

웨이브릿 기반의 에피폴라 평면 영상에서의 움직임 분석

장재건, 이형석, 박지훈
한신대학교 컴퓨터학과

Motion Analysis on the Wavelet-based Epipolar-Plane Images

Jae-Khun Chang, Hyoung-Suk Lee, Ji-Hoon Park
Department of Computer Science, Hanshin University

요약

본 논문은 연속적인 영상에서 움직이는 물체의 광류를 예측하는데 있어서 웨이브릿과 에피폴라 평면(Epipolar-Plane Images, EPI)을 사용하여 물체의 움직임을 분석하는 기법을 제안한다. 하나의 영상에서 물체의 특징을 찾는데 2차 웨이브릿 변환이 사용되고 있으나 연속적인 영상에 대한 분석에서 시간에 대한 또 하나의 변환을 해 줌으로써 움직이는 물체의 정보를 얻어낼 수 있다. 3차 웨이브릿 변환에서 유도된 데이터를 가지고 만들어지는 에피폴라 평면은 움직이는 물체의 광류를 예측하는데 있어서 기존의 방법보다 시간적으로 절약할 수 있다. 특히 서로 다른 방향에 대한 민감성을 보여 주는 웨이브릿 계수들은 움직이는 물체의 광류 예측에 많은 도움을 주고 있다. EPI 분석에서는 물체가 깊이 방향으로 움직이는 경우에도 물체의 각 에지들(edges)의 기울기를 분석함으로써 깊이 방향의 광류를 측정할 수 있다. 본 논문에서 제시한 3차 웨이브릿 변환과 EPI 기법의 조합으로 분석된 실험 결과와 그 전 연구들과의 비교가 마지막 부분에 서술되었다.

1. 서론

동적 환경에서의 인간의 시각 시스템(vision system)은 움직이는 물체에 대한 정보를 거의 무의식적으로 인식한다. 이런 물체의 움직임에 대한 연구는 오랫동안 발전되어 왔으나 아직도 인간의 시각 시스템을 이행하고 실행하는데는 많은 어려움이 있다. 특히 연속적인 영상에서의 '움직이는 물체'의 분석은 그 분석에 대한 정확성뿐만 아니라 시간적 측면에 있어서도 문제점들을 가지고 있다.

일반적으로 연속적인 영상에서 움직이는 물체의 광류 예측 혹은 움직임 분석은 다음의 세 가지 방법으로 나누어질 수 있다. 첫 번째 방법은 gradient 방법으로 영상에서의 공간적, 시간적 변화를 계산함으로써 광류를 예측하는 방법이다[8]. 이 방법은 gradient에 있는 잡음(noise)에 대하여 매우 민감한 단점이 있다. 두 번째 방법은 correspondence 방법으로 첫 번째 영상에서 물체의 점들, 선들, 혹은 지역들을 연속된 영상의 비슷한 부분과 대응을 시키는 방법이다[9]. 이 방법은 매핑되는 후보들 중에서 가장 잘 매핑되는 것을 찾는 것이다. 그러나 물체의 움직임이 빠르거나 occlusion이 생기는 경우 매핑에 어려움이 있다. 마지막 방법은 3차원 spatiotemporal 영상에서의 분석 방법이다[1][6][7]. Otsuka, et al[6] spatiotemporal 표면을 형성하는데 있어서 3차 Hough 변환을 사용하였다. 이 방법은 Hough 변환시 많은 계산 시간을 필요로 한다. 우리의 최근 연구[2]에서는 웨이브릿 계수들로부터 spatiotemporal 표면을 만들었으며 Monge patch 매개 변수를 이용하여 동적 움직임 분석을 하였다.

본 논문에서는 물체의 광류를 예측하는 방법으로 3차 웨이브릿 변환과 그 결과로 유도되는 웨이브릿 계수로부터 EPI를 분석하는 방법을 제안한다. 연속된 영상들에서 각 프레임의 2차 웨이브릿에

서 유도된 EPI는 움직이는 물체 이외의 많은 잡음을 갖는다[4]. 시간에 대해 웨이브릿을 한 번 더 해 줌으로써 잡음을 없앨 뿐 아니라 계산되는 데이터의 양도 많이 줄일 수 있다. 또한 웨이브릿에서 유도된 EPI에서 구해주는 기울기는 물체의 깊이에 대한 광류를 측정하는데 사용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 광류 예측에서 사용되는 기본적인 웨이브릿 분석을 설명하고, 3장에서는 웨이브릿에서 유도되는 데이터로 만들어지는 EPI 분석에 대하여 설명한다. 4장에서는 웨이브릿과 EPI 분석을 이용한 광류 예측을 실험하고 결과를 분석한다. 마지막 장은 논문에 대한 결론과 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

2. 웨이브릿 분석(Wavelet Analysis)

$L^2(\mathbb{R})$ 공간의 함수 f 에 대한 웨이브릿 분해(decomposition)는 단순 함수 ϕ 의 평행 이동된 확장들의 1차적 조합으로 표시할 수 있다. 즉, $f \in L^2(\mathbb{R})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(x).$$

여기서 $c_{j,k}$ 는 정수 j 와 k 에 대한 웨이브릿 계수이며, $\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \phi(2^j x - k)$ 이다. 웨이브릿을 구성하기 위해서는 실제값의 scaling 함수 $\phi(x)$ 가 필요하다. 하나의 벡터 공간 V_0 에서 다른 해상도에서의 함수 $f(x)$ 에 대한 근사값을 알기 위해서 정수 j, k 에 대하여 다음의 함수가 사용된다.

$$\phi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \phi(2^j x - k).$$

다해상도 분해에서 초기 신호는 첫 단계에서 1차 필터로 분해된

다. 그런 다음 신호는 근사(approximation) 영상과 세부(detail) 영상으로 나누어진다. 두 번째 단계에서는 다시 웨이브릿 분해가 첫 단계에서 얻어진 근사 영상에서 이루어진다. 이러한 단계에서 scaling 함수 $\phi(x)$ 는 low pass 필터이고, 웨이브릿 함수 $\psi(x)$ 는 high pass 필터이다.

다차원 신호에 대한 웨이브릿 분해를 얻는 방법으로는 Mallot[5]이 사용한 방법과 같이 1차원의 scaling 함수와 웨이브릿 함수를 각 차원에 대하여 적용하는 것이다. 2차 신호에 대한 웨이브릿 분해로 얻어지는 함수는 1개의 scaling 함수와 3개의 웨이브릿 함수이며, 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \phi(x)\phi(y), & \mu^1(x, y) &= \phi(x)\psi(y), \\ \mu^2(x, y) &= \psi(x)\phi(y), & \mu^3(x, y) &= \psi(x)\psi(y). \end{aligned}$$

영상에 대한 2차 웨이브릿 함수들은 각 방향에 대하여 민감한 반응을 보인다. 첫 웨이브릿 필터 μ^1 은 수직 방향으로 높은 주파수에 민감하므로 수평 에지들에 대하여 높은 값을 갖는다. 두 번째 필터 μ^2 는 수평 방향으로 높은 주파수에 민감하므로 수직 에지들에 대하여 높은 값을 갖고, 마지막 필터 μ^3 는 모퉁이나 대각선들에 대하여 높은 값을 갖는다. 3차 웨이브릿에 대한 표현은 연속적인 영상을 사용하므로 시간 t에 대한 또 하나의 방향을 생각한다. 3차 웨이브릿 변환에 있어서 scaling 함수는 다음과 같다.

$$\phi(x, y, t) = \phi(x)\phi(y)\phi(t).$$

또한 scaling 함수 이외에 웨이브릿 함수와 관련된 일곱 개의 웨이브릿 계수, $\mu^1-\mu^7$, 가 유도된다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 각 웨이브릿 계수는 서로 다른 방향에 대해 높은 민감성을 나타낸다.

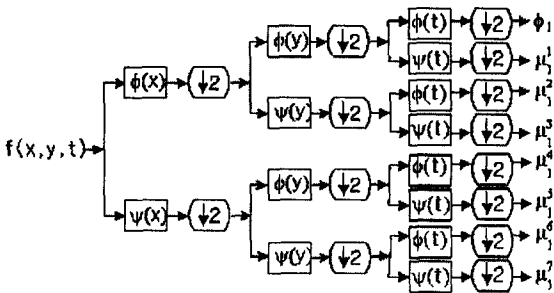


그림 1. 3차 웨이브릿 분해 구성도

위의 웨이브릿 계수들 중에서 물체의 움직임을 분석하기 위해서 본 연구에서는 시간 방향에 높은 반응을 갖는 웨이브릿 계수 μ^7 과 μ^6 를 다음 단계에 사용한다. 이와 함께 두 웨이브릿 계수를 조합한 새로운 계수도 EPI분석에서 두 계수들의 데이터와 비교해 본다. 이러한 웨이브릿 계수들을 사용하면 다음 분석 단계에서 물체의 광류를 예측하는데 있어서 처리 시간을 절약할 수 있다.

3. EPI 분석

EPI 분석에서 각 에피플라 평면 영상은 연속적인 프레임들의 주사선(scan line)들을 모아서 구성되며, 그 평면에서 물체의 움직임은 선형 형태로 나타난다[1]. 화면에서 하나의 물체는 그 것이 주사되는 동안 단 하나의 에피플라 평면에 나타난다. 각 화소에 대한 영상 흐름 속도(image flow velocity)는 연속 영상의 spatiotemporal 입방체에서 수직, 수평으로 만들어지는 EPI에서 물체의 기울기로

구해 줄 수 있다. 다단계의 웨이브릿에 의해 구해지는 에지들은 이런 방법의 분석에 있어서 자동적으로 올바른 EPI 형태를 만들어 준다. 만약 하나의 물체가 깊이 방향으로 이동한다면 그 물체의 에지들은 EPI 상에서 기울기가 발산(diverge)되는 현상을 보인다. 이런 경우 물체가 회전하는지 혹은 이동하는지에 대한 구분이 애매하다. 물체가 깊이 방향, 즉, x와 z 방향으로 이동하는 경우에는 움직임에 대한 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_x = (V_z x - V_y), \quad u_y = V_z y$$

여기서 u_x 와 u_y 는 영상 흐름 속도이고, x와 y는 영상축을 나타내며, V_x 와 V_z 는 깊이 비율의 물체의 속도이다. EPI에서 구한 영상 흐름 속도와 위의 방정식으로부터 물체의 속도를 구해 줄 수 있다.

실제 속도와 EPI 분석에서 구한 속도의 에러를 계산하는 방법으로 RMS(root mean square) 에러 계산 방법을 사용한다. 이 방법의 식은 다음과 같다.

$$E^2 = \sum_{x \in S} [f(x) - \sum_{i=0}^j k_i p_i(x)]^2$$

여기서 S는 다항식의 색인 집합이고 k_i 는 다음과 같이 표시된다.

$$k_i = \frac{\sum_{x \in S} p_i(x)f(x)}{\sum_{x \in S} p_i^2(x)}$$

4. 실험결과

실험에서 사용된 연속 영상은 실험실 안에서 육면체 박스를 x축과 z축 방향으로 이동시키는 영상이다. 전체 영상은 64 프레임으로 실험되었으며 각 영상은 128 × 128의 크기이고, 각 화소는 8 bit의 gray scale이다. 그림 2는 연속 영상의 첫 번째와 마지막 영상을 보여주고, 그림 3은 전체 영상에서 만들어지는 spatiotemporal 입방체를 보여준다.

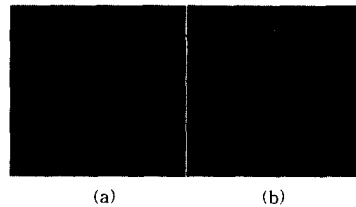


그림 2. 실험용 영상 (a) 첫 번째 영상 (b) 마지막 영상



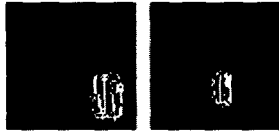
그림 3. 연속 영상으로 만들어진 spatiotemporal 입방체

3차원 영상인 spatiotemporal 입방체에 대한 3차 웨이브릿 변환은 먼저 64개의 연속 영상 각각에 대하여 Daubechies' W6 웨이브릿 [3]을 사용하여 x축과 y축에 대한 2차 웨이브릿 변환을 하였고, 같은 웨이브릿 basis를 사용하여 시간 방향으로 1차 웨이브릿을 하였

다. 일곱 개의 3차 웨이브릿 계수들 중에서 시간 방향에 민감한 μ^3 와 μ^5 를 EPI를 만드는데 사용하였다. 또한 두 개의 계수들의 합으로 이루어지는 새로운 웨이브릿 계수값도 EPI 결과 비교에 사용되었다. 그림 4는 2차 웨이브릿에 의한 결과의 예를 보여주며, 그림 5는 3차 웨이브릿에서 유도된 웨이브릿 계수 중 μ^2 과 μ^5 를 조합한 결과의 예를 보여 준다.



(a) 첫 번째 영상 (b) 중간 영상 (c) 마지막 영상
그림 4. 2단계 2차 웨이브릿 결과



(a) 프레임 11과 12 (b) 프레임 41과 42
그림 5. 웨이브릿 계수 μ^2 과 μ^5 를 합한 3차 웨이브릿 결과

3차 웨이브릿 결과로 만들어지는 EPI에서 주사선은 물체의 에지가 포함된 수평선을 선택하였다. 두 에지들은 물체가 깊이로 움직이므로 평행하지 않고 서로 다른 기울기를 갖는다(그림 6). 그림 6에서 가로 축은 공간에 대한 축이며, 세로 축은 시간에 대한 축이다.



(a) μ^2 (b) μ^5 (c) $\mu^2 + \mu^5$
그림 6. 3차 웨이브릿 기반의 EPI

연속 영상에서 움직임 분석에 대한 결과는 표 1에 나타나 있다. 세 개의 웨이브릿 계수를 이용한 결과의 비교와 실제 속도와의 차이를 RMS로 나타내었다. 표 1에서 볼 수 있듯이 μ^2 과 μ^5 를 합해서 계산한 값과 μ^3 만으로 계산한 값과의 차이는 거의 없다. 이 결과는 우리가 전에 연구한 것들[2][4]과 비교하면 2차 웨이브릿 EPI 분석보다는 RMS 에러가 적으며, 잡음에 대해서도 좋은 결과가 나타났다. 물체가 평행 이동의 경우 웨이브릿 흐름 표면 방법보다는 계산 시간을 절약할 수 있다.

표 1. 연속 영상에서 물체의 움직임 분석 결과

| 웨이브릿 계수 | V_x | V_z | RMS 에러(%) |
|-----------------|--------|-------|-----------|
| $\mu^2 + \mu^5$ | -15.25 | -7.9 | 1.1 |
| μ^3 | -15.25 | -7.8 | 1.2 |
| μ^5 | -16.01 | -8.1 | 2.0 |

5. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 연속 영상에서 물체의 움직임을 분석하는데 있어서 3차 웨이브릿과 EPI를 조합한 분석 방법을 제안하였다. 동적 영상 분석에서 문제점이 되고 있는 분석 계산 시간을 화면의 시간적 변화에 민감한 3차 웨이브릿을 통하여 데이터를 구했으며, 광류 계산에서는 주사선을 이용한 EPI 방법을 사용하였다. 실험에 사용한 영상은 물체의 이동이 일반적인 수평, 수직 이동이 아닌 깊이와 수평 이동이 함께 되는 연속 영상을 사용하여 결과를 측정하였다.

앞으로 연구할 분야는 물체가 회전하는 경우, 회전과 이동을 같이 하는 경우, occlusion/disocclusion 경우들에 대한 동적 영상 분석과 한 영상에서 여러 물체가 다른 속도와 다른 방향으로 움직일 경우 각 물체의 움직임을 분석하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] H. H. Baker and R. C. Bolles, "Generating Epipolar-Plane Image Analysis on the Spatiotemporal Surface", International Journal of Comp. Vision, Vol. 3, 1989, pp 33-49.
- [2] Jae-Khun Chang and T. L. Huntsberger, "Dynamic motion analysis using wavelet flow surface images", Pattern Recognition Letters, Vol. 20, No. 4, 1998, pp 383-393.
- [3] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, CBMS 61, SIAM, 1992.
- [4] T. L. Huntsberger, Jae-Khun Chang and B. Jawerth, "Wavelet Analysis of Fused EPI Sequence", Proc. SPIE Sympos. Sensor Fusion VII, Vol. 2355, Boston, MA., Oct. 30-Nov. 1, 1994, pp 157-163.
- [5] S. G. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet representation", IEEE Trans. PAMI Vol. 11, No. 7, July, 1989, pp 674-693.
- [6] K. Otsuka, T. Horikoshi, and S. Suzuki, "Image velocity estimation from trajectory surface in spatiotemporal space", Proc. IEEE CVPR, Puerto Rico, 1997, pp 200-205.
- [7] R. Rangachar, T. H. Hong, M. Herman and R. Luck, "Analysis of Optical Flow Estimation Using Epipolar Plane Images", Proc. SPIE Sympos. Intelligent Robots and Computer Vision IX: Neural, Biological, and 3-D Methods, SPIE Vol. 1382, Boston, MA., Nov. 7-9, 1990, pp 376-385.
- [8] M. A. Snyder, "On the mathematical foundations of smoothness constraints for the determination of optical flow and for surface reconstruction", IEEE Trans. PAMI 13 (11), 1991, pp 1105-1114.
- [9] Z. Zhang, "Estimating motion and structure from correspondences of line segments between two perspective images", IEEE Trans. PAMI 17 (12), 1995, pp 1129-1139.