 및 장치 제어 등 카멜레온형 서피스를 활용하는데 필요한 기능들을 집약하였다. 통합 운영 소프트웨어의 구성은 콘텐츠 저작 도구, 통합 서버 소프트웨어 및 재생 클라이언트 소프트웨어로 구성되어 있다. 실시간 영상 콘텐츠를 데이터로 변환하고, 다수의 슬립 텔레스코픽 액츄에이터를 구동함과 동시에 스크린에 영상을 투사함으로써 실감 영상을 공연할 수 있도록 제작되어 있다. 콘텐츠 저작 도구는 3차원 저작의 편의성을 위하여 3ds Max의 플러그인 (plug-in)으로 제작하였다. 하드웨어와 소프트웨어의 통합 플랫폼은 그림 3과 같이 통합 운영 소프트웨어, 사전 검증 도구, 프로젝션 매핑 도구, 영상 저작 및 투사기, 네트워크 분산 제어기 및 카멜레온형 서피스 본체로 구성된다.

통합 서버 소프트웨어는 Unreal 엔진 기반으로 제작하였으며, 콘텐츠를 분석하여 동적 영상 투사와 카멜레온형 서피스 데이터를 생성한다. 사전 검증 도구는 Maya 플러그인을 활용하여 스크린의 탄성 변형 및 충돌 검사를 수행하고 3D 이미지를 검토하여 최적화하는 용도로 제작하였다<sup>[17][18]</sup>. 재생 클라이언트 소프트웨어는 동적 영상 투사 데이터의 기하학적인 관계를 분석하여 4대의 프로젝터로 출력한다.

콘텐츠 영상, 카멜레온형 surface 및 프로젝터 간에 상당한 데이터 트래픽을 고려하여 통합 플랫폼에서는 네트워크 분산 제어를 적용하였다. 돌출 변위 데이터를 400여축의 모터로 전송 및 제어하기 위하여 이더캣을 이용한 네트워크 분산 제어기기 필요하였다. 수백 개의 액츄에이터의 군집 제어 및 영상 투사기를 동기화하기 위하여 인더스트리 4.0

의 통신 규약인 이더캣으로 네트워크 분산 제어기를 구축하였다<sup>[13]</sup>. 각 모터는 네트워크 분산 제어기를 통하여 전달 받은 구동 명령에 의하여 스크린을 밀어서 돌출 형상을 생성한다. 이때, 스크린은 탄성이 있으므로, 단순하게 구동 명령 위치로 이동하면 반발력이 생성되어 위치 오차가 발생하게 된다. 오차를 보상하기 위한 제어 알고리즘은 스크린의 비선형 탄성 특성을 강성 파라미터로 반영한 수식으로 구성하였다. 예를 들면, 다음과 같이 모터 편 운동은 수식 (1)과 (2)에 의한 비선형 스프링으로 가정하여 임피던스 모델을 수정함으로써 다음과 같은 비선형 운동 방정식을 구할 수 있다.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + k_1 z + k_2 z^2 = u \quad (4)$$

운동 방정식에서 계수는 실험적으로 구해진 값을 참고하여, 제어 로직에서 조정하였다. 이러한 운동 방정식의 비선형적인 특성을 고려하여 슬라이딩 모드 (sliding mode) 제어 기법을 적용하였다.

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{z}_d - \lambda \tilde{z} \quad (5)$$

네트워크 분산 제어기는 카멜레온형 서피스 전체 데이터를 분할하여 각 개별 축으로 전송하며, 개별 축의 제어기는 각 축에 대하여 수식 (4) 및 (5)와 같은 슬라이딩 모드 제어를 수행하였다. 이러한 과정을 통하여 개별 편의 이동이 전체적으로 통합되면 스크린 표면에 콘텐츠의 돌출 형상이 나타나게 된다.

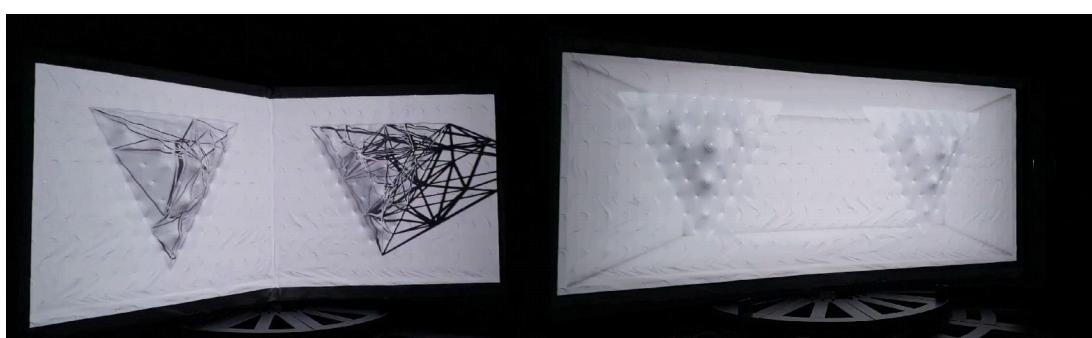


그림 4. 테스트 공연 동영상 - 변하는 도형  
Fig. 4. Test performance videos - transforming polygons

## IV. 콘텐츠 및 실증 공연 적용

### 1. 테스트 콘텐츠

이상과 같이 개발한 카멜레온형 서피스를 테스트하기 위하여 크기가 변하는 박스, 헤엄치는 고래 및 변하는 얼굴 등의 애니메이션 콘텐츠를 제작하였다. 3ds Max 환경에서 컨텐츠 저작도구로 3D 모델링을 제작한 다음, 통합 서버 소프트웨어로 동적 영상 투사 데이터와 돌출 면위 데이터를 획득하였다. 획득된 데이터를 기반으로 Maya 환경의 사전 검증 도구를 활용하여 스크린의 파단 여부 및 돌출 속도 등 사전 검증과 수정 작업을 수행하였다. 확정된 데모 콘텐츠는 재생 클라이언트 소프트웨어와 제어 소프트웨어를 이용하여 이더넷 제어 통신으로 동적 영상 투사 장치와 카멜레온형 서피스를 연동 제어하였다. 그림 4는 테스트 공연 동영상의 일부를 발췌한 것으로 정사면체, 구, 물결, 파동, 정이십면체 등 기하학적 도형이 연속적으로 변화하는 콘텐츠이다. 돌출한 스크린 곡면 상에 투사한 영상이 서로 어울려져 보다 실감있는 입체 영상이 만들어 지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 8분 내외의 콘텐츠를 30회 이상 반복하였고, 동작 오류 발생은 없었다.

### 2. 오페라 공연

테스트가 완료된 카멜레온형 서피스를 실제 공연에 적용

함으로써 유효성을 검증해 보았다. 공연 콘텐츠로는 작고한 오페라 가수 마리아 칼라스의 ‘Vissi d’arte, vissi d’amore’를 선정하였다. 유감 스튜디오와 협업하여 페이셜 캡쳐 (facial capture)와 페이셜 익스프레션 (facial expression) 기술을 활용하여 마리아 칼라스의 실사 애니메이션 영상을 제작하였다. 마리아 칼라스의 과거 영상에서 동작을 추출하여 얼굴 중심의 3D 애니메이션 영상을 만들고, 여기서 동적 영상 투사 데이터와 돌출 면위를 데이터를 획득하였다. 검토 및 수정이 완료된 데이터를 융복합 오페라 갤라콘서트 ‘전설을 재현하다’에 적용하였다.

카멜레온형 서피스는 대구 오페라 하우스에 설치하였고 리허설 후에 일반인들을 대상으로 하는 실증 공연을 2019. 10. 25에 실시하였다<sup>[19]</sup>. 그럼 5와 같이 카멜레온형 서피스는 무대 중앙에 설치하고, 에어 플라잉 커튼은 무대 위에서 동작하게 하였다. 마리아 칼라스의 얼굴의 윤곽은 카멜레온형 서피스로 표시하고 구체적인 모습은 동적 영상 투사로 처리하여 실감있는 화면을 구현하였다. 에어 플라잉 커튼은 다색 조명 제어와 연동하여 신비한 구름 장면을 연출하였다. 오페라 공연이 정숙함에도 불구하고, 각 장치들은 기계적인 소음없이 부드럽게 동작하였다. 관객들의 기술적인 이해를 높이기 위하여 중간에 기술 관련 설명과 데모도 실시하였고, 참석한 관객들로부터 적극적인 호응을 받았다. 이상과 같이 테스트 공연 및 오페라 등 실증 공연을 실시한 결과, 카멜레온형 서피스는 동적 투사 단독 기술 보다 입체감 있는 실감 영상을 연출할 수 있었다.



그림 5. 대구 오페라 하우스에서 진행된 ‘전설을 재현하다 (Opera x Technology)’ 제작 지원  
 Fig. 5. Technical support of ‘Legend Revival (Opera x Technology)’ in Daegu opera house

본 사례에서 확보된 카멜레온형 서피스 기술과 통합 플랫폼은 추후 다양한 형태의 키네틱 서피스를 개발하고 첨단 공연에 적극 활용될 것으로 기대된다. 한편, 카멜레온형 서피스는 하중이 상당하여 일부 대형 공연장에서만 활용이 가능하므로, 최적 설계를 통한 하드웨어의 경량화 연구가 반드시 필요하다.

## V. 결 론

부드럽고 실감있는 영상을 재현하기 위하여 연속적이고 임의 형상 생성이 가능한 카멜레온형 핀 아트 장치를 개발하였다. 카멜레온형 서피스는 기존 핀 아트 장치를 고탄성 복합소재 스크린으로 마감한 것으로, 스크린, 슬립 텔레스코픽 액츄에이터, 동적 영상 투사 및 통합 운영 소프트웨어로 구성하였다. 스크린 개발을 위하여 적용할 재료의 물성을 검토하고, 고신장 및 고탄성 소재를 적용하였다. 슬립 텔레스코픽 액츄에이터는 제한된 스크린 공간 내에 적층이 가능하고, 긴 행정 거리를 발생할 수 있도록 설계되었다. 애니메이션 콘텐츠는 3차원으로 제작하였고, 동적 영상 투사 데이터와 스크린 돌출 변위로 분리하였다. 수백개의 퍽 셀 배열을 제어하고, 동적 영상 투사 장치와 연동하기 위하여 이더넷 기반의 분산 제어 네트워크를 적용하였고, 통합 운영 소프트웨어를 제작하였다. 테스트용 컨텐츠 공연과 실제 오페라 공연에서 보다 입체감과 실감있는 장면을 연출할 수 있음을 보였다. 보다 많은 무대에 활용하기 위해서 하드웨어 경량화 및 최적화에 관한 후속 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌 (References)

- [1] K. Qing, "Dream: Combination of Kinetic Art and Images," TECHART: Journal of Arts and Imaging Science, Vol.7, No.1, pp.14-17, February 2020.
- [2] C. Kim, and H. Kim, "Convergence: Kinetic Art Reflected in the Formative Characteristics of Minimalism," TECHART: Journal of Arts and Imaging Science, Vol.3, No.4, pp.1-3, November 2020.
- [3] J. Moloney, "Between Art and Architecture: The Interactive Skin," Proceeding of Tenth International Conference on Infomation Visualization, London, England, pp.681-686, 2006.
- [4] H. Kim, "Designing Interactive Kinetic Surfaces for Everyday Objects and Environments," Proceeding of the fourth International Conference on Tangible, Embedded and embodied interaction, Massachusetts, USA, pp.301-302, 2010.
- [5] M. Goulthorpe, M. Burry, and G. Dunlop, "Aegis Hyposurface©: The bordering of University and Practice," Proceeding of the Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture, New York, USA, pp.344-349, 2001.
- [6] WHITEvoid, Berlin, Germany, 2010, <http://whitevoid.com/flare-facade/>
- [7] H. Jiang, T. Chang, and C. Liu, "Musical Skin: A Dynamic Interface for Musical Performance," Lecture Notes in Computer Science, vol. 6762, pp.53-61, July 2011.
- [8] iart, Basel, Switzerland, "Facade with Many Faces - MegaFaces Temporarily Monumentalised Thousands of Olympic Visiter," 2014, <http://iart.ch/en/work/megafaces>
- [9] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii, "inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation," Proceeding of annual ACM symposium on User Interface Software and Technology, St. Andrews Scotland, UK, pp.417-426, 2013.
- [10] Beckhoff, "Breaking the Surface: Servo terminals move virtual ocean," PC Control, No. 4, pp.34-39, November 2014.
- [11] C. Khoo, F. Salim, and J. Burry, "Designing Architectural Morphing Skins with Elastic Modular Systems," International Journal of Architectural Computing, Vol.9, No.4 pp.397-419, December 2001.
- [12] S. Hong, "Development of Chameleonic Multi-Surface Display with Dynamic Projection Mapping," Journal of Digital Contents Society, Vol.18, No.1, pp.123-132, Febrary 2017.
- [13] X. Wu, and L. Xie, "Performance evaluation of industrial Ethernet protocols for networked control application," Control Engineering Practice, Vol.84, pp.208-217, March 2019.
- [14] Korea Institute of Industrial Technology, Linear Actuator, 10-1939319, Korea, 2019.
- [15] Korea Institute of Industrial Technology, Linear Actuator Stacking Structure for Pin-Art Type 3-D Display, 10-2018-0126828, Korea, 2018.
- [16] O. Kwon, and J. Kim, "Development of Skin Elastic Control System for Multi-Axis Linear Actuators," Proceeding of KSPE autumn conference, pp.PP173, Yeosu, Korea, 2016.
- [17] J. Kim, J. Kim, and Y. Kim, "Characteristics and Performance Comparisons among Physics-based Cloth Simulators," Proceeding of Korea Computer Graphics Society Conference, Jeju, Korea, pp.77-78, 2017.
- [18] J. Kim, J. Kim, K. Kwon, and Y. Kim, "Physics-based Deformation for Kinetic Projection Mapping," Proceeding of Korea Computer Graphics Society Conference, Yeosu, Korea, pp.49-50, 2018.
- [19] Chameleon opera: Legend Revival, <http://daeguoperahouse/perfor/sub1.asp?nowYear=2019&noewMonth=11> (accessed May 14, 2020).

---

## 저자 소개

---



권 오 흥

- 1999년 : 한양대학교 기계공학부 학사
- 2001년 : 한양대학교 정밀기계공학과 석사
- 2009년 : 한양대학교 기계공학과 박사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- 주관심분야 : 가상현실, 햅틱스, 자동제어, 보행로봇



김 진 영

- 1991년 : 성균관대학교 기계설계학과 학사
- 2000년 : 성균관대학교 기계공학과 석사
- 2004년 : 성균관대학교 기계공학과 박사과정 수료
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- 주관심분야 : 다가체 모선제어, 애니메트로닉스, 동적영상매핑 알고리즘



이 설 희

- 2005년 : 경기대학교 기계시스템공학과 학사
- 2007년 : 한양대학교 기계공학과 석사
- 2008년 : LG전자
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-9244-9275>
- 주관심분야 : 매니퓰레이터, 병렬 메커니즘, 자율주행로봇, 무대 기술



김 주 혜

- 1988년 : 고려대학교 화학과 (학사)
- 1988년 ~ 1994년 : 한국화학연구원 연구원
- 1995년 ~ 2000년 : 조지아대(미), 섬유학 (석·박사)
- 2002년 ~ 현재 : 한국생산기술연구원, 수석연구원
- 주관심분야 : 기능성 소재 개발 및 가공



이 상 원

- 2002년 : 서울산업대학교 기계설계학과 학사
- 2004년 : 성균관대학교 기계설계 석사
- 2012년 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스 박사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- 주관심분야 : 이동 플랫폼 메커니즘 설계 및 구조해석, 안전 제어 시스템 설계, 병렬 메커니즘

---

저자소개

---

조자양



- 2012년 : 단국대학교 멀티미디어공학과 학사
- 2016년 : 한양대학교 컴퓨터공학과 석사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2292-2423>
- 주관심분야 : 실시간 분산제어, 모선 제어, 원격 제어, 자율 주행, 임베디드 시스템, 무대 기술

김형태



- 1996년 : 한양대학교 정밀기계공학과 학사
- 1998년 : 한양대학교 정밀기계공학과 석사
- 2005년 : 한양대학교 정밀기계공학과 박사
- 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼융합연구부문 수석연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5711-551X>
- 주관심분야 : 머신 비전, 빅데이터 병렬 처리, 영상 처리 알고리즘, 스펙트랄 이미징