

풍향 계측 타워 설치시 카메라를 사용한 진북 맞추기 기법

A Technique for Alignment to True North Based on Camera in Meteorological Installation

이 정 완*, 유 능 수, 남 윤 수
(Jeong Wan Lee, Neung Soo Yoo, and Yoo Su Nam)

Abstract : A technique for alignment to true north is presented based on synchronized measurements of vision image by a camera and output voltage of wind direction sensor. The true wind direction is evaluated by means of image processing techniques with least square sense, and then evaluated true value is compared with measured output voltage of the sensor. The uncertainty analysis about the component error for the proposed method in practical situation is performed. The proposed technique is applied to real meteorological tower (wind measuring tower) at the Daekwanryung test site. In addition, some uncertainty analysis of this method is presented.

Keywords : wind turbine, alignment to true north, image processing, wind direction sensor calibration

I. 서론

풍력 발전 시스템 (Wind Turbine Generating System)은 여러 가지 형태의 풍차를 이용하여 풍력 에너지를 기계적 에너지로 변환하고, 이 기계적 에너지로 발전기를 구동하여 전력을 얻어내는 시스템을 말한다. 이러한 풍력발전 시스템은 무한정의 청정 에너지인 바람을 동력원으로 하기 때문에 기존의 화석 연료나 우라늄 등을 이용한 발전 방식과 달리 발전에 의한 열공해나 대기오염 그리고 방사능 누출 등과 같은 문제가 없는 무공해 발전방식이다. 뿐만아니라 풍력발전 시스템은 구조나 설치 등이 간단하고 운영 및 관리가 용이하며 무인화 및 자동화 운전이 가능하다. 이러한 장점 때문에 풍력은 가장 유력한 대체 에너지원으로 인정받고 있으며, 이미 수많은 풍력발전 시스템이 운영되고 있다.

우리나라도 세계 기후변화 협약과 같은 국제환경의 변화와 유가상승, 그리고 국내 사용 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있는 현실적인 문제에 대응하기 위해 풍력발전 시스템에 대해 높은 관심을 보이고 있다[1]. 풍력 자원의 정확한 측정은 특정한 site의 풍력 자원에 대한 정확한 평가와 풍력 에너지 활용에 관한 올바른 연구를 위하여 매우 중요하다[2]. 즉, 풍향과 풍속의 측정에 의한 풍력자원의 정확한 계산이 이루어져야만 풍력발전 단지의 운영에 관한 경제적 판단을 오류없이 할 수 있다. 그 중에서 풍향 센서의 오차는 단지 위치 보정 (site calibration)시 기준위치와 풍력 발전기의 설치 위치 사이의 풍력 에너지의 보정 관계를 계산할 때 심각한 오차를 유발할 수 있다[3,4,5]. 일반적으로 풍향 센서의 측정된 값과 실제 풍향간의 오차는 크게 다음의 두가지 요인에 의하여 발생한다.

첫째 요인은 풍향센서 내부의 포텐쇼메터의 비선형성이나

불확실성에 의한 오차이고 둘째 요인은 풍향 계측 타워를 설치할 때 발생하는 진북 방향과의 어긋남에 의한 오차이다. 첫 번째 요인은 실험실 내에서의 센서 보정을 통하여 허용하는 오차 범위 내에서 해결할 수 있는데 반하여, 두 번째의 요인은 풍향 계측 타워의 설치시 정확하게 진북 방향과 풍향 센서의 북쪽 방향을 맞추어 설치해야만 해결할 수 있는 문제이다[4]. 한편, 풍향 계측 타워의 설치할 때 풍향센서 북쪽 방향과 진북을 정확히 일치시키는 것은 대부분 쉽지 않다. 특히 높이가 높은 풍향 계측 타워를 설치할 때는 그 어려움이 더욱 크다. 풍향 계측 타워의 설치하는 먼저 땅에서 타워의 부분 요소들을 조립하여 하나의 긴 타워를 만든 다음, 크레인을 사용해서 땅으로부터 끌어올리는 과정을 통하여 이루어지는데 땅에서 정확하게 진북을 맞추어 놓더라도 끌어 올리는 설치 과정에서 진북과의 어긋남이 발생하게 된다. 또한, 높은 풍향 계측타워의 경우 계측 타워 축의 비틀림의 양이 매우 크게 발생할 수 있으며, 이로 인하여 진북으로부터의 어긋남이 발생한다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 풍향센서의 진북으로부터의 어긋남의 문제를 해결하기 위하여, 카메라를 통한 풍향 센서의 영상을 이용하여 풍향 센서의 실제 방향을 측정하고, 이와 동시에 센서의 출력 전압 값을 비교하여 진북 방향과 어긋남을 보정하였다. 영상 신호는 분할기법을 사용하여 풍향 센서의 날개 부분만을 분리하였으며, 이 분리된 영상신호에 최소 오차 지승법 (least square error method)을 적용하여 각도를 계산하였다.

제안된 방법에 대하여 실제 적용할 때 발생하는 성분 오차에 관한 불확실성 해석을 하였으며, 실제로 대관령 실증 연구 단지의 풍향 측정 타워에 적용하여 실험을 수행하고 그 타당성을 확인하였다. 논문의 전체적인 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 제안된 기법의 전체적인 구성에 대하여 설명하고, 3장에서는 영상신호처리를 통한 실제의 풍향 값을 구하는 알고리즘을 기술한다. 그리고 4장에서는 제안된 기법의 불확실성에 대하여 해석하고, 5장에서는 실험을 수행한 다음 6장에서 결론을 보인다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 9. 2., 채택확정 : 2005. 1. 4.

이정완, 유능수, 남윤수 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
(jwlee@kangwon.ac.kr/yoonesoo@kangwon.ac.kr/nys@kangwon.ac.kr)

※ 본 연구는 에너지관리공단의 풍력실증연구 지원연구비로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

II. 전체 시스템의 구성

카메라를 사용한 진북 맞추기 기법을 대관령 풍력 실증 연구 단지에 적용한 전체적인 시스템 구성도는 Fig. 1과 같다. 대관령 실증연구단지는 에너지관리공단의 지원과 강원도의 협조 아래에서 국내에서 개발된 풍력발전기의 실제적인 성능을 검증하기 위해 조성된 단지이다[6,7].

제안된 진북 맞추기 기법의 기본적인 원리는 다음과 같다.

- 1) 어떤 특정한 시간에 풍향센서 날개의 회전 방향을 카메라를 통하여 촬영한 다음 영상처리기법을 사용하여 센서의 실제 방향값, θ_{true} 를 구한다.
- 2) 이와 동시에 센서의 출력 전압 값을 측정하여 풍향 센서의 측정값, $\theta_{measured}$ 를 구한다.
- 3) 1)과 2)의 과정에서 구한 θ_{true} 와 $\theta_{measured}$ 를 비교하여 진북과의 어긋난 정도를 구한다.

이상적으로 지면에서의 카메라 설치 위치는 풍향계의 (x,y) 위치와 수직 방향으로 일직선상에 놓여야 한다. 그러나 실제 적용을 할 때 풍향 계측 타워에 부착된 다른 주변 장치들로 인한 장애물 때문에 이상적인 위치에서는 카메라가 피사체를 잡을 수 없는 문제가 발생하였다. 이러한 문제로 인하여 실제 적용에서는 카메라를 풍향센서의 수직 위치로부터 0.9 미터의 편차를 두고 설치되었다(Fig. 1의 우측 하단부 그림 참조). 한편 설치된 카메라의 방향으로의 진북에 대한 절대적인 회전 위치를 결정해야 하는데 이를 위하여 GPS를 사용하여 진북 방향을 측정하였으며, Fig. 1의 우측 상단부의 그림이 카메라의 진북에 대한 절대적인 회전 위치를 표시한 것이다.

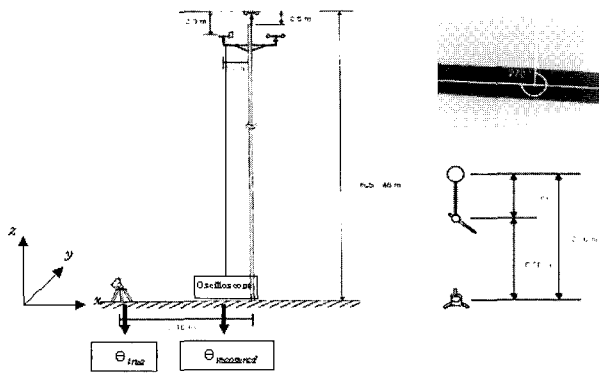


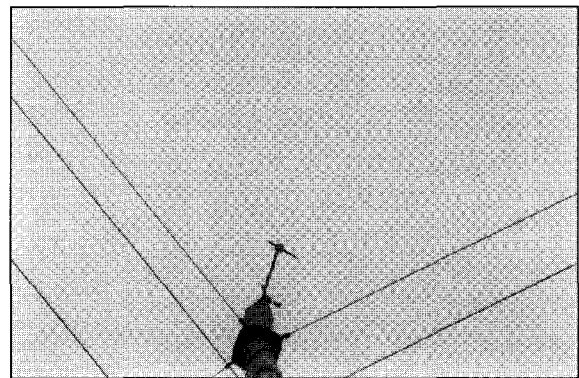
그림 1. 실험 장치의 구성도.
Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

표 1. NRG #220P 풍향 센서의 기술적 사양.
Table 1. Specification for NRG #220P wind direction vane.

Output Signal	DC voltage from a conductive plastic potentiometer
Resistance	10K Ohm ($\pm 2\%$)
Dead band	8 degrees
Nonlinearity	1.0% maximum (0.5% typical)
Excitation Voltage	1 to 15VDC
Sensitivity	Approximately 1 m/s

실험에 사용된 카메라는 SONY 디지털 카메라를 사용하였으며, 실험에서는 카메라의 최대 줌인 20배줌과 640x 480 화소 모드로 촬영하였다. 실험에 적용된 풍향 센서는 NRG #220P이며 센서의 사양은 표 1과 같다. $\theta_{measured}$ 의 측정은 풍향 센서의 출력 전압을 Tektronics TS220 디지털 오실로스코프를 통하여 측정하였으며, 앞에서 언급한 카메라의 촬영 순간과 출력 전압의 측정의 동기는 디지털 오실로스코프의 RUN/STOP 기능을 사용하여 동기 시켰다.

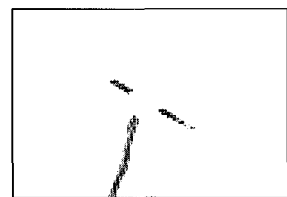
III. 영상 신호 처리를 통한 θ_{true} 의 결정



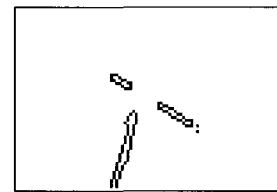
a) Original image



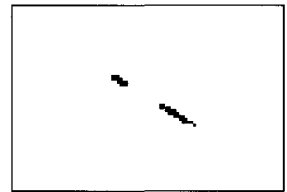
b) Masked and cut image



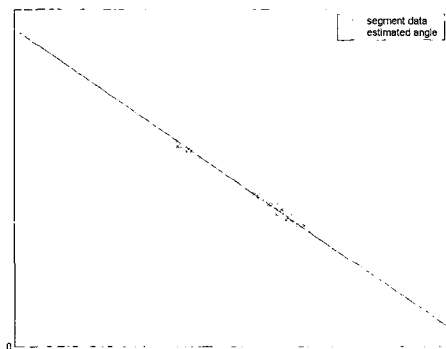
c) Rescaled image



d) Edge selected image



e) Segmented image



f) Least Square Straight Line

그림 2. 영상 신호의 처리과정.
Fig. 2. Procedure of image data analysis.

촬영된 영상신호로부터 Fig. 2에 나타난 과정을 통하여 풍향 센서 날개의 실제 각도, θ_{true} 가 계산되었다.

Fig. 2(a)는 실험을 통해 얻은 원래의 영상의 한 예이다. 대관령 풍력실증 연구단지의 풍향 계측 타워는 높이가 높기 때문에 카메라의 줌을 최대로 하였음에도 불구하고 센서의 날개 부분이 차지하는 영역은 전체 사진의 영역에서 봤을 때 작은 부분을 차지하고 있다. 전체적인 처리과정은 먼저 원래의 영상을 풍향센서의 날개부분만으로 영상 처리기법을 통하여 분할 한다. 그 다음 분리된 영역만의 (x,y)데이터 값을 기초로 최소 오차 자승법을 사용하여 1차 함수의 기울기를 구하고, 이를 바탕으로 진북으로부터의 각도를 결정한다.

이 과정은 MATLAB Image processing Tool Box의 함수를 사용하여 처리하였다. 영상 신호의 세부적인 처리과정은 다음과 같은 단계를 통하여 이루어졌다.

- 1) 효율적인 분할기법을 위하여 원래의 영상을 풍향센서를 포함하는 적절한 영역으로 자른 다음, 센서의 원형 영역은 마스킹하여 제거 하였다(Fig. 2(b)).
- 2) 영상 신호를 한계(threshold)를 사용하여 흑과 백의 동적 범위를 더 넓혔다(Fig. 2(c)).
- 3) 영상의 경계 곡선을 (Fig 2.(d))을 구하고 이를 통하여 분할들을 선정하였다.
- 4) 선정된 분할중에서 경계를 걸치는 부분을 제거하여 원하는 센서의 날개 부분에 대한 분할만을 선정하였다(Fig 2(e)).
- 5) 마지막 단계에서는 분할된 값을 바탕으로 센서 날개의 기울기를 최소 오차 자승법으로 구하였고 이를 통한 실제 풍향각을 구했다(Fig. 2(f)).

IV. 불확실성 해석

제안된 기법으로 측정하였을 때 발생할 수 있는 불확실성에 대하여 해석하였다.

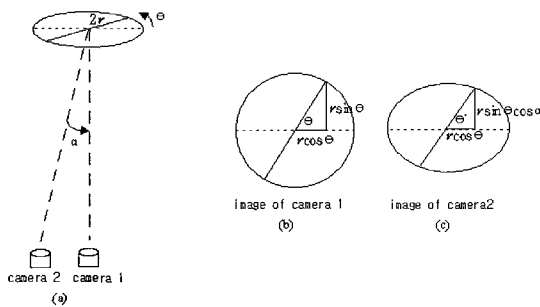


그림 3. 두개의 다른 위치에 설치된 카메라에 의한 영상.
Fig. 3. Images from two cameras with different installed position.

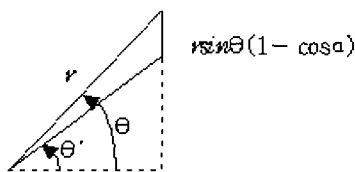


그림 4. 두개의 카메라의 각도 차이.
Fig. 4. Angle difference in two cameras.

이 해석에서 고려한 불확실성의 요인은 카메라의 설치 위치에 의한 오차에 의한 것과 카메라 분해능에 의한 것이다.

1. 카메라 설치 위치 오차에 의한 불확실성

이상적인 카메라 위치는 풍향계의 (x,y)방향의 위치에 정확하게 수직방향에 놓이는 것이다. 그러나 풍향 계측 타워에는 다른 용도의 센서들이나 주변 장치들이 설치되어 있기 때문에 정확한 수직 방향의 위치에서 풍향계의 날개를 포착하는데 어려움이 있다. 따라서 불가피하게 풍향 센서의 수직방향으로부터 벗어나게 카메라를 설치하고 측정하게 된다. 이러한 카메라 설치 위치에 의한 측정의 불확실성을 다음과 같이 해석하였다.

만약 이상적인 위치 (Fig. 3의 camera 1)에서 각도 θ 만큼 기울어진 길이 $2r$ 의 선을 촬영했을 경우 영상은 Fig. 3(b)와 같고, 카메라의 위치가 이상적인 위치에서 α 만큼 변화한 위치 (Fig. 3의 camera 2)에서 촬영되는 영상은 그림 Fig. 3(c)와 같다. Fig. 3의 (b)와 (c)에서 보듯이 카메라의 위치의 차이는 각각의 카메라로부터 촬영된 영상의 각도에 θ 와 θ' 만큼의 차이를 발생하게 한다.

Fig. 4는 두각도 θ 와 θ' 의 차를 기하학적으로 표시한 것이다. 이 각도의 차가 카메라 위치에 의한 불확실성의 양을 의미한다. Fig. 4를 살펴보면 두 각도 θ 와 θ' 간의 차 e_1 은 다음과 같은 부등식 관계를 갖게 되고,

$$\sin(\theta - \theta') \leq \frac{r \sin \theta (1 - \cos \alpha)}{r} = \sin \theta (1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

for $0 \leq \theta \leq \pi/2$

$$e_1 = |\theta - \theta'| \leq \sin^{-1}[\sin \theta (1 - \cos \alpha)], \quad (2)$$

for $0 \leq \theta \leq \pi/2$

(2)로 부터, 카메라 위치에 의한 불확실성에 의한 최대오차에 해당하는 e_1 의 최대값은 θ 가 90도 일때이며 그 값은 다음과 같다.

$$e_{1,max} \leq \sin^{-1}(1 - \cos \alpha), 0 \leq \alpha \leq \pi/2 \quad (3)$$

2. 카메라 영상의 분해능에 의한 불확실성

카메라의 촬영 분해능의 정밀도에 따라, 얻을 수 있는 카메라의 촬영된 센서 날개의 각도 정밀도가 제한된다. 즉, 카메라의 촬영 분해능의 한계는 θ_{true} 의 계산에 오차를 유발하는 불확실성으로 작용한다. 이 절에서는 이러한 불확실성에 대하여 해석하였다. 카메라로 풍향 센서의 날개를 촬영했을 때 날개의 길이가 차지하는 픽셀의 수가 N개라 한다면, 촬영된 영상이 나타낼 수 있는 각도는 Fig. 5와 같다. Fig. 5을 자세히 살펴보면 $N \times N$ 화소 포맷의 카메라의 영상에 표현할 수 있는 각도의 분해능은 근사적으로 다음과 같게 되고,

$$\theta_{resolution} \approx \tan^{-1}\left(\frac{1}{N}\right) \quad (4)$$

이로부터, 카메라 분해능의 정도에 의한 불확실성 ($e_{2,max}$)의 최대 크기는 다음과 같다.

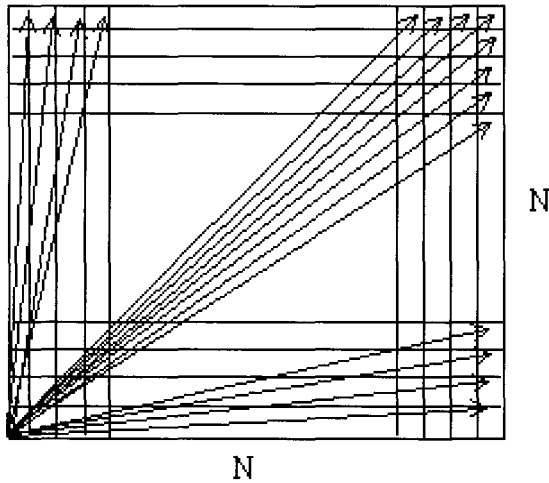


그림 5. N×N 픽셀 해상도의 영상에서의 표현할 수 있는 각도.
Fig. 5. Representative angles in the image of N×N pixel format.

$$e_{2,max} = \theta_{resolution} \approx \tan^{-1}\left(\frac{1}{N}\right) \quad (5)$$

3. 영상처리 과정에서의 불확실성

촬영된 영상을 분할 기법을 통한 영상처리를 하는 과정에서 결정된 분할면은 실제의 풍향계의 날개 외관 형상과의 차이가 존재하며, 이에 의한 오차를 지니고 있다. 이러한 오차의 크기를 정량적으로 해석하는 과정은 분할기법의 알고리즘에 따라 다르며 본 논문의 적용된 응용의 경우 해석상의 어려움이 있다. 그러나 다음 같은 직관적 생각을 바탕으로 영상 처리과정의 오차를 고려해 볼 수 있다.

- 풍향계의 원래 형상은 대칭적 구조를 갖는 직선의 형태를 지니고 있다.
- 분할된 영상은 그림 2(e)에서 보듯이 직선형에는 가까운 형태이지만 실제형상과는 차이가 있다.
- 만약 분할된 면의 자료 개수가 충분하다면, 이러한 차이는 그림 2(f)의 과정에서의 최소 자승법에 의한 각도 계산시 구해진 1차 직선의 통계적 성질이 정규 분포를 이룰 것이다. 따라서 영상처리에 의한 오차에 의한 영향은 최소자승법에 의한 각도 계산시의 통계적 처리과정에서의 구해진 표준편차에 해당하는 불확실성의 양에 포함된다 할 수 있다.

V. 실험 결과

제안된 기법을 대관령 풍력 실증 연구 단지의 풍향 계측 타워에 대하여 적용하였다. 대관령 풍력 실증 연구 단지에 설치된 풍향 측정 타워는 높이가 46 미터이며, 타워에는 5개의 풍속센서와 2개의 풍향센서, 온도센서, 압력센서, 복사열센서가 설치되어 있다.

본 실험에서는 타워의 가장 꼭대기에 설치된 풍향센서에 대하여 적용하였다. 카메라의 위치는 풍향센서의 수직 위치로부터 0.9미터 떨어진 지점에 설치되었으며, 사진 촬영은 640×380 화소의 포맷으로 총 38회의 시험을 하였다. 촬영된 영상 중 풍향 센서의 날개부분이 차지하는 영역은 43×43 pixel의 분해능으로 측정되었다.

표 2. 실험에서의 불확실성 계산값.

Table 2. Uncertainties in the experiment.

카메라 위치에 의한 불확실성, ($e_{1,max}$)	0.011 deg
카메라 분해능에 의한 불확실성, ($e_{2,max}$)	1.33 deg

표 3. 실험 결과의 통계적 처리값.

Table 3. Statistical results in the experiment.

$\theta_{true} - \theta_{measured}$ 의 평균	16.14 deg
$\theta_{true} - \theta_{measured}$ 의 표준편차	2.129 deg

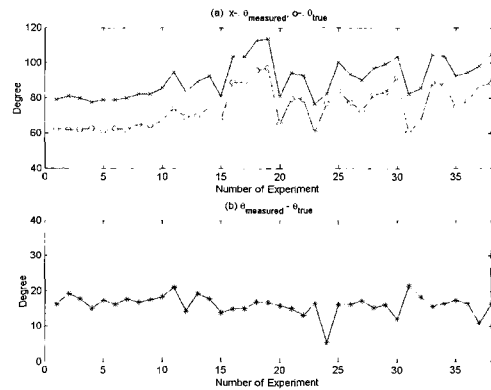


그림 6. θ_{true} 와 $\theta_{measured}$ 의 실험결과.

Fig. 6. Experimental result of θ_{true} and $\theta_{measured}$.

3장의 해석 방법을 통하여 실험 결과에 대한 불확실성의 양은 표 2와 같다. 표 2에서 보듯이 카메라 위치에 의한 불확실성은 거의 무시할 수 있는 수준이지만, 카메라 분해능에 의한 불확실성은 상대적으로 크다. 한편 $e_{2,max}$ 의 크기는 좀더 분해능이 좋은 카메라를 사용하면 줄일 수 있다. Fig. 6 (a)는 38회의 시험에 대하여 계산된 θ_{true} 값과 측정된 $\theta_{measured}$ 값을 그린 그림이고, Fig. 6 (b)는 $\theta_{true} - \theta_{measured}$ 의 값을 그린 그림이다. 그림에서 보듯이 θ_{true} 값과 $\theta_{measured}$ 값 사이에 특정한 오프셋을 두고 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 표 3는 $\theta_{true} - \theta_{measured}$ 의 통계 처리 결과이다.

한편, 측정할 때 풍향 센서의 출력전압에는 약 2.4도 크기의 고주파 신호 잡음이 내재되어 있었는데, 통계 결과중 표준편차의 주된 요인은 센서의 출력 전압에 포함된 신호잡음의 영향으로 생각된다. 통계적 처리 결과와 불확실성에 의한 오차 해석 결과를 고려하면, 전체적으로 설치된 풍향센서는, 68%의 신뢰수준 한계에서 진북으로부터 16.14 degrees ± 3.46 degrees 어긋나 있음을 볼 수 있다. 만약 카메라의 분해능을 향상시키고 센서 출력 전압에 대한 신호 잡음의 문제를 필터링 기법을 통하여 해결한다면, 진북으로부터 어긋남에 대한 신뢰 수준에서의 오차 범위를 줄일 수 있을 것으로 추측된다.

VI. 결론

본 논문에서는 카메라를 사용하여 풍향 계측 타워에 설치된 풍향 센서의 진북으로부터의 어긋난 정도를 구하는 기법

을 제안하였고, 대관령 실증 연구 단지의 풍황 계측 타워에 적용하여 그 효용성을 확인하였다. 이와 더불어, 측정에서의 불확실성들에 대한 정량적 해석을 수행하였다. 본 논문의 연구 결과는 비교적 쉽게 풍향센서의 진폭으로 부터의 어긋난 정도를 구할 수 있으며, 불확실성 해석의 결과를 바탕으로 결과의 신뢰정도를 검증할 수 있다. 따라서, 실제 풍황 계측 타워에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

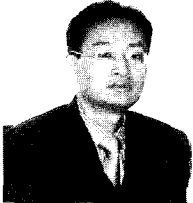
참고문헌

- [1] N. S. Yoo, S. H. Kim, Y. S. Nam, J. W. Lee, B. H. Kim and K. H. Kim, "Wind turbine certification research for the daekwanryung test Site", *Korean Wind Energy Conference*, 2002.
- [2] "Wind measurement, issue 17. 5. 200", Ammonit, 2000.
- [3] L. Kristensen, G. Jensen, A. Hansen, and P Kirkegaard, "Field

calibration of cup anemometers", *Riso National Laboratory*, Denmark, 2001.

- [4] "Wind turbine generator systems part I, safty requirement", *IEC61400-1*, Second Edition, 1999.
- [5] "Wind turbine generator systems part I2, wind turbine power performance testing", *IEC61400-12*, First Edition, 1998.
- [6] J. H. Cha, "Development of wind turbine remote monitoring system", Master thesis, Kangwon National University, pp. 30-40, 2004.
- [7] H. K. Kim, "A study of a 750kW wind turbine monitoring system using labview", Master thesis, Kangwon National University, pp. 44-54, 2004.
- [8] E. O. Doebelin, *Measurement Systems, Application and Design*, McGraw-Hill International Edition, 1989.

이 정 완



1966년 10월 7일생. 1989년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1992년 한국과학기술원 정밀공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 1999년~현재 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부 조교수. 관심

분야는 로봇틱스, 비선형제어.

유 능 수



1950년 11월 1일생. 1976년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1978년 연세대학교 기계공학과(공학석사). 1982년 프랑스 University of Poitiers 기계공학과(공학박사). 1983년~현재 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부 교수. 관

심분야는 항공공학, 풍력 발전 시스템 실증연구.

남 윤 수



1958년 12월 29일생. 1984년 서울대학교 원자핵공학과(공학사). 1986년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1992년 미국 조지아 공대 기계공학과(공학박사). 1996년~현재 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부 부교수. 관심분야는 메카

트로닉스, MEMS, 풍력 발전 시스템 개발.