

# 비전 시스템에 의한 풍력발전기의 Yaw방향 추정

## The Estimation of Yaw Direction of Wind Turbine Using Vision System

정명희\*, 정준익\*\*, 노도환\*\*\*

Myung-Hee Jeong, Jun-Ik Jeong, Do-Hwan Rho

**Abstract** - 풍력발전기에 있어서 블레이드의 Yaw방향 제어는 끊임없이 변화하는 풍향에 대해 효율의 극대화와 블레이드의 강도 및 진동측면에서 대단히 중요하다. 기존의 블레이드 Yaw 방향 측정은 접촉 및 비접촉 센서가 이용되어왔다. 본 논문에서는 풍력발전기의 원격모니터링 시스템에서 기본적으로 설치되는 카메라를 이용하여 블레이드의 Yaw방향을 측정하는 방법을 제안한다. 블레이드가 풍향에 따라 회전할 때 영상 누적을 행하고, 누적영상에 대해 경계점을 추정하여 타원의 궤적을 추정한다. 추정된 경계점들을 이용하고 최소자승법을 적용하여 타원방정식을 추정하고, 장축과 단축을 연산한다. 장축과 단축의 변화를 이용하여 카메라의 촬영방향의 기준점으로부터 Yaw방향의 변화를 정량적인 값으로 산출하여 이를 바탕으로 Yaw 회전각을 추정한다. Yaw 방향 추정의 검증을 위해 블레이드 속도와 Yaw 방향의 제어가 가능한 모형풍력발전기를 제작하고 실험을 통하여 제안한 추정알고리즘의 유효성을 검증한다.

**Key Words** : Yaw, 풍력시스템, Vision system, Image processing, 블레이드

### 1. 장 서론

풍력발전기의 효율적인 관리를 위하여 다양한 방법의 모니터링 감시시스템이 구축되어 운영되고 있는데 대부분의 시스템이 발전기에 전기, 전자적 센서의 접촉 및 비접촉 기계장치를 설치하여 여러 파라미터를 측정하는 방법을 선택하고 있다. 본 연구는 풍력발전시스템의 정확한 운전과 상태를 파악하기 위해 기 설치된 비전시스템에 의한 풍력발전기의 Yaw방향 추정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 다음 몇 단계로 이루어진다. 첫째 회전하는 블레이드의 영상면 상에 일정영역을 설정하고 이로부터 획득되는 블레이드의 영상제적인 타원을 최소자승법을 이용하여 추정한다. 타원을 추정하기 위해서는 타원의 좌표값 추정이 선행되어야 하는데 가우시안 에지 필터링, 영상확장, 영상축소, 영상누적후 2진화등의 여러가지 영상처리기법을 통해 얻어진다. 둘째, 추정된 타원의 장축과 단축 값들을 이용하여 장축에 대한 단축의 비를 계산한다. 마지막으로 계산된 값과 기준점을 중심으로한 실제 Yaw의 변화값을 비교하여 상관관계를 규명한다. 앞에서 언급한 기준점은 진북방향이 많이 이용되는데 본 연구에서는 카메라의 방향은 항상 고정되어있으므로 카메라의 촬영방향을 기준점으로 설정한다.

본 연구는 풍력발전기의 Yaw방향이 변화할때 기준점에서의

변화값을 알아내는 것이기 때문에 실제 풍력발전 시스템으로 는 실험에 많은 어려움이 발생하여 제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 Yaw방향을 제어할수 있는 모형풍력발전기를 제작하여 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

### 2. 장 타원궤적을 이용한 Yaw 방향 알고리즘

#### 2.1 절 알고리즘의 기본 원리

고정된 타워에서 회전하는 블레이드는 풍향의 변화에 따라 방향이 변하면서 타원 형식의 궤적을 생성하므로 타원의 궤적과 Yaw방향에 대한 상관관계를 이용하여 Yaw방향 추정이 가능하게 된다.

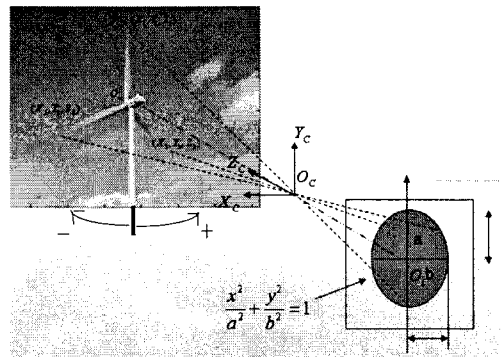


그림1. 블레이드의 회전영상 궤적(타원)

그림1은 회전하는 블레이드를 비전시스템의 노출영상으로 입력을 획득하여 나타내면 블레이드의 회전 영상 궤적이 영상면에 a, b의 장단반경으로 이루어진 타원 궤적으로

#### 저자 소개

- \* 정명희: 全北大學 電氣工學科 碩士課程
- \*\* 정준익: 全北大學 電氣工學科 博士課程
- \*\*\* 노도환: 全北大學 電氣工學科 正教授 · 工博

형성된다. 영상케적을 누적영상으로 생성하고, 누적영상의 경계점을 추정하면 블레이드의 외곽에 의한 타원 케적이 추정된다. 본 연구에서는 카메라가 풍력발전기를 정면으로 주시할 때를 0도로 가정하고, 풍력발전기가 회전시 우측은 +, 좌측은 -각으로 설정하여 Yaw 각  $\theta$ 를 설정하여 카메라와 풍력발전기의 블레이드 회전각을 추정하였다.

그림2는 y축방향으로 a, x축방향으로 b로 각 반경을 설정했을 때 블레이드의 회전각  $\theta$ 에 따라 영상에 투영되는 타원 케적의 예를 나타낸 것이다. 그림2에서 알 수 있듯이 타원 케적의 장반경(a)에 대한 단반경(b)의 비(ratio)는 풍력발전기의 Yaw방향 변화량과 식(1)과 같이 비례적 상관관계를 규정할 수 있다.

$$\frac{a}{b} \propto \theta \quad (1)$$

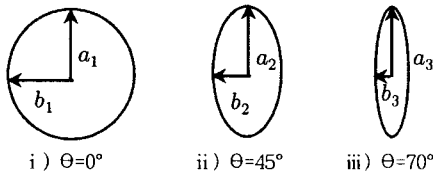


그림2. 영상면에서 블레이드의 타원 케적

획득된 경계점의 좌표들로부터 최소자승법을 이용하여 타원을 추정하고, 추정된 타원의 장반경과 단반경의 비를 이용하여 Yaw 방향을 추정 한다.

그림 3은 풍력발전기의 Yaw 방향을 추정하기 위한 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것이다.

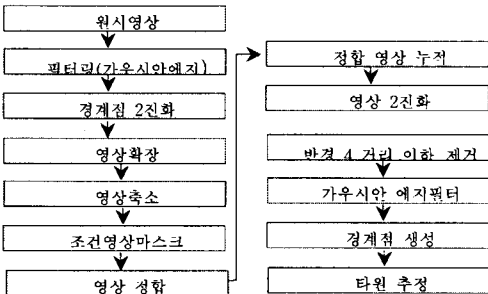


그림 3. Yaw 방향 추정 알고리즘 흐름도

## 2.2 절 최소자승법에 의한 타원 검출

영상에서 임의의 3개점을 이용하여 독립적인 2개의 파라미터만을 영상에서 취하는 방법을 이용한다. 먼저 D, E, F값을 소거하고 B, C만 최소자승법을 이용하여 결정한다.

그림 4에서 타원이 선택한 점

$P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)$ 을 통과 하려면 점  $P_1, P_2, P_3$ 가 식 (2)를 만족해야 한다.

$$x^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (2)$$

따라서,  $P_1, P_2, P_3$ 의 좌표값을 식 (2)에 대입하여 D, E, F의 3개 파라미터에 관한 연립방정식으로 다시 쓰면 식(3)와 같다.

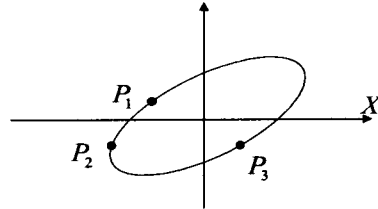


그림4. 타원에서 3점의 선택

$$\begin{aligned} Dx_1 + Ey_1 + F &= -(x_1^2 + Bx_1y_1 + Cy_1^2) \\ Dx_2 + Ey_2 + F &= -(x_2^2 + Bx_2y_2 + Cy_2^2) \\ Dx_3 + Ey_3 + F &= -(x_3^2 + Bx_3y_3 + Cy_3^2) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)로부터  $de = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix}$ 라 놓고 D, E, F를 구하여 식

(2)에 대입하여 식(4)와 같이 얻는다.

$$x^2 + Bxy + Cy^2 + \frac{1}{de} \{K\} = 0 \quad (4)$$

단, 식(4)을 파라미터 항별로 대입하면 B, C, 상수항에 대한 계수를 구할 수 있다. 계수를 간략화 하기 위해 변수를 정의하고 B, C에 대한 1차 방정식으로 쓰면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} B(de \cdot xy + b_1x + b_2y + b_3) + B(de \cdot y^2 + c_1x + c_2y + c_3) \\ = -[de \cdot x^2 + f_1x + f_2y + f_3] \end{aligned} \quad (5)$$

$$g(x) = c_1g_1(x) + c_2g_2(x) + \dots + c_kg_k(x) \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 비교하면 식 (7)와 같다.

$$\begin{aligned} g &= -(de \cdot x^2 + f_1x + f_2y + f_3) \\ g_1 &= de \cdot xy + b_1x + b_2y + b_3 \\ g_2 &= de \cdot y^2 + c_1x + c_2y + c_3 \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)을 이용하여 최소 자승법에 의해 B, C를 식 (8)과 같이 결정한다.

$$\begin{aligned} B &= (a_2 \cdot a_3) - (a_4 \cdot a_1) / (a_0 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_1) \\ C &= (a_2 - a_0 \cdot B) / a_1 \end{aligned} \quad (8)$$

단

$$\begin{aligned} a_0 &= (de \cdot xy + b_1x + b_2y + b_3)^2 \\ a_1 &= (de \cdot y^2 + c_1x + c_2y + c_3) * (de \cdot xy + b_1x + b_2y + b_3) \\ a_2 &= -(de \cdot xy + b_1x + b_2y + b_3) * (de \cdot x^2 + f_1x + f_2y + f_3) \\ a_3 &= (de \cdot y^2 + c_1x + c_2y + c_3)^2 \\ a_4 &= -(de \cdot xy + b_1x + b_2y + b_3) * (de \cdot x^2 + f_1x + f_2y + f_3) \end{aligned}$$

상기에서 얻어진 B, C를 식 (9)에 대입하여 D, E, F의 파라미터를 계산함으로써, 타원의 방정식을 얻을 수 있다.

$$M = \sum_{i=0}^n [g(x_i) - y_i]^2 \quad (9)$$

## 3. 장 실험 및 고찰

모형 풍력발전기의 블레이드를 회전시키기 위하여 아날로그 파워서플라이에 의해 회전속도가 제어되는 DC모터를 설치하였고 풍력발전기의 Yaw방향과 각도는 전용 서보모터 컨트롤러와 서보 모터를 설치해서 실험을 하였다.

실험시 블레이드의 회전속도는 모델이 된 균산 비용도의 풍

력발전기의 운전시 평균 회전속도인 약20RPM으로 셋팅을 하였으며 Yaw방향을 제어하는 서보모터의 작동범위는  $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 이다.

정확한 Yaw방향을 추정하기 위해서는 진북방향의 설정이 선행되어야 한다. 즉 추정되는 정보에 대한 진북방향의 교정이 이루어져야 한다. 그러나 본 논문에서는 그림1에서와 같이 카메라가 풍력발전기를 정면으로 주시할 때를 0도로 가정하고 회전시 우측은+, 좌측은-각으로 설정하여 카메라를 기준으로 했을 때의 풍력발전기의 Yaw 변화각을 추정하였다.

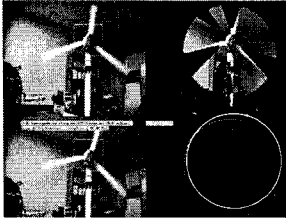


그림5. 시뮬레이션 (정면)

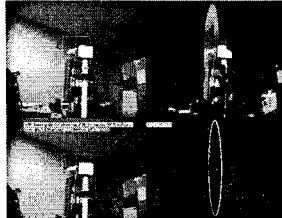


그림6. 시뮬레이션(-90도)

그림6과 그림7은 각각 카메라와 풍력발전기와의 사잇각  $\theta$ 가  $0^{\circ}$ 와  $-90^{\circ}$ 로 회전하였을 때의 추정결과를 나타낸 것이다.

좌측상단은 입력영상, 우측상단은 블레이드의 격자, 좌측하단은 회전검출, 우측하단은 블레이드 격자의 경계점과 중심을 나타낸 것이다.

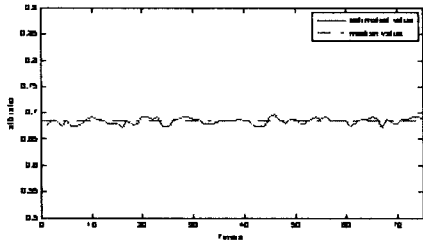


그림7  $\theta=-45^{\circ}$  일때 추정된 a/b 비

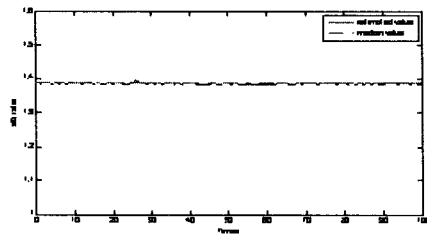


그림8.  $\theta=0^{\circ}$  일때 추정된 a/b

그림7과 그림8은 블레이드의 속도를 일정하게 유지하고 (20RPM) 블레이드와 카메라의 각도를 카메라의 촬영방향을 기준으로 설정했을 때  $+90^{\circ}$ 에서  $-90^{\circ}$ 까지 컨트롤하면서 추정한 a/b 비값들을 나타낸 것이다.

그림9는 Yaw 방향 각도  $\theta$ 를  $-90^{\circ}$ 에서  $+90^{\circ}$ 까지 순차적으로 회전시키며 각도에 의해 변화하는 장단반경 a/b의 비변화 결과를 실제 데이터와 스플라인 보간을 동시에 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 a/b의 비는 정면을 중심으로 대칭을 이루며, 변화가 선형적임을 알 수 있다. 따라서 실제 풍력발전기와 카메라와의 교정이 이루어지면 그림과 같은 특성곡선 형태로부터 Yaw방향의 각을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

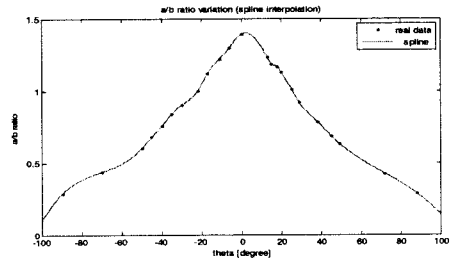


그림9. 추정된 a/b 비와 스플라인 보간

#### 4. 장 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 비전시스템을 이용하여 풍력발전기의 Yaw 방향을 추정하는 방법을 개발 하였다. Yaw방향을 추정하기 위해서 블레이드의 경계점을 이용하여 영상을 확장 축소하여 블레이드 존재영역을 생성하고, 이러한 존재영역을 일정 시간동안 누적하여 블레이드 회전공간 영상을 생성한다.

그리고 이 영상을 이진화하여 경계점을 추정하고, 이러한 경계점으로부터 타원을 추정하고 장반경과 단반경의 변화로부터 Yaw방향을 추정하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 블레이드를 검출하지 못하였을 경우에도 검출을 누적시키므로 보다 정확한 방향을 산출할 수 있는 장점이 있다.

제안한 알고리즘은 제작한 모형 풍력발전기를 이용하여 시뮬레이션을 하였고, 풍력발전기의 Yaw방향 추정은 실제 풍력발전기와 카메라의 관계로 인하여 변하기 때문에 회전에 의한 장단반경 비의 특성곡선을 제시하였다.

본 연구는 풍력발전시스템의 Yaw방향 추정을 기 설치된 비전시스템을 이용하여 영상처리 시스템으로 시도한 연구로서 추후연구과제로는 야간에도 야광스티커를 이용하여 Yaw 방향을 추정할 수 있는 것으로 연구를 확대하는데 있다. 또한 실제 풍력발전 시스템에 장단반경 비의 특성곡선을 적용하기 위해서는 카메라와 실제 풍력발전시스템과의 교정 기법에 대한 연구도 병행되어야 할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김진훈, "세계에 부는 풍력발전" 전기의 세계, 제 52권, 제1호, 2003
- [2] 김지인, 동경민, 송승호, 오영진, 최석우, 신찬, 노도환, "한국형 풍력발전기 감시제어 시스템 개발", 대한전기학회 하계학술대회 연구집, pp.1355-1357, 2002
- [3] Felix Alberto Farret, Active Yaw control with sensorless wind speed and Direction measurements for Horizontal axis wind Turbines
- [4] A.L.Gilbert, M.K.Giles, G.M.Flaches et al., "A Real-time video tracking system" IEEE Trans. PAMI, Vol. PAMI-2, pp. 47-56, 1980
- [5] 이주용, 서요한, 이용기, "최소자승법을 이용한 타원의 검출", 한국OA학회연구지 Vol 1 .No.1. 1996.8
- [6] 장용철, 오무송, "영상에서 변형된 최소자승법을 이용한 타원 검출", 정보처리학회연구지, Vol.4, No.12, pp 3200-3210, 1997. 12