

Periodogram을 사용한 움직임 추정에서의 속도 Pairing

정회원 장수영*, 이병욱*

Velocity Pairing in Motion Estimation using Periodogram

Soo-Young Chang*, Byung-Uk Lee* *Regular Members*

요 약

움직이는 여러 개 물체의 속도를 추정하는 방법으로 피리오도그램 (periodogram)을 사용하는 방법이 있다. 이는 영상 시퀀스를 프레임별로 수직과 수평 방향으로 투사를 한 후 시간축 FFT를 실행한다. FFT를 실행하면 2차원 주파수 도메인에서 선이 나타나게 되는데, 이 선의 기울기가 속도로 나타난다. 2차원 주파수 도메인에서 원점을 지나는 직선상의 화소들의 에너지를 합하여 움직이는 물체의 속도를 추정하게 된다. 물체가 두 개 이상일 경우에는 각각의 움직이는 속도에 해당하는 여러 개의 피크 값들을 검출하게 된다. 이 피크 값들을 짝지어 주게 되면 물체 각각의 속도가 나오게 된다. 본 논문의 방법은 기존의 수평, 수직 투사 이외에, 투사의 방향을 추가하여 수평 수직 방향 속도 성분을 짝지워줬다. 기존의 논문들에 비해 간단한 계산으로 움직이는 물체의 속도를 효과적으로 짝지울 수 있다.

키워드: 움직임 추정

ABSTRACT

A fast multiple object motion detection method using periodogram has been proposed. Each frame is projected to vertical and horizontal directions, and then temporal FFT is applied. A line in two dimensional frequency domain indicates velocity. To estimate the velocity of an object, we integrate along a line which passes through the origin in frequency domain. If a frame contains multiple moving objects, multiple peaks are detected corresponding to the velocity of each object. After pairing these peaks, we can determine the velocities of an object. In the proposed method we can easily pair horizontal and vertical velocity components efficiently with simple computation by combining projections in 45° and 135° directions in addition to the vertical and horizontal direction.

I. 서 론

시 변환 영상에서 이동 물체의 속도를 추정하는 것은 컴퓨터 비전과 영상 부호화의 중요한 연구 과제로서 많은 연구가 이루어지고 있다. 프레임간의 영상 압축에서 움직임 추정 및 보상이 중요한 역할을 한다. 서로 다른 시점이 나 위치 또는 서로 다른 감지기에서 채택된 두

영상간의 변환관계를 추출하여 공통되는 부분에 위치를 맞추는 영상 등록, 의료영상 등에도 다양하게 응용된다^[1]. 두 개 이상의 이동 물체를 검출하거나 추정하는 것은 더욱 힘들다. 교통량 추정이나 기상 관측 사진이나 비디오에서 여러 개의 물체를 추정하는 경우가 이에 해당된다.

움직이는 물체 추정은 영상 도메인이나 주파

* 이화여자대학교 정보통신학과 영상신호처리 연구실 (bulee@ewha.ac.kr)
 논문번호 : 010010-0219, 접수일자 : 2001년2월19일

수 도메인에서 수행할 수 있다. 영상 도메인 알고리즘은 움직임 파라미터의 광학 흐름 (optical flow)을 검출하여 추출하는 방법과, 각 영역별로 움직임 벡터를 찾는 방법 등이 있다^[2]. 주파수 도메인에서는 다음과 같은 방법이 있다. 영상에 선형적으로 움직이는 물체가 있다면 이 함수의 3차원 푸리에 변환은 원점을 지나가는 선으로 나타나고 그것의 기울기는 움직임 패턴의 속도를 나타낸다. 3차원 FFT를 하고 그것의 에너지 집중도를 찾아보면 속도를 추정할 수가 있다^{[2][3]}.

기존의 방법에서는 물체가 두 개 이상일 경우 수평, 수직 방향으로 투사를 한 후 x, y 의 속도 성분을 짝지우는데 모든 경우의 수를 고려하여야 했다^{[3][4]}. 또, 최근에 제안된 방법은 퍼지 C-Planes 클러스터링 방법을 사용한 방법이 있다. 클러스터링 방법은 x 방향의 속도성분을 고정한 후 y 방향 속도성분을 찾을 때 반복적으로 찾아주기 때문에 복잡하고 시간이 오래 걸린다^[5]. 본 논문에서는 x 축(0°), y 축(90°), 45° 축, 135° 축으로 투사를 한 후 시 변환 FFT를 실행하여 간단히 속도성분을 짝지워주었다. 그리고 투사를 한 후 시 변환 FFT를 실행하기 때문에 계산량이 현저히 줄어들었다.

본 논문의 구성은 본론에서 기존의 움직임 추정 이론을 살펴보고 본 논문에서 제안된 주파수 도메인 물체 속도 추정 방법과 여러 경우의 실험결과를 제시하고 기존의 알고리즘과의 계산량 비교를 살펴본 후 마지막으로 결론을 내렸다.

II. Periodogram을 이용한 기존 움직임 추정 이론

페리오도그램(Periodogram)은 파워 스펙트럼을 추정하는 것인데, 여기서는 공간에서 투사값을 푸리에 변환을 하고 시간에 대해서 푸리에 변환을 한 값의 절대값을 제곱하여 보여준 값을 의미한다^{[4][6]}. 기존의 주파수 도메인에서의 움직임 추정은 다음과 같이 이루어진다.

만일 여러 개의 물체가 속도 $v=[v_x, v_y]^T$ 로 평행이동 할 때 움직이는 영상을 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$g(x, y, t) = \sum_{k=1}^p m^{(k)}(x-x_0^{(k)}-v_x t, y-y_0^{(k)}-v_y^{(k)} t) + s(x, y) \quad (1)$$

이 때 p 는 물체의 개수를 나타내며, m 은 물체의 밝기, x_0 와 y_0 는 $t=0$ 일 때의 위치를 나타내고 v_x, v_y 는 각각의 방향에 해당하는 속도를 나타낸다. $s(x, y)$ 는 배경의 밝기를 나타낸다. 만일 배경의 밝기가 0이라면 $s(x, y)=0$ 이 된다.

여기서 투사를 정의하는데 x 축으로 투사하는 것을 $P_x(x, t)$ 라 한다. 이는 주어진 x 값에 대한 직선상의 모든 y 값에 해당하는 화소 값의 합을 뜻한다.

$$P_x(x, t) = P_x\{g(x, y, t)\} = \sum_y g(x, y, t) \quad (2)$$

$P_x(x, t)$ 에서는 수평방향의 속도 v_x 로 움직이는 성분을 검출할 수 있다. 만일 x 축, y 축이 아니라 x 축에서 θ 의 각도로 기울어진 축을 s 축이라고 하면 투사한 함수는 $P_\theta(s)$ 이다. 이 때 $P_\theta(s)$ 에서는 프레임 당 $v_x \cos(\theta) + v_y \sin(\theta)$ 의 속도로 움직이는 성분을 알 수 있다.

앞의 설명처럼 먼저 투사된 함수 $P_x(x, t)$ 를 구한다. 이 함수를 속도와 시간에 관한 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_x(x, t) = f(x - v_x t) \quad (3)$$

2차원 주파수의 스펙트럼은 $F(w_x, w)$ 로 표시한다.

앞의 함수 $f(x - v_x t)$ 를 2차원 DFT 한다.

$$F(w_x, w) = \sum_{t=0}^{L-1} \sum_{x=0}^{N-1} f(x - v_x t) e^{-j2\pi w_x x/N} e^{-j2\pi w t/L}$$

$$= \sum_{t=0}^{L-1} F(w_x) e^{-j2\pi w_x v_x t/N} e^{-j2\pi w t/L}$$

$$= \sum_{t=0}^{L-1} F(w_x) e^{-j2\pi(w_x v_x/N + w/L)t} \quad (4)$$

여기서 $F(w_x)$ 는 $f(x)$ 를 N -point DFT한 것이다. 이 때 위의 식의 일부를 다음과 같이 나타낼 수 있다. $e^{-j2\pi(w_x v_x/N + w/L)t} \neq 1$ 인 경우 다음과 같이 나타낸다.

$$\sum_{t=0}^{L-1} e^{-j2\pi(w_x v_x/N + w/L)t}$$

$$= \frac{1 - \{e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)}\}^L}{1 - e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)}} \quad (5)$$

따라서

$$F(w_x, w) = F(w_x) \cdot \frac{1 - \{e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)}\}^L}{1 - e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)}} \quad (6)$$

가 되고,

$$e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)} = 1 \text{ 일 때는}$$

$$\sum_{i=0}^L e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)} = \sum_{i=0}^L (1) = L \text{ 이므로 다음}$$

과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(w_x, w) = F(w_x) \cdot L \quad (7)$$

$F(w_x, w)$ 값이 최대 값이 될 때는

$$e^{-j2\pi(w_x v_x / N + w/L)} = 1 \text{ 이 될 때이다.}$$

즉, $w_x v_x / N + w/L = 0$ 일 때가 최대 값이 되게 된다.

$$w_x v_x / N + w/L = 0$$

$$\frac{w_x v_x}{N} = -\frac{w}{L} \quad w = -\frac{L}{N} v_x w_x \quad (8)$$

여기서 L 은 시간 축 상의 데이터 수를 나타내며 N 은 영상의 크기를 나타낸다. 2차원 주파수 피리오도그램(periodogram)에서 보면 w 와 w_x 평면상의 직선으로 나타나게 된다.

$R(v_x)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$R(v_x) = \frac{1}{n(v_x)} \sum |F(w_x(i), w(j))|^2 \quad (9)$$

원점을 지나는 선 위에 있는 픽셀값의 절대값을 모두 더한 후 픽셀의 개수로 나누어 정규화해준다. 이 때 $R(v_x)$ 의 피크 값에 해당하는 x 축의 값이 x 방향 속도에 해당되는 것이다.

$$\hat{v}_x = \arg \max_{v_x} R(v_x). \quad (10)$$

y 방향 속도에 대해서도 똑같은 방법으로 구한다.

III. 속도 성분을 짝지우는 방법

1. 기존의 방법

기존의 방법으로는 모든 가능한 짝지우는 것(pairing)에 대해서 프레임의 차이를 계산하여

영상의 차이가 가장 적게 나는 짝(pair)으로 선택하는 방법이 있다^{[3][5]}. 또 다른 방법은 영상 시퀀스를 시간적 투사(Temporal Projection)를 하게 된다. 시간적 투사를 한 것을 $s(x, y) = \sum_t f(x, y, t)$ 로 나타낼 수 있다. 이 $s(x, y)$ 를 다시 2차원 FFT를 해 준다. 이것을 $S(w_x, w_y)$ 로 나타낼 수 있다. 이것은 3차원 푸리에 변환 $F(w_x, w_y, w)$ 에서 $w_t = 0$ 이 되는 것과 같다. 그러므로 $v_x w_x + v_y w_y = 0$ 에서 기울기는 $-\frac{v_x}{v_y}$ 가 된다. 여기서 $v_x(i)$ 는 고정 시키고 $v_y(j)$ 를 바꿔 주면서 서로 대응되는 짝을 찾는다^[2].

2. 제안된 Paring 개선 방법

제안된 방법은 기존의 방법들과 달리 이미 피리오도그램(periodogram)에서 찾은 성분들로 대응되는 짝을 찾을 수 있기 때문에 기존의 방법들처럼 짝지우기 위해서 새로이 시간적 투사나 2차원 FFT를 더 할 필요가 없다. 45° 방향이나 135° 방향의 속도식에서 x 방향 속도 성분을 고정하고 y 방향 속도 성분을 찾는다. 45° 축과 135° 축으로 투사를 한 후 피리오도그램(periodogram)을 나타내서 움직이는 물체의 속도를 추정할 수 있다. 45° 축과 135° 축으로 투사한 것은 다음 그림과 같이 x 축을 0° 축이라고 하면 x 축에 대하여 각각 45°와 135° 만큼 기울어진 축을 중심으로 투사하는 것으로 하였다. 45° 축과 135° 축으로 투사하는 것을 각각 $P_{45}(x, t)$ 와 $P_{135}(x, t)$ 라 한다. 위의 x 와 y 에 대한 식에서처럼 해당 축에서 어떤 선을 그었을 때 선 위의 값에 해당하는 모든 화소의 합을 뜻한다. 이 때 sample의 수는 $2N-1$ 이 된다. 투사된 함수는 속도와 시간에 관한 함수로 다음과 같이 정의한다.

$$P_{45}(k_{45}, t) = f(k_{45} - v_{45} t) \quad (11.1)$$

$$P_{135}(k_{135}, t) = f(k_{135} - v_{135} t) \quad (11.2)$$

x 축에서 θ 의 각도로 투사한 함수 $P_\theta(s)$ 에서는 프레임 당 $v_x \cos(\theta) + v_y \sin(\theta)$ 의 속도로 움직이므로,

$$v_{45} = \frac{v_x}{\sqrt{2}} - \frac{v_y}{\sqrt{2}} \quad (12.1)$$

$$v_{135} = \frac{v_x}{\sqrt{2}} + \frac{v_y}{\sqrt{2}} \quad (12.2)$$

2차원 주파수는 $F(w_{45}, w)$, $F(w_{135}, w)$ 로 정의한다.

projection식에서 45° 축에 대한 것만 전개해 보면 다음과 같다.

일단 앞의 함수 $f(k_{45} - v_{45}t)$ 를 DFT 한다.

$$\begin{aligned} F(w_{45}, w) &= \sum_{t=0}^{L-1} F(w_{45}) e^{-j2\pi w_{45} v_{45} t / N} e^{-j2\pi w t / L} \\ &= \sum_{t=0}^{L-1} F(w_{45}) e^{-j2\pi (w_{45} v_{45} / N + w / L) t} \end{aligned} \quad (13.1)$$

같은 방식으로 $f(k_{135} - v_{135}t)$ 도 DFT하여 전개한다.

$$\begin{aligned} F(w_{135}, w) \\ = \sum_{t=0}^{L-1} F(w_{135}) e^{-j2\pi (w_{135} v_{135} / N + w / L) t} \end{aligned} \quad (13.2)$$

여기서 L은 시퀀스의 수를 나타내며 N은 샘플의 수를 나타낸다. 여기서 N은 너비 (width) x 높이 (height) -1로 나타나게 된다.

위와 마찬가지로 2차원 주파수 피리오도그램 (periodogram)에서 보면 w 와 w_{45} w 와 w_{135} 평면상의 선으로 나타나게 된다.

$R(v_{45})$ 와 $R(v_{135})$ 에서 $R(v_{45})$, $R(v_{135})$ 의 피크 값이 각각 45° 방향, 135° 방향의 속도에 해당되는 것이다.

$$\widehat{v}_{45} = \arg \max_{v_{45}} R(v_{45}). \quad (14.1)$$

$$\widehat{v}_{135} = \arg \max_{v_{135}} R(v_{135}). \quad (14.2)$$

위의 \widehat{v}_{45} 와 \widehat{v}_{135} 속도는 \widehat{v}_x 와 \widehat{v}_y 속도를 그 방향으로 투사한 것이다.

$$\frac{v_x}{\sqrt{2}} - \frac{v_y}{\sqrt{2}} = -\widehat{v}_{45} \quad (15)$$

$$\frac{v_x}{\sqrt{2}} + \frac{v_y}{\sqrt{2}} = -\widehat{v}_{135} \quad (16)$$

위의 식을 연립하여 \widehat{v}_x , \widehat{v}_y 라는 속도를 추정할 수 있다.

움직이는 물체가 두 개 이상일 때는 $R(v_x)$, $R(v_y)$, $R(v_{45})$, $R(v_{135})$ 피크값이 두 개 이상 나오게 된다. 이 때 물체가 p개라고 하면 line integral을 했을 때 나타나는 피크중 p개의 높은 피크가 각 방향의 속도 성분을 나타내 준다.

선을 검출하는 방법으로 제일 잘 알려진 방법으로는 허프 변환 (Hough Transform)이 있다. 그리고 요즘은 더 발달한 어레이 프로세싱 방법도 많이 쓰이고 있다.

본 논문에서는 허프 변환과 브레센햄의 라인 알고리즘 (Brensenham's Line Algorithm)에서 아이디어를 가져와서 사용하였다^[6]. 본 논문에서 사용한 방법은 허프 변환이 2차원 주파수 대역에서의 모든 가능한 선들을 조사하는 전통적인 방법인데 반해 원점을 지나는 화소들의 에너지를 합하여 움직이는 물체의 속도를 추정하게 된다. 원점을 지나는 화소들의 에너지가 최대가 될 때가 바로 그 지점이 해당속도로 나타나게 되며 위의 식에서처럼 에너지를 합한 후 해당 화소 수로 나누어서 정규화 하게 된다.

이 때 line integral하는 순서는 피리오도그램의 왼쪽 위에서부터 시작하여 아래쪽 밑의 부분까지 차례로 더하게 된다.

2차원 주파수 대역에서 원점을 지나는 화소수를 합할 때는 선을 그었을 때 선에 가장 가까운 화소를 취하게 된다.

각 방향의 속도 성분은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V_x = \{ \widehat{v}_x(1), \widehat{v}_x(2), \dots, \widehat{v}_x(p) \} \quad (17.1)$$

$$V_y = \{ \widehat{v}_y(1), \widehat{v}_y(2), \dots, \widehat{v}_y(p) \} \quad (17.2)$$

이 때 추정된 각 성분이 p개라고 하면 p개의 물체에 대해서 속도를 알아내야 한다. 이 때 각 물체마다 각 방향의 성분이 존재하므로 x방향 속도와 y방향 속도를 짝지어 주는 (pairing) 작업이 필요하다. 이 때 45° 와 135° 방향의 속도를 알면 45° 와 135° 의 식에 v_x , v_y 값을 넣음으로써 각 방향 속도의 성분을 알아낼 수 있다. 45° 와 135° 방향의 속도가 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{45} = \{ \widehat{v}_{45}(1), \widehat{v}_{45}(2), \dots, \widehat{v}_{45}(p) \} \quad (18.1)$$

$$V_{135} = \{ \widehat{v}_{135}(1), \widehat{v}_{135}(2), \dots \}$$

$$\widehat{v}_{135}(p) \quad (18.2)$$

45° 와 135° 방향의 속도를

$$\frac{v_x}{\sqrt{2}} - \frac{v_y}{\sqrt{2}} = -\widehat{v}_{45}, \quad \frac{v_x}{\sqrt{2}} + \frac{v_y}{\sqrt{2}} = \widehat{v}_{135}$$

식에 넣은 후 x 방향 속도를 고정하고 y 방향 속도를 바꿔 넣어주면서 x 방향 속도에 대응하는 y 방향 속도를 구해 준다. 이렇게 하여 V_x 와 V_y 의 성분들을 짝지어 줄 수가 있다.

3. 기존 알고리즘과의 계산량 비교

만일 어떤 영상 시퀀스가 $N_x = N_y = N_t = N$ 이라고 가정하면 x축 화소 개수와 y 축 화소 개수, 그리고 영상 프레임 수가 N으로 같다는 것이 된다. 이 때 본 논문에서 제안된 알고리즘으로 계산량을 계산해 보면 다음과 같다.

- 1) 투사는 x축, y축, 45° 축, 135° 축을 포함하여 대략 $O(6N^3)$ 정도의 계산량을 필요로 한다.
- 2) 시 변환 FFT는 대략 $O(4N^2 \log_2 N)$ 의 계산량을 필요로 한다.
- 3) Line Integral은 약 $O(2N^2)$ 의 계산량을 필요로 한다.
- 4) 각 방향의 속도 성분을 짝지우는 것은 약 $O(2N^2)$ 의 계산량을 필요로 한다.

따라서, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 사용할 경우 전체적으로 $O(6N^3)$ 의 계산량이 필요로 함을 볼 수 있다. 3차원 FFT 방법의 경우 $O(N^3)$ 의 계산량을 필요로 하고 광학 흐름(optical flow)의 밝기 요소를 이용하는 방법의 경우도 만일 $N \times N$ 크기의 영상일 경우 $O(N^3)$ 의 계산량을 요구한다^[2]. 만일 이 크기의 영상이 N 프레임이라면 계산량이 $O(N^4)$ 으로 늘어나게 된다. 그러므로 표 1.에서 보는 바와 같이, 영상의 크기가 크거나 프레임이 긴 영상일수록 본 논문에서 제안한 방법으로 움직이는 물체의 속도를 추정할 경우 계산량이 줄기 때문에 효과적이라고 볼 수 있으며 영상의 종류에 무관하게 사용할 수 있다.

IV. 실험 결과 및 분석

1. 실험 방법

물체의 움직임을 추정하는 방법은 다음과 같다.

영상크기	256×256	512×512
3차원 FFT	8.5×10^{11}	1.3×10^{13}
광학흐름 방법	3.3×10^9	2.7×10^{10}
제안된 방법	7.9×10^7	3.1×10^8

표 1. 영상크기에 따른 계산량 비교(200 프레임)

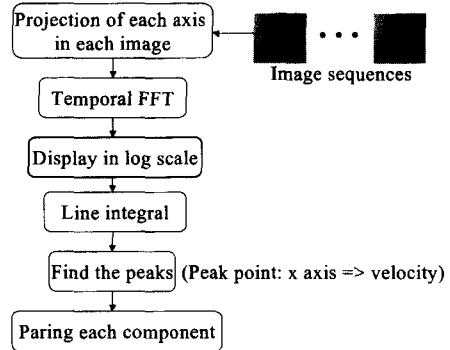


그림 1. 실험 방법

영상 시퀀스를 각 방향으로 투사를 한 후 각 프레임마다 투사된 샘플을 FFT하고 각 샘플에 대해서 temporal FFT를 한다. 그렇게 나온 피리오도그램(periodogram)에 대해서 로그 스케일로 표현해 준다. 로그 스케일은 변화 범위가 넓을 때 미세한 성분을 키워서 잘 보이게끔 나타내 준다. 이 피리오도그램을 line integral 해주어서 피크값을 찾아준다. 그렇게 찾은 피크값이 2개 이상일 때는 각 속도 성분을 짝지어 줌으로써 각 물체에 해당되는 속도를 찾을 수가 있다.

2. 합성영상에 대한 실험

한 프레임이 64 x 64의 크기이고 물체의 크기는 8 x 8의 물체 두 개를 일정한 속도 $v_x=1, v_y=3, v_x=-2, v_y=4$ 로 움직이도록 합성 영상을 만들었다. 각 물체는 밝기가 150으로 같은 밝기를 가지도록 하였다. 프레임은 총 8프레임으로 하였으며 각각의 프레임에 대해서 x축, y축, 45° 축, 135° 축으로 투사를 하였다. 실험 영상은 다음과 같다.

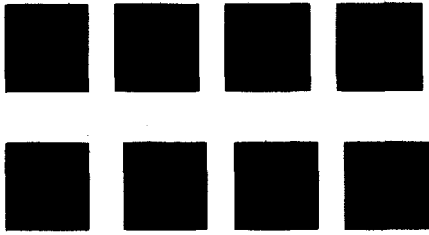


그림 2. 속도가 (1,3) (-2,4)인 실험 영상

Line Integral한 결과를 바탕으로 45° 축 속도 성분은 {-2, 6}, 135° 축 속도 성분은 {4, 2}이 나온 것을 알 수 있다. 각 방향의 속도를 짝지어야만 각 물체의 속도를 알 수가 있다. x방향 속도(1,-2)와 y방향 속도(3, 4)가 있을 때 짝지울 수 있는 경우의 수는 각 한 방향당 2가지로 짝지울 수 있다. 예를 들어 (1, 3) (1, 4) (-2, 3) (-2, 4)로 짝지울 수 있다. 하지만 45°, 135°의 식을 알고 있기 때문에 x방향 속도에 맞는 y방향 속도를 바꿔 넣어주면서 알아낼 수가 있다.

45° 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{y}{\sqrt{2}} = \frac{-2}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{y}{\sqrt{2}} = \frac{-6}{\sqrt{2}}$$

여기에서 x방향 속도성분 1과 y방향 속도 성분 3과 4를 짝지울 때 위의 식에 대입해서 맞춰보면 (1, 3)으로 짝지우게됨을 알 수 있다. 마찬가지로 x방향 속도 성분 -2와 y방향 속도 성분 3과 4중에 고른다면 위의 식에 대입해서 보면 역시 (-2, 4)로 된다는 것을 알 수가 있다.

135° 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{x}{\sqrt{2}} + \frac{y}{\sqrt{2}} = \frac{4}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{x}{\sqrt{2}} + \frac{y}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}}$$

여기에서도 마찬가지로 x방향 속도성분과 y방향 속도 성분을 짝지울 때 (1, 3), (-2, 4)로 짝지워 진다는 것을 알 수가 있다.

이와 같이 하면 각 물체에 대하여 움직이는 속도 값을 구해낼 수가 있다. 위의 방법은 과정이 복잡해 보이나, 오히려 연산량 측면에서는 기존의 방법보다 효과적이다.

3. 실제 영상에 대한 실험

한 프레임이 150 x 150의 크기인 Coast Guard영상으로 실험하였다. 총 8 프레임으로 실험을 하였는데 프레임은 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20번째 프레임을 실험 영상으로 사용하였다. 이 영상에서 물체는 왼쪽에 나타나는 배이다. 왼쪽 배가 속도 $(v_x, v_y)=(7, 0)$ 의 속도로 움직이고 있다. 각각의 프레임에 대해서 x축, y축, 45° 축, 135° 축으로 투사를 하였다. 실험 영상은 다음과 같다.

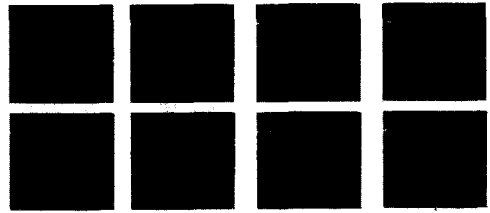


그림 3. (7,0)의 속도로 움직이는 물체의 실험 영상

그림 4는 x방향 Line Integral 결과이다.

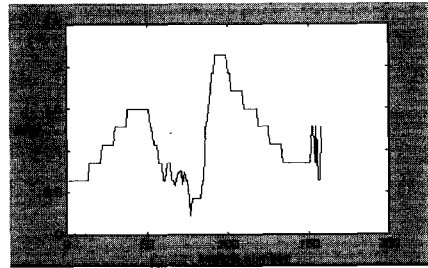


그림 4. x방향 Line Integral

여기에서 x 방향 속도성분 $v_x=7$ 을 구할 수가 있다.

다음은 y 방향 Line Integral 결과이다.

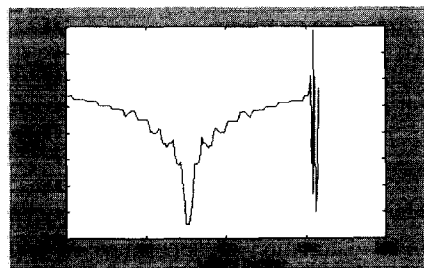


그림 5. y방향 Line Integral

여기에서 y 방향 속도성분 $v_y=0$ 을 구할 수가 있다. 단 y 방향 속도성분에서 0이 아닌 성분이 나타난 것은 약간의 배경의 움직임과 실험 영상에서의 움직임이 없는 배에서의 약간의

