

---

## 몰입형 4D 모션 효과의 자동 생성 시스템

### Automatic Generation of 4D Motion Effects

이재봉, Jaebong Lee\*, 최승문, Seungmoon Choi\*\*

---

**요약** 최근 영상에 다양한 모션과 환경 효과를 추가한 4D 영화관이나 4D 체험관이 큰 인기를 끌고 있다. 본 논문은 기존에 콘텐츠 제작자가 수동으로 제작해야만 했던 4D 모션 효과를 자동으로 생성해 주는 시스템을 제안한다. 먼저 일인칭 시점에서 촬영된 비디오에서 인접한 두 프레임 사이의 옵티컬 플로우(optical flow)를 검출 한 후 이를 바탕으로 카메라의 자체 운동(ego-motion)을 추정한다. 4D 모션 효과 생성 단계에서는 와시아웃 필터(washout filter) 알고리즘을 본 연구에 사용한 장비의 특성에 맞게 수정하여 사용하였다. 본 시스템을 통해 일인칭 시점 영상에 어울리는 4D 모션 효과를 자동으로 생성할 수 있었다. 본 연구 결과는 차후 4D 영화관이나 놀이기구 등에 사용될 수 있으며 전문가용 4D 콘텐츠 저작 도구의 편의 기능으로도 활용할 수 있을 것이다.

**Abstract** In this paper, we propose a system for automatic generation of 4D motion effects. Currently, contents manufacturers have to design 4D motion effects manually. However, our system can generate 4D motion effects automatically by analyzing video recorded in first person view. To this end, our system extracts optical flow from two adjacent frames to estimate ego-motion. Estimated ego-motion is passed to classical washout filter to drive our motion platform. Our system can be applied to 4D movie theater, 4D attractions and 4D effect authoring tools.

**핵심어:** 4D movie, 4D motion effects, Ego-motion estimation, Motion cueing, Washout filter

---

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A2A01016907, 2011-0027994, 2010-0019523).

\*주저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사과정 e-mail: novaever@postech.ac.kr

\*\*교신저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수 e-mail: choism@postech.ac.kr

### 1. 서론

최근 3D (또는 2D) 영상에 의자의 움직임, 진동, 물, 바람 등 다양한 모션 효과와 환경 효과를 적용한 4D 영화관이나 놀이기구, 체험관이 큰 인기를 끌고 있다. 특히 2009 년 CGV 가 세계 최초로 2 시간 분량의 일반 영화에 4D 효과를 입혀 상영을 시작한 이후, 현재까지 전국에 20 개 이상의 4D 상영관이 개설되었으며 일반 상업 영화에 4D 효과를 입혀 상시 상영하고 있다. 이외에도 놀이동산이나 각종 박물관 등에 4D 체험관이 널리 설치되어 운영되고 있다. 캐나다의 D-Box 사에서는 가정용 4D 장비와 콘텐츠까지 제작하여 판매하고 있다.

그러나 한 편의 4D 효과를 만들기 위해서는 전문 제작자가 수십번 이상 영상을 반복해서 보며 모든 4D 효과를 일일이 제작해야 하는 어려움이 있다. 따라서 4D 효과를 제작하는데 많은 비용과 시간이 들게 되며 이는 양질의 4D 콘텐츠가 부족한 현상의 주요 원인이 되고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 일인칭 시점의 영상을 분석하여 4D 모션 효과를 자동으로 생성해주는 시스템을 제안한다. 본 연구는 크게 영상으로부터 카메라의 자체 운동(ego-motion)을 추정해 내는 단계와 추정해 낸 자체 운동을 와시아웃 필터(washout filter) 알고리즘을 사용해 4D 장비의 모션 효과로 변환하는 단계로 구성되어 있다.

### 2. 카메라의 자체 운동 추정

본 장에서 설명하는 카메라 자체 운동 추정 알고리즘은 기본적으로 여러 개의 영상을 바탕으로 물체의 3D 형상을 복원하는 structure from motion 연구에서 사용하는 방법을 바탕으로 한다. 이에 관한 자세한 사항은 [1]을 참고하도록 한다.

먼저 영상의 인접한 두 프레임 사이의 옵티컬 플로우를 추출한다. 옵티컬 플로우는 기본적으로 Ce Liu 의 코드를 기반으로 구현하였으며 [2] 다음 두 논문에 기초하여 작성되었다 [3, 4]. 영상에서 옵티컬 플로우가 추출되면 이를 바탕으로 RANSAC 알고리즘을 이용하여 기초행렬(fundamental matrix)을 계산한다. 카메라 캘리브레이션 행렬(camera calibration matrix)을 안다고 가정했을 때, 다음 수식을 이용해 기초행렬 **K** 로부터 기본행렬(essential matrix) **E** 를 계산할 수 있다.

$$E = K^T F K \tag{1}$$

이렇게 얻은 기본행렬을 **UWV<sup>T</sup>** 로 특이값 분해(singular value decomposition)하면 다음 네 개의 가능한 카메라 행렬이 계산된다.

$$P1 = [I | 0]$$

$$P2 = [UWV^T | u_3], [UWV^T | -u_3], [UW^T V^T | u_3], [UW^T V^T | -u_3] \tag{2}$$

이 네 개의 가능한 카메라 행렬 조합을 이용해 3 차원 공간에 점들을 복원(reconstruction)한 후 점들이 두 카메라 앞쪽에 있는지 위치 관계를 판정함으로써 유일한 자체 운동 값을 계산해 낼 수 있다.

그림 1 과 2 는 직접 촬영한 영상에 본 알고리즘을 적용해 옵티컬 플로우와 카메라 자체 운동을 추정해본 결과이다.  $R_p, R_y, R_r$  은 각각 pitch, yaw, roll 방향의 회전을 나타낸다. 그림 1 은 우회전 구간에서 자체 운동 회전 각속도 변화를 나타낸 것으로 yaw 방향 회전이 잘 나타나고 있다. 그림 2 는 과속방지턱을 넘는 자체 운동이 pitch 방향 각속도의 변화로 잘 복원된 것을 나타낸다.

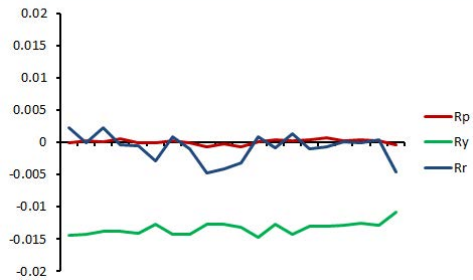
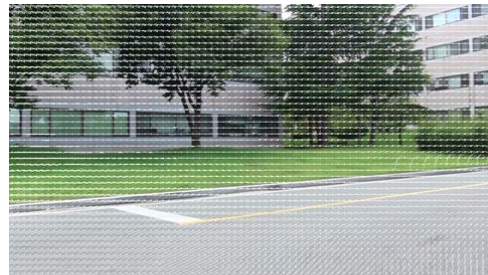


그림 1. 우회전 구간에서 각속도 변화

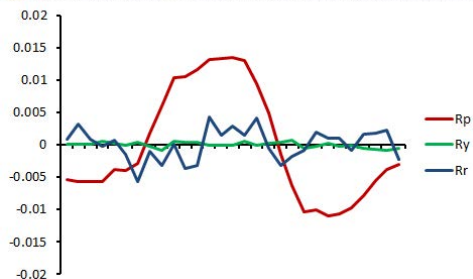


그림 2. 과속방지턱을 넘는 구간에서 각속도 변화

### 3. 4D 모션 효과 변환

카메라 자체 운동 추정 단계를 통해 두 프레임 사이 자체 운동, 즉, 선 속도 및 각 속도를 알 수 있다. 4D 모션 효과 변환 단계에서는 이 속도 정보를 4D 장비의 모션 효과, 즉, 4D 장비의 위치와 각도로 변환한다. 고전적인 와시아웃 필터 알고리즘을 [5] 사용하여 이를 수행하였다.

다만 본 연구에서 사용한 장비는 전문적이고 정확한 비행이나 운전 시뮬레이션을 위한 장비가 아닌, 엔터테인먼트 목적의 장비이므로 roll 과 pitch 방향 회전과 heave 방향 이동의 3 자유도만 재현이 가능하고 동작 범위도 각 방향으로  $\pm 3.1^\circ$ ,  $\pm 7.0^\circ$ ,  $\pm 2.5$  cm 에 불과하다. 따라서 그림 3 과 같이 알고리즘을 수정하여 적용하였다.

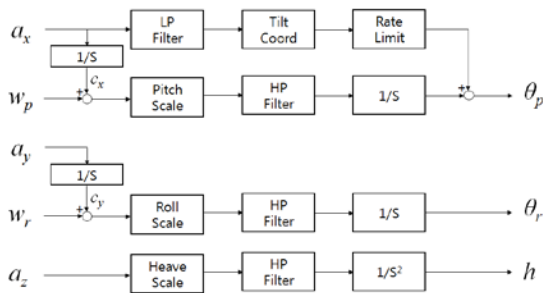


그림 3. 본 장비에 맞게 수정된 와시아웃 필터 알고리즘

여기서 와시아웃 필터의 입력에 해당하는 카메라의 자체 운동은  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ,  $w_p$ ,  $w_r$ ,  $w_y$  로 각각 surge, sway, heave 방향 가속도, pitch, roll, yaw 방향 각속도를 나타낸다. 본 장비에서 yaw 방향 회전을 재현할 수 있는 방법은 없으므로  $w_y$  값은 사용하지 않았다. 또한 surge 와 sway 방향으로도 선형 운동을 할 수 없으므로 이는 각각 pitch 와 roll 방향의 회전을 이용하여 재현해주었다. 4D 장비의 각도  $\theta$  가 매우 작다는 가정을 하면 그림 4 와 같이 원주의 길이  $l$  과 수평 방향 이동 거리  $x$  는 서로 거의 근사한다고 가정할 수 있으므로 다음 수식이 성립한다.

$$x \approx l = r\theta \propto \theta \tag{3}$$

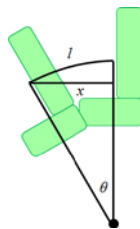


그림 4. 4D 장비의 각도와 수평 방향 위치의 관계

따라서 상수 배율을 곱해주면 선형 속도는 각속도로 근사하여 표현할 수 있다. 이에 따라 그림 3 에서  $a_x$  와  $a_y$  는 한 번 적분하여 속도로 변환 한 후 미리 정해진 상수  $c_x$ ,  $c_y$  를 곱하여 각각  $w_p$ ,  $w_r$  과 더해지게 된다.

4D 장비는 기본적으로 구동 범위가 제한되어 있으므로 지속적인 힘을 생성할 수는 없다. 따라서 가속도나 힘이 발생하기 시작하는 순간을 재현해 주는 것이 가장 좋은 방법이며 이를 구현하기 위해 하이패스 필터를 사용하였다. 이렇게 하면 빠르게 변화하는 고주파 대역의 값만 기기의 구동 명령으로 변환되게 된다. 그림 3 에서 특이한 것은  $a_x$  를 로우패스 필터에도 통과시킨다는 것이다. 이것은 회전을 이용해 한 방향으로 지속적인 힘을 느끼게 해주는 틸트 코오디네이션 (tilt coordination)이라는 기법을 사용하기 위함이다 [6]. 한 방향으로 4D 장비를 기울인 상태로 있으면 중력 때문에 사람은 마치 해당 방향으로 계속 힘을 받고 있는 듯한 착각을 하게 되는 원리를 이용한 방법이다.

최종적으로 이렇게 필터링 된 결과를 적분하여 pitch 와 roll 방향 각도 값과 heave 방향 위치 값을 얻어 4D 장비를 구동할 수 있다.

### 4. 결론

본 시스템을 통해 일인칭 시점의 영상을 분석하여 3 자유도 4D 모션 햅틱 효과를 자동으로 생성할 수 있었다. 차후 연구에서는 자동으로 생성된 모션 햅틱 효과와 사람이 직접 만든 효과를 비교하는 사용자 평가 실험을 실시하여 본 시스템의 성능을 객관적으로 비교, 검증할 계획이다.

### 참고문헌

[1] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision," 2nd Ed., Cambridge University Press, 2004.

[2] C. Liu, "Beyond Pixels: Exploring New Representations and Applications for Motion Analysis," Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2009.

[3] T. Brox, A. Bruhn, N. Papenberg, and J. Weickert, "High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping," In European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 25-36, 2004.

[4] A. Bruhn, J. Weickert and C. Schnorr, "Lucas/Kanade meets Horn/Schunck: combining local and global optical flow methods," International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol. 61, pp. 211-231, 2005.

[5] M. A. Nahon and L. D. Reid, "Simulator Motion-Drive Algorithms: A Designer's Perspective," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 13, pp. 356-362, 1990.

[6] M. Heyde and B. E. Riecke, "How to Cheat in Motion Simulation - Comparing the Engineering and Fun Ride Approach to Motion Cueing," Technical Report 089, Max-Planck-Institut, 2001.