

노이즈에 둔감한 미소변형 형상측정 장치

Robust Shape Measuring System to Noise for Measuring Micro Deformation

박승규*[†], 백성훈*, 김영석**, 정용무**, 차형기*, 강영준***

Seung-Kyu Park*[†], Sung-Hoon Baik*, Young-Suk Kim**, Yong-Moo Cheong**, Hyung-Ki Cha*
 and Young-June Kang***

초 록 본 논문에서는 단일 광간섭 프린지 영상에서 위상정보를 추출함으로써 진동이 존재하는 일반적인 산업 현장에서도 변형 정보를 추출할 수 있는 정밀 형상 측정 장치를 구성하였다. 본 장치는 측정 대상체의 표면에 간섭성이 높은 레이저 광을 조사하여 광간섭 영상을 생성하고, 시간차 변화에 따른 차분 영상을 획득함으로써 측정 대상체의 표면변형 정보를 포함하고 있는 프린지 영상을 획득한다. 측정 대상체의 미소변형 정보인 위상 영상은 단일 프린지 영상으로부터 획득된다. 저주파 성분이 강한 위상 정보와 광대역 스펙트럼을 갖는 노이즈 성분이 함께 섞여 있는 단일 프린지 영상에서 위상 정보만을 효율적으로 추출하기 위하여 본 논문에서는 원하는 주파수 대역만을 효과적으로 선택할 수 있는 주파수 영역에서의 대역 필터를 사용하였다. 본 논문에서 구성한 미소변형 형상 측정 장치는 진동이 존재하는 현장에서 인장 시험편의 미소변형 형상을 측정함으로써 실용성을 확인하였다.

주요용어: 간섭 영상, 프린지 영상, 위상 영상, 대역 필터, 형상측정

Abstract In this paper, a precise 3D shape measurement system applicable to industrial fields is configured by extracting phase information from a fringe image. The fringe image, which has deformation information about an object, is a time difference image of the interference images produced by projecting coherent laser light to the surface of an object. The phase information about a surface deformation is extracted from a single fringe image. In this paper, a band-pass filter in the frequency domain is used to efficiently extract a phase image from a fringe image with noise of wideband frequency spectrum. We tested the practical use of this system by measuring the deformation shape of a tensile specimen in a mechanical vibrating field.

Keywords: Interference Image, Fringe Image, Phase Image, Band-Pass Filter, Shape Measurement

1. 서 론

디지털 스펙클 간섭계(DSPI: digital speckle pattern interferometer)는 디지털화된 자동시스템의

구성이 용이하여 최근 급속히 발전한 전자기술과 컴퓨터기술의 발전과 더불어 활용 영역이 점차로 넓어지고 있는 추세이다. 디지털 스펙클 응용 기술은 일반 물체의 미소 변형 형상 측정이나, 물체의

진동 패턴 측정, 유체의 굴절을 분포도 측정, 인장 강도에 따른 영역별 스트레인 분포 측정 등 다양한 비파괴 검사 분야에 응용될 수 있다[1-4]. 자동화가 가능하면서도 원거리 비접촉의 면적단위 측정방식인 DSPI 측정 기술은 방사선 구역과 같이 사람의 접근이 용이하지 않은 지역에서의 응용이 용이하다.

원자력발전소에서는 방사선 환경이면서도 고압인 환경에서 장시간 운영되는 설비들이 많으며, 이러한 원전 설비 부품에 대한 품질 평가용 비파괴 검사는 중요한 안전성 평가 사항 중의 하나이다. 현재, 원자력발전소 설비의 비파괴 검사에는 초음파 탐상법과 와전류 탐상법 및 X-선 검사 등이 널리 활용되고 있다. 최근 들어서 원거리 비접촉 측정방식의 장점을 갖고 있는 DSPI 기술도 원자력 설비 부품의 품질 평가 분야에 활용이 시도되고 있다[5, 6].

빛의 파장의 수십 분의 1 정도로 정밀한 변형 위상 정보를 얻기 위한 DSPI 시스템은 한쪽 레이저 빔 위상을 이동시키면서 복수의 영상을 획득한 다음 이들의 조합으로부터 세부적인 위상정보를 추출한다. 그러나 이러한 정밀 DSPI 시스템은 레이저 빔의 위상이동 중에 외부 진동이 유입이 되면 에러가 발생하여 측정이 불가능한 단점이 있다. 이러한 단점으로 인하여 DSPI 기술은 일반적인 산업 현장에서 직접적으로 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 외부 잡음에 강한 DSPI 시스템을 구성하여 진동이 유입되는 현장에서도 응용이 가능한 미소 변형 측정 장치를 구성하였다. 외부진동에 둔감한 장치를 구성하기 위하여 본 논문에서는 단일 프린지 영상에서 위상정보를 추출하는 시스템을 구성하였다. 단일 영상에서의 위상 정보 추출 방식은 ms 이하인 카메라 센서의 짧은 촬영 시간 동안에 획득되는 스펙클 광간섭 영상으로부터 위상정보를 추출하므로 외부 진동의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 하나의 프린지 영상에서 위상정보를 추출하는 방식은 위상 이동된 복수 영상으로부터 얻는 위상정보에 비하여 신호 대 잡음 비율이 낮은 단점이 있다[7]. 특히, 임펄스 패턴의 고주파 성분이 많이 섞여있는 스펙클 간섭의 단일 프린지 영상으로부터 추출된 위상 정보에는 잡음의 영향이 클 것이다. 본 논문에서는 DSPI 시스템의 성능을 높이기 위하여 주파수 영역에서 선택적으로 대역 필터를 적용함으로써 고주파 성분의 잡음을 효과적으로 제거하였다. 구성된 시스템은 진동이 있는 현장

에서 인장시험에 따른 시편의 미소변형 형상을 측정함으로써 시스템의 성능을 확인하였다.

2. DSPI 시스템의 구성

본 논문에서 구성한 DSPI 시스템의 세부 구성도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 스위치(SW) 블록이 위쪽으로 위치하면 DSPI시스템은 in-plane 방향으로의 미소 변형을 측정하며, 아래쪽으로 위치하면 측정 표면상에서 out-of-plane 방향으로의 미소 변형을 측정한다.

Fig. 1에 보이는 바와 같이, 레이저에서 방사된 간섭성이 높은 레이저 빔은 빔 분할기에 의하여 두 개의 빔으로 분할되고, 반사 분할된 첫 번째 빔은 최종단의 공간필터 렌즈를 통과하면서 확산되어 검사된 아래쪽 방향으로 측정 대상체의 표면에 조사된다. 두 번째 빔은 하단의 빔 분할기를 통과하여 하단의 공간필터 렌즈를 통과한 후에 확산되어 검사된 위쪽 방향으로 측정 대상체의 표면에 조사된다. 두 레이저 빔의 조사에 의해 간섭된 스펙클 간섭무늬 영상은 프로그레시브(progressive) 스캔 카메라(ArtCam-098, ArtRay Inc.)에 의해 전자신호로 변환된다. 본 논문에서는 경제적이면서도 간편한 시스템 구성을 위하여 USB통신 방식에 기초한 프레임 전송 방식의 CCD카메라를 사용하였다. 획득한 스펙클 간섭 영상의 크기는 640x480 픽셀이다.

변형 전과 변형 후의 두 스펙클 간섭 영상의 차분으로 얻어진 하나의 프린지 영상에서 미소한 변형정보를 추출하는 Fig. 1의 시스템은 카메라 센서의 짧은 촬영 시간 동안의 노출로 영상 정보를 획득하므로 외부 진동의 영향을 거의 받지 않는다.

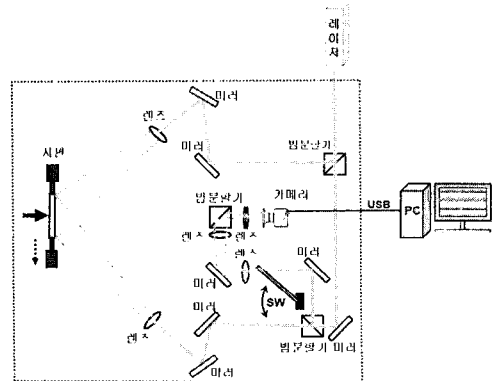


Fig. 1 Configuration of a digital speckle pattern interferometer

그러므로 본 DSPI 시스템은 실제 진동이 존재하는 현장에 적용이 가능한 장점을 갖고 있다.

3. 위상정보 추출 실험

본 논문에서는 진동이 존재하는 실험 현장에서 인장시험편의 표면 미소변형 형상 측정 실험을 수행하였다. DSPI는 인장 시험시편 표면의 in-plane 방향의 변형을 측정하게 구성하였다. 실험실에서는 유압 액추에이터와 냉각펌프 및 냉각팬이 동작되고 타 장비들도 동시에 운영되고 있다. 약 15Hz의 샘플링 속도로 프린지 영상을 획득해 본 결과 매번 한 프린지 간격 이상의 큰 진폭을 갖는 진동이 유입되고 있었다. 이러한 실험환경에서 위상이동 방식의 DSPI시스템으로는 세부적인 위상맵 정보를 획득하는 것이 불가능 하였다. 이와 같이 진동이 존재하는 실제 환경에서도 미소변형 형상을 측정할 수 있도록 본 논문에서는 단일 프린지 영상으로부터 위상정보를 추출하는 DSPI 시스템을 구성하여 측정을 수행하였다. 본 논문에서 구성한 DSPI시스템으로 획득한 기준 스펙클 간섭영상은 Fig. 2와 같다.

인장 시험에 의하여 연속으로 변형되는 측정 시편상의 표면 변형 량이 스펙클 간섭무늬의 가간섭 범위를 넘어서면 간섭무늬가 생성되지 않으므로 본 논문에서는 일정 시간차 동안의 상대적인 변형 량을 측정하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 인장시험 동안에 약 15 Hz의 샘플링 속도로 스펙클 영상을 연속으로 획득하여 시간 순으로 모든 영상을 메모리에 저장을 하였다. 이때 A/D변환기를 사용하여 인장시험기의 제어부에서 출력되는 현재의 스트레인-스트레스 값도 동시에 획득하여 이에 대한 정보도 함께 메모리에 저장하였다.

시간 순으로 저장된 스펙클 간섭 영상에서 사용

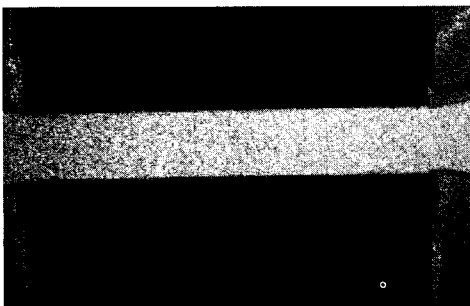


Fig. 2 Acquired reference speckle image

자는 원하는 스트레인-스트레스 커브 구간에서 원하는 시간차로 메모리에 저장된 두 스펙클 간섭 영상을 읽어 들여, 앞쪽의 영상을 Fig. 2와 같이 기준 영상으로 설정하고 뒤쪽의 스펙클 간섭 영상을 Fig. 3과 같이 변형영상으로 설정한 다음, 두 영상을 차분하여 Fig. 4와 같은 하나의 프린지 영상을 획득한다. 스펙클 간섭무늬로부터 얻어진 프린지 영상에는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 임펄스 노이즈 형태의 고주파 노이즈 성분이 많이 섞여있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 프린지 영상의 Y축 중앙부에서 바라본 X축 방향의 선형 프로파일이다. 본 프로파일과 프린지 영상에서 관찰할 수 있듯이 위상 정

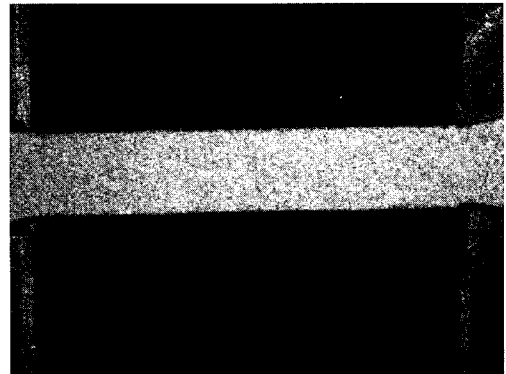


Fig. 3 Deformed speckle image



Fig. 4 Acquired fringe image

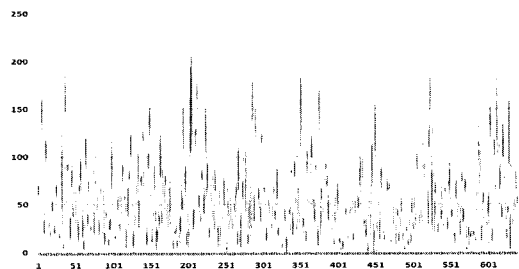


Fig. 5 Line profile of a fringe image

보는 주로 저주파 영역에 존재하고 잡음은 광대역 스펙트럼으로 존재한다. 그러므로 DSPI 시스템은 고주파 성분은 제거하면서도 저주파 성분은 유지할 수 있는 효과적인 신호처리를 통하여 위상정보를 추출하여야 할 것이다.

4. 위상정보 추출을 위한 신호처리

본 논문에서 구성한 DSPI 시스템의 세부 신호처리 순서도는 Fig. 6과 같다. 사용자는 인장시험 동안에 시간 순으로 메모리에 저장된 모든 스펙클 영상 중에서 스트레인-스트레스 커브 상에서 변형 정보의 추출을 원하는 시간대의 두 영상을 선택한다. 선택된 영상은 Fig. 2와 같은 기준 스펙클 영상과 Fig. 3과 변형 스펙클 영상이다. 프린지 영상은 선택된 두 영상의 차분 영상이며 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x,y) = d(x,y) + \left(\frac{1}{2}\right)b(x,y)e^{i\phi(x,y)} + \left(\frac{1}{2}\right)b(x,y)e^{-i\phi(x,y)} \quad (1)$$

여기서 $b(x,y)$ 는 영상의 (x, y) 위치에서의 밝기 강도이며, $d(x,y)$ 는 영상의 DC성분이다. 그리고 $\phi(x, y)$ 는 변형 정보인 위상 성분이다.

생성된 프린지 영상은 주파수 변환기에 의해 식 (2)와 같이 주파수 영역의 신호로 변환된다.

$$F(w_x,w_y)=D+B(w_x,w_y)+B^*(w_x,w_y) \quad (2)$$

여기서 D 는 주파수 영역에서의 DC 계수이며 $B(w_x,w_y)$ 는 $\left(\frac{1}{2}\right)b(x,y)e^{i\phi(x,y)}$ 에 대한 주파수 영역 표현이다. 그리고 $F(w_x,w_y)$ 는 $f(x,y)$ 에 대한 주파수 영역 표현이며, *는 복소공액을 나타낸다.

주파수 영역에서 사용자는 대응하는 공액 신호 중에서 어느 한쪽만을 선택하며, 선택된 신호중에서 원하는 대역의 주파수 성분만을 선택한 다음 시간 영역의 영상신호를 획득한다. 시간영역으로 변환된 영상 신호는 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{f}(x,y) = \left(\frac{1}{2}\right)\bar{b}(x,y)e^{i\phi(x,y)} \quad (3)$$

시간영역으로 변환된 영상신호는 위상정보 ϕ 를 포함하고 있으므로 이를 추출하여 위상맵 영상을 획득한다.

추출된 위상맵 영상은 2π 를 넘어서면 다시 위상이 처음부터 시작하는 반복 위상맵인 래핑 위상맵이 획득된다. Fig. 7은 Fig. 4의 프린지 영상에서 위상정보 ϕ 를 추출하여 획득한 래핑 위상맵이다. Fig. 8은 Fig. 7의 래핑 위상맵의 Y축 중앙부에서 바라본 X축 방향으로의 선형프로 파일이다.

본 논문에서는 저주파수 대역에 주로 분포하는 위상 성분은 보존하면서 광대역 스펙트럼에 분포되어 있는 노이즈 성분을 효과적으로 제거하기 위하여 주파수 영역에서 설정되는 대역필터를 사용하였다. 주파수 대역의 설정방법은, 예를 들어 X축 방향으로의 필터를 선정함에 있어서, 전체 $N_x \times N_y$ 픽셀 영상에서 X축 방향으로의 변형 위상 성분 중에서

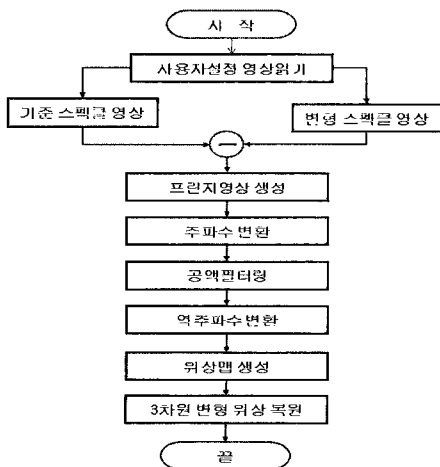


Fig. 6 Signal processing flowchart to get phase information of DSPI



Fig. 7 Acquired phase map

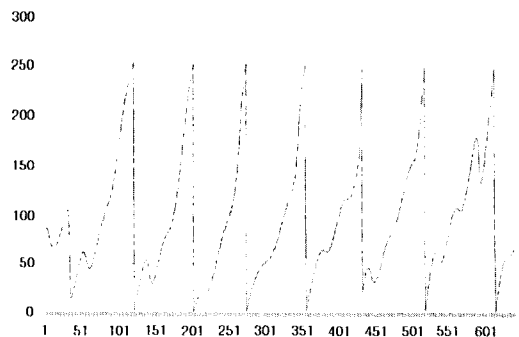


Fig. 8 Line profile of a phase map

제일 큰 주파수 신호의 한 프린지 주기가 z픽셀이라고 가정하면 필터창의 크기는 $(N_x/z)\times\epsilon$ 로 설정하였다. 여기서 ϵ 은 조금 더 세밀한 정보를 얻기 위한 가중치 값으로 1.0 보다 큰 실수이다. 획득된 위상맵 영상에서 관찰 할 수 있듯이 주파수 영역에서의 선택적 주파수 필터링 방식은 고주파 노이즈 성분을 효과적으로 제거함을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 7의 래핑 위상맵 영상에 대해 끊어진 위상 부분을 복원한 위상복원 영상이다. Fig. 10은 Fig. 9의 Y축 중심부에서 바라본 X축 방향의 선형 프로파일이다. 본 논문에서는 최소자승위상복원법(least - squares phase unwrapping)을 사용하여 위상정보를 추출하였다.

인장 시험편의 미소 변형처럼 저주파 변형 성분의 위상 복원시에는 저주파 통과 필터 특성이 있는 최소자승위상복원법이 적합하다 [8]. 최소자승위상복원법을 사용하여 복원한 탄성 영역에서 인장 시험편의 in-plane 방향의 변형 형상은 Fig. 9와 같다. 인장 시험편 표면상에서 in-plane 방향의 변형은 Fig. 9와 같이 누적 변형 영상이므로 각 국소 픽셀에서의 변형을 구하기 위하여 이웃 픽셀간의 변화 영상인 차분 영상을 구하였다. Fig. 11은 위상 영상인 Fig. 9의 영상에 대하여 11x11픽셀 창을 씌운 이웃픽셀간의 차분영상 구한 결과이다. Fig. 12는 Fig. 11의 Y축 중심부에서 바라본 X축 방향의 선형 프로파일이다.

스펙클 간섭무늬로부터 획득된 위상정보에는 노이즈 성분이 섞여 있으므로 본 논문에서는 11x11

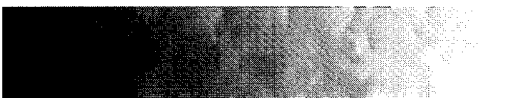


Fig. 9 Unwrapped image for a phase map

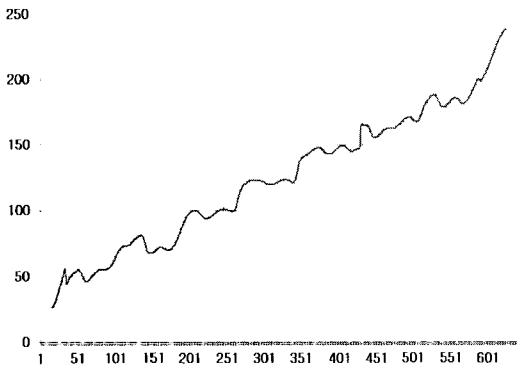


Fig. 10 Line profile of a unwrapped phase image

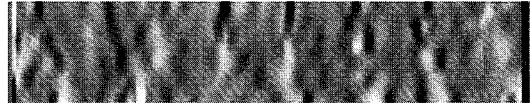


Fig. 11 Deformed phase image

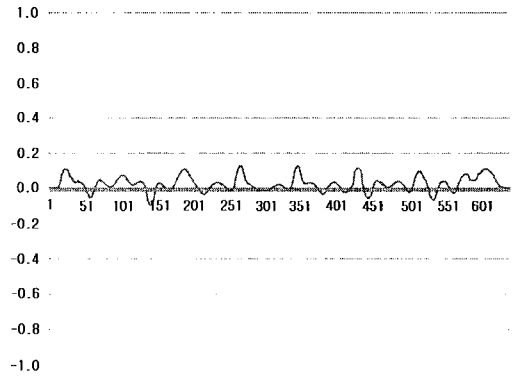


Fig. 12 Line profile of a deformed image

픽셀 창을 이용하여 이웃 픽셀간의 평균화된 차분 영상을 추출하였다. 이와같이 평균화된 차분영상은 각 픽셀 위치에서의 세밀한 위상정보 제공 기능은 저하시키지만 국소 영역별 평균화된 변형 정보를 효과적으로 제공한다.

5. 결 론

본 논문에서는 단일 프린지 영상으로부터 위상정보 추출을 함으로써 산업 현장 활용이 용이한 진동에 둔감한 미소변형 형상 측정 시스템을 구성하였다. 이동의 간편성과 경제적 구성을 위하여 본 논문에서는 스펙클 광간섭 광학계와 USB 통신방식의 프로그래시브 스캔 카메라 및 노트북 컴퓨터를 이용하여 간단화된 DSPI시스템을 구성하였다.

진동이 유입되는 실험실 환경에서 인장시험편의 미소변형 측정에 대한 실험결과, 단일 프린지 영상의 주파수 영역에서 적용한 필터는 노이즈 성분을 효과적으로 제거하였다. 구성된 시스템은 저주파 성분이 많은 미소 변형 형상측정에 효과적이며, 또한 진동이 심한 산업 현장에서의 정밀한 형상 측정에 효과적으로 적용될 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 과학기술부 후원으로 수행되는 원자력 기술개발 사업의 일부로 수행되었다.

참고문헌

- [1] 백성훈, 박승규, 김철중, "스펙클 간섭계의 응용", 한국정밀공학회, 제 21권 제 5호, pp. 14-18, (2004)
- [2] K. J. Kote and M. S. Dadkhah, "Whole field displacement measurement technique using speckle interferometry," Electronic Components and Technology Conference, (2001)
- [3] F. Labbe, "Strain-rate measurement by electronic speckle-pattern interferometry (ESPI)," *Opt. & Lasers in Eng.*, Vol. 45, pp. 827-833, (2007)
- [4] 백승환, 김용재, 고한서, "비정상 비대칭 기계 유동의 3차원 밀도분포 분석을 위한 디지털 스펙클 토모그래피 기법의 신호처리 기술개발", *비파괴검사학회지*, Vol. 26, No. 2, pp. 108-114, (2006)
- [5] S. Tamulevicius, L. Augulis and R. Augulis, "Thermal strain measurements in graphite using electronic speckle pattern interferometry," *Proceedings: IAEA Technical Committee Meeting on Nuclear Graphite Waste Management*, pp. 125 - 133, (1999)
- [6] A. Ueda, S. Ueta, K. Kato, K. Tsukamoto, H. Sato and Y. Nishimura, "A preliminary report of development of high resolution phase shift interferometry for the assesment of nuclear waster disposal," *J. of Geochemical Exploration*, Vol 88, pp. 355-357, (2006)
- [7] M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and inteferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 1, pp. 156-160, (1982)
- [8] M. D. Pritt and J. S. Shipman, "Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's," *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 3, pp. 706-708, (1994)