

광기술의 첨단응용분야:

광기술 통계간섭법을 이용한 환경 계측

출처 : 광기술Conact 2006년 4월호

현대사회에서 광기술은 다양한 첨단산업분야에 응용 및 활용되고 있으며 산업발전에 큰 일조를 하고 있다. 본고는 레이저광이 식물의 표면에 산란됨으로써 생기는 레이저 스펙클(Speckle)을 이용한 새로운 초고감도 간섭계측법의 원리를 서술하고 이것을 이용한 식물의 활성 상태나 생장(신장) 모니터링에 관한 최근 연구 성과를 소개한 것이다. 이 계측법에서는 스펙클 필드(場)의 임의성에 기초한 새로운 간섭계측법인 통계적 간섭법을 이용하여 초고감도의 계측을 실현하고 있다.

글/카도노 히로부미

1. 머리말

최근 공업생산이나 인간 활동의 급속한 증가에 따라 대기오염이나 수질오염 등 여러 가지 환경오염이 발생하여 동식물에 심각한 영향을 미치고 있다. 환경오염을 억제 또는 방지하기 위해서는 오염의 상황이나 영향을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 필자는 환경이 식물에 미치는 영향을 간편하게 인필드에서 센싱(Sensing)이 가능한 광계측법의 확립을 목적으로 하는 연구를 해왔다. 빛을 이용한 계측은 비접촉, 무침습인 점이 이점이기 때문에 우리들의 목적에 적합하다. 먼저 서술한 식물의 굴성이나 회전운동 등은 매크로적인 운동이며 예전부터 인식되고 연구되어 왔다. 이에 비해 광간섭법¹⁾을 응용하면 빛의 파장 레벨 또는 그 이하의 스케일에서 식물의 동태를

정밀하게 관측할 수가 있다. 이러한 간섭계측은 공업재료 등에 대해서는 일상적으로 이루어지고 있지만 식물에 대해서는 거의 적용되지 못한 것이 현 상황이다.

본고에서는 레이저광이 식물의 표면에 산란됨으로써 생기는 레이저 스펙클(Speckle)을 이용한 새로운 초고감도 간섭계측법^{2,3,4,5,6,7)}의 원리를 서술하고 이것을 이용한 식물의 활성 상태나 생장(신장) 모니터링⁸⁾에 관한 최근 연구 성과를 소개하겠다. 이 계측법에서는 스펙클 필드(場)의 임의성에 기초한 새로운 간섭계측법인 통계적 간섭법을 이용하여 초고감도의 계측을 실현하고 있다.

2. 통계적 간섭법의 원리

그림 1은 식물의 생장 계측에 이용한 실험광학계를 나타낸 것이다. YAG 레이저(SHG)(파장 $\lambda=532\text{nm}$)에서 직선편광으로 출사된 빛은 Beam splitter PBS에 의해 2개의 빔으로 분할되어 각각 미러 M_2 및 M_3 에 의해 반사되고 다시 PBS에 입사된다. 이 2개의 빔을 렌즈 L로 서로 평행하게 한 후 물체를 2점에서 수직으로 조

명한다. 여기에서 물체표면은 광학적으로 충분히 거칠게 한다. 즉, 표면거침이 빛의 파장에 비해 크다고 하면 충분히 발달한 2개의 스펙클 필드(場)가 각각 독립적으로 생긴다. 물체법선에서 각도 θ 의 위치에 놓여진 CCD 카메라에 의해 2개의 스펙클 패턴의 중첩(Superposition)의 결과 생기는 역시 임의적인 간섭 패턴이 계산기에 저장된다. CCD 카메라의 전면에 놓인 편광 필터 PL은 45° 의 편광각으로 설정되어 있어 2개의 스펙클 필드(場)의 간섭 성분만을 선택한다. 조명 빔의 간격을 x 로 하고 2점 사이에서 Δx 의 면 안에서 신장이 일어나면 2개의 스펙클 필드(場) 사이에는 다음과 같은 위상차 $\Delta \phi$ 가 생긴다.

$$\Delta \phi = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \sin \nu \quad (1)$$

식물의 신장에 따른 임의의 간섭 패턴의 변화가 축차($t=t_0, t_1, \dots, t_n$) 계산기에 저장되어 프레임 메모리에 기억된다. 그림 2(a)에 조면물체의 신축에 따른 위상 변화를 Phaser 그림으로 나타낸다. 목적은 이들 Phaser 사이의 위상각을 결정하는 것이다. 여기에서 저장된 복수의 화상에서 임의의 3가지 화상의 조합(시각 $t=k_1, k_2, k_3$)을 생각해보자. 단순화를 위해 $t=k_2$ 의 Phaser가 실축상에 오도록 좌표를 회전시켜 둔다.(그림 2(b)) 3개의 화상의 강도를 I_1, I_2, I_3 에 두면 각각 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1(x) &= I_0(x)[(1+\gamma(x)\cos\{\phi(x)+\psi_1\})], \\ I_2(x) &= I_0(x)[(1+\gamma(x)\cos\phi(x))], \\ I_3(x) &= I_0(x)[(1+\gamma(x)\cos\{\phi(x)+\psi_3\})] \end{aligned} \quad (2)$$

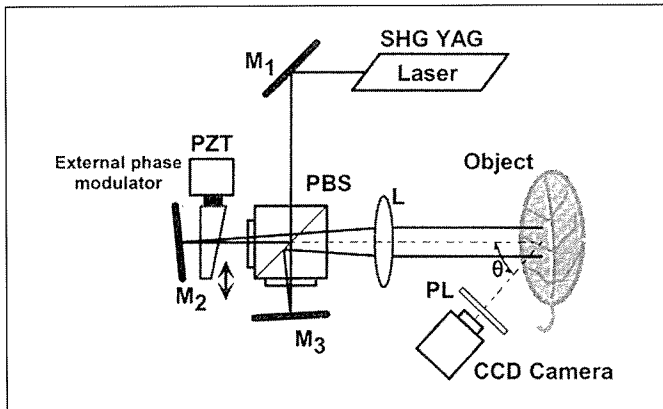


그림 1. 식물생장계측에 이용한 통계간섭광학계

광원으로써 YAG 레이저의 2배파(파장 532nm)를 이용. 레이저광은 편광 Beam Splitter(PBS)에 의해 2개로 나누어진 미러(M₂, M₃) 및 렌즈(L)에 의해 서로 평행이 되어 물체상의 2점을 조명한다.

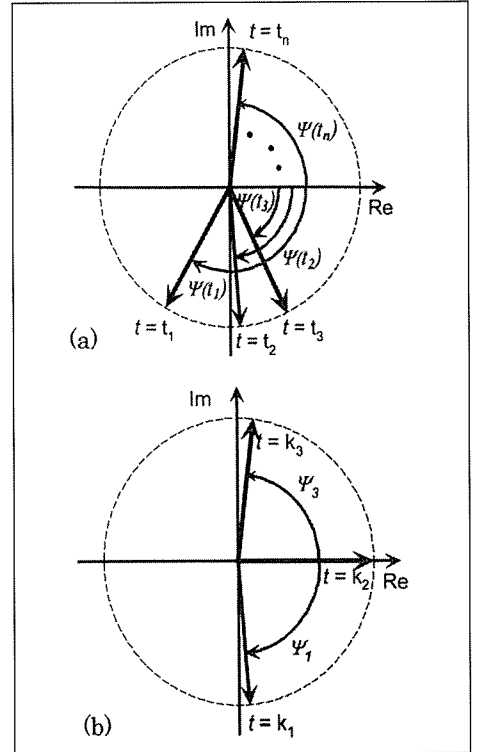


그림 2.

(a) 물체위상 $\psi(t)$ 의 변화를 Phaser를 이용하여 나타냄.
(b) n개의 Phaser에서 임의로 3개의 조합을 생각. 단순화를 위해 2번째 Phaser를 실축상에 오도록 회전시킴. 문제는 ψ_1, ψ_3 를 결정하는 일이다.

여기에서 $I_0(x), \gamma(x)$ 는 각각 각 점에서의 평균 강도, 가시성(Visibility)이며, $\phi(x)$ 는 임의의 스펙클 위상이다. ψ_1, ψ_3 은 구해야하는 물체 변위에 대응하는 위상이다. 3개의 방정식에 대해 5개의 미지수가 존재하므로 연립방정 Eq.(2)에서 바로 ψ_1, ψ_3 을 풀 수는 없다. 그래서 ψ_1, ψ_3 에 대해 다음과 같이 가정한다.

$$-\psi_1 = \psi_3 = \psi \quad (3)$$

여기에서는 ψ 를 가상위상이라고 부르고 그 값은 임의로 선택할 수가 있다. 이와 같이 미지수를 외관상 감소시킴으로써 공간상의 각 점에서 스펙클 위상 ϕ 를 해결할 수가 있다. Eq.(2)에서 얻어지는 3개의 화상에서 스펙클 위상은

$$\phi'(x) = \tan^{-1} \frac{I_1(x) - I_3(x)}{I_1(x) + I_3(x) - 2I_2(x)} \cdot \frac{\cos\psi - 1}{\sin\psi} \quad (4)$$

으로 얻을 수 있다. Eq.(3)의 가정 하에 계산된 스펙클 위상을 “진짜 스펙클 위상”과 구별하기 위해서 여기에서는 $\phi'(x)$ 라고 하고, “계산된 스펙클 위상”이라고 부르기로 한다. 우리들은 각 점에서 임의의 스펙클 위상 $\phi(x)$ 의 구체적인 값은 모르지만 그 통계적 특성은 매우 잘 알고 있다.

즉 스펙클 상위의 확률밀도관수 $P_{\phi}(\phi)$ 를 다음 식으로 얻을 수 있는 것처럼 $-\pi$ 에서부터 π 에 걸쳐 똑같이 분포한다.

$$P_{\phi}(\phi) = \frac{1}{2\pi}, (-\pi < \phi \leq \pi) \quad (5)$$

이러한 성질을 갖는 스펙클 필드(場)는 충분히 발달한 스펙클 필드(場)라고 불리며, 스펙클 패턴의 명암 정도를 나타내는 스펙클 콘트라스트는 가장 커져 1이 된다. 동시에 그 파면은 임의성을 갖게 되어 스펙클 위상은 똑같이 분포하게 된다. 스펙클 이론에 의하면 이러한 스펙클 필드(場)의 발생에 필요한 조건은 레이저에서 조사되는 조면의 표면 거침이 빛의 반파장 정도 아니면 그 이상만이 요구된다. 식물은 원래부터 보통 주변의 대부분의 물체가 이 조건을 만족하고 있다. 이 조건보다도 표면 거침이 작은 경우 스펙클 콘트라스트는 1보다 작은 값을 취한다. 이러한 스펙클 필드(場)는 미발달한 스펙클 필드(場)라고 불리며, 물체의 표면 거침 및 표면 높이 변동의 상관장(횡방향의 거침)이나 이용되는 광학계의 상세한 파라미터에 복잡하게 의존하는 것으로 알려져 있다.

그러나 표면 거침의 조건이 만족되면, Eq.(5)에서 얻어지는 특성은 매우 높은 정도(精度)에서 성립된다.

한편, 미지의 물체 위상 ψ_1, ψ_3 은 어떠한 값도 취할 수 있으므로 Eq.(3)의 가정은 일반

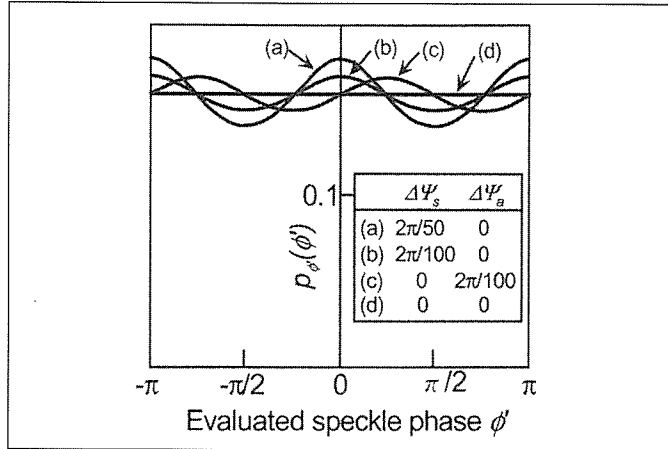


그림 3. 미지의 물체 위상에 대한 가정에 구해진 스펙클 위상 ϕ' 의 확률밀도분포 $p_{\phi'}(\phi')$

가정이 실제 물체 위상에서 어긋남에 따라 본래 균일해질 분포에서 불균일한 분포로 변화한다.

적으로는 성립되지 않는 불합리한 가정이다. 따라서 Eq.(4)에서 얻어지는 계산된 스펙클 위상은 진짜 스펙클 필드(場)의 위상과는 달라져 있다. 계산된 스펙클 위상 ϕ' 의 확률밀도관수 $p_{\phi'}(\phi')$ 는 확률변수 ϕ 에서 ϕ' 로의 변환으로서 다음 식을 계산함으로써 쉽게 찾을 수 있다.

$$p_{\phi'}(\phi') = p_{\phi}(\phi) \left| \frac{d\phi(\phi')}{d\phi} \right| \quad (6)$$

그림 3은 이론계산 결과의 일례를 나타낸 것이다. 여기에서는 전망을 좋게 하기 위해 물체 위상 ψ_1, ψ_3 의 가상 위상 ψ 에서의 편차를 대칭위상항 $\Delta\psi_s$ 및 반대칭위상항 $\Delta\psi_a$ 를 이용하여 나타냈다. 즉,

$$\psi_1 = -\psi - \Delta\psi_s + \Delta\psi_a \quad (7)$$

$$\psi_3 = \psi + \Delta\psi_s + \Delta\psi_a \quad (8)$$

이다. 그림 3에서 $\Delta\psi_a \neq 0$ 또는 $\Delta\psi_s \neq 0$ 일 때, 본래 $-\pi$ 부터 π 에서 똑같이 분포해야 하는 스펙클 위상의 확률밀도가 불균일하게 분포하는 것을 알 수 있다. 특히 파장의 1/100의 비교적 작은 위상 성분에서조차 현저한 영향을 주고 있다는 것은 주목할 만하다. (그림 3(b)(c)) 그렇다면 본래 똑같이 분포하는 진짜 스펙클 위상의 확률밀도분포를 기준으로 미지의 물체 위상 ψ_1, ψ_3 또는 $\Delta\psi_s, \Delta\psi_a$ 를 결정할 수는 없는 것일까. 삼각관수의 직교성을 이용하여, 계산된 스펙클 위상의 확률밀도 분포에서 $\cos 2\phi'$ 및 $\sin 2\phi'$ 성분을 추출하여 이들로 부터 미지의 물체 위상 ψ_1, ψ_3 에 대해 한결

같은 해답을 찾을 수가 있다²⁶⁾. 우리들 목적은 그림 2(b)에 나타난 모든 Phaser 사이의 위상각을 결정하는 것이지만, 이것은 3개의 회상의 조합을 바꾸면서 같은 처리를 반복함으로써 이루어진다. 확정적인 방법인 종래의 방법에서는 간섭계측 정도(精度)의 향상이란 확정적인 파면을 도입하여 온갖 오차나 흔들림을 배제하여 정밀하게 제어하는 것이며, 요구되는 정도(精度)가 높아짐에 따라 기술적으로도, 코스트 면에서도 큰 문제가 된다. 게다가 고정도화를 달성하는 기술은 이용되는 광학계나 요구 정도에 강하게 의존하여 똑같지 않다. 이에 대해 통계적 간섭법에서는 위상의 기준을 스펙클 위상의 완전한 임의성에서 구하고 있다. 즉, 단순히 공학적으로 거친 표면을 레이저광으로 조사함으로써 위상의 기준이 자연히 만들어지는 것이다. 충분히 발달된 스펙클 필드(場)는 일종의 포화된 상태이기 때문에 그 특성은 광학계에 이용되는 렌즈나 거울 등의 광학소자의 면정도(面精度)에는 의존하지 않고 안정된 위상의 기준으로써 이용할 수가 있다.

통계적 간섭법에서는 단순히 확률밀도관수를 구할 때 이용되는 데이터 샘플수가 계측정도를 결정한다. 계산기 시뮬레이션에 의하면, 약 3만점의 데이터를 이용함으로써 $\lambda/1000$ 의 정도(精度)가 달성됨을 알 수 있다. 오늘날에는 수백만 화소의 CCD 카메라의 이용도 가능하며, 게다가 높은 정도(精度)에서의 계측도 가능하다.

3. 식물의 성장 계측

지금까지는 통계간섭법을 이용하여 금속 등 재료의 변위, 열 변형 등의 측정에 응용하고, 그 유효성을 확인했다⁵⁻⁷⁾. 그림 4는 식물

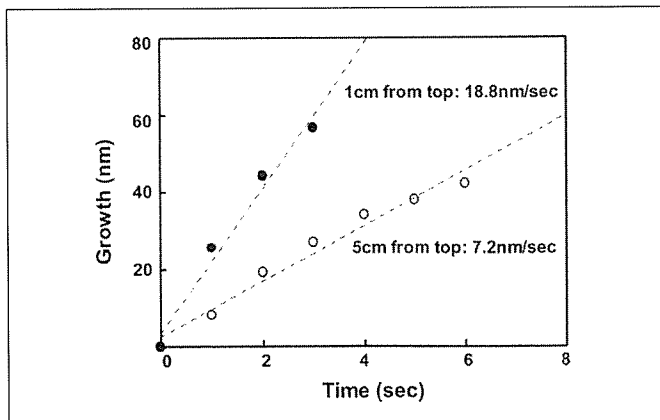


그림 4. 부추 잎에 대한 레이저 빔 조사 2점간 신장 측정 결과

● 표시는 잎의 선단에서부터 1cm, ○ 표시는 5cm의 부위에서 계측한 결과를 나타냄. 성장점은 잎의 선단부에 위치하기 때문에 성장속도가 보다 빠르다.

시료로서 부추를 이용한 경우의 성장 측정 결과를 나타낸 것이다. 이 경우 2개의 조사 빔 간격은 3.12mm이며, 잎의 끝에서 1cm 및 5cm의 장소에서 측정했다. Screen Capture의 프레임 속도 1fps에서 수 초간에 걸쳐 성장에 의한 신장을 측정했다. 그림에서 알 수 있듯이 성장속도는 잎의 맨 끝에서 1cm에서는 18.8nm/sec, 5cm에서는 7.2nm/sec이며, 잎의 맨 끝부분의 성장속도가 약 2.6배 빠르다는 것을 알 수 있다. 이것은 잎의 성장점이 선단부분에 있다는 것으로도 이해할 수 있다.

식물생장의 측정계측법으로써 종래부터 이용되고 있는 방법은 식물의 건조중량에 의한 방법이다. 이것은 수일간부터 수주일간에 걸쳐 식물의 중량을 재는 방법이다. 즉, 이 사이의 적분치로써만 식물의 움직임이 관측된다. 또는 현미경이나 비디오 시스템을 이용하면 보다 단시간의 성장 모습을 관찰할 수 있지만, 이것 역시 현미경의 회절 한계를 넘어 식물의 미세한 움직임을 관찰할 수는 없다. 그러나 그림 4의 실험에 나타냈듯이, 매우 고감도의 통계적 간섭계측법을 이용함으로써 비디오 시스템의 프레임 속도에서 결정되는 높은 시간분해능으로 서브나노미터 스케일의 식물 움직임을 관찰할 수 있게 된다. 식물의 계측에 이러한 고감도 툴이 존재하지 않았었기 때문에 통계간섭법을 이용함으로써 지금까지 관측된 적이 없었던 흥미로운 식물의 여러 가지 움직임을 관측할 수 있게 되었다.

그림 5는 일조 조건에 대한 식물의 성장속도의 반응을 나타낸 것이다. 실험에서는 부추를 이용하여 2시간마다 80,000lux의 형광등 조명의 on/off를 반복했다. 당초의 조명이 없는 상태에서는 평균 성장속도 1.3nm/sec이었지만, 조명을 켜면 급격하게 식물이 성장(신장)하기 시작하여 평균 성장속도 4.9nm/sec가 되는 것을 알 수 있다. 이러한 식물 생장의 빛에 대한 준민한

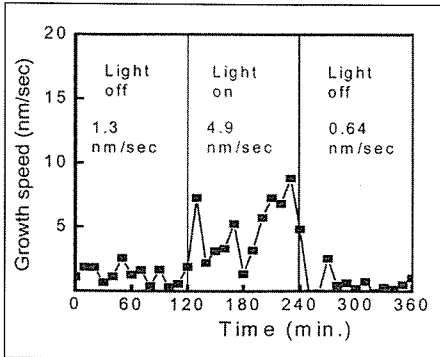


그림 5. 식물에 대한 광조명을 on-off 한 경우의 성장속도 변화

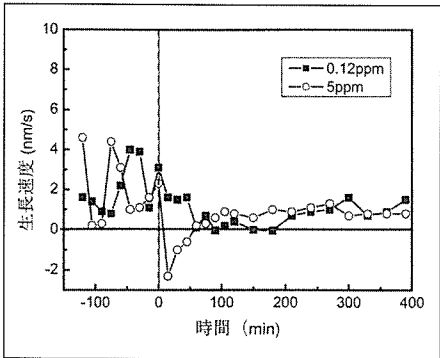


그림 6. 오존 노출에 대한 잎의 성장속도의 변화
○표시, ■표시는 각각 0.12ppm, 5ppm의 오존 농도를 나타냄. 오존노출에 의해 성장속도가 크게 영향을 받음.

반응은 우리들의 예상을 뒤엎는 것이었지만, 이 움직임이 광합성→탄수화물 생산→세포 분열→생장의 메커니즘에 의한 것인지 어떤지는 시간응답이 너무 빠르기 때문에 의문이 남는다.

상세한 것은 전문가의 분석에 맡기고 싶다. 우리들은 현재 이 통계간섭법을 이용하여 환경오염이 식물에 미치는 영향의 계측을 시도해보고 있다. 여기에서는 광화학 Oxidant의 주요물질인 오존이 식물 생장에 미치는 영향을 계측한 예를 표시했다. 식물 샘플로는 Lilyturf(백합과의 식물)를 이용하여 0.06ppm부터 10ppm까지의 오존에 노출시켜 생장에 미치는 영향을 관측했다. 그림 6에 일본의 광화학 Oxidant 주 의뢰가 발령되는 기준치인 0.12ppm과 때

우 고농도의 예이지만 5ppm의 오존 농도에 대한 성장속도 변화를 표시했다. 각 점에서의 성장 속도는 10초간에 걸쳐 20 프레임을 저장하여 산출했다. 이것을 15분 간격으로 노출 전후 각각 2시간 및 6시간 반에 걸쳐 관측했다. Time<0의 오존 노출 전에 평균 성장속도 2.1nm/sec이었던 성장속도가 노출 개시 후 약 1시간 만에 0.48nm/sec로 약 23% 크게 저하했음을 알 수 있다. 이 외에도 특징적인 것은 노출 전의 건강한 상태에서는 성장속도가 일정하지 않게 크게 흔들리는 것을 알 수 있다. 이 흔들림은 계측계의 불안정성이 아니고, 건강한 샘플에서는 반드시 관측되는 움직임이다. 필자가 알고 있는 한 식물의 이러한 단시간적인 움직임은 알려져 있지 않고, 식물의 생명활동의 기본적 성질을 나타낸 것은 아닐까라고 생각한다. 성장속도 흔들림의 표준편차에서 보면 노출 전에는 1.3nm/sec이었지만 노출 후에는 0.48nm/sec으로 크게 저하되었다. 고농도의 5ppm에 대해서는 노출 개시 후 불과 15분 후에 마이너스로 신장하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 세포에서 수분이 빠져나옴에 따라 일시적으로 수축이 일어나고 있다고 생각할 수 있다. 현재, 식물의 오존 스트레스 지표로서 성장속도 흔들림에 주목하고 연구를 계속하고 있다.

4. 맺음말

본고에서는 고감도의 통계적 간섭법을 이용하여 식물의 생장을 계측했다. 이에 의하면 초 순서로 식물의 움직임을 계측할 수 있으며, 지금까지 알려져 있지 않았던 식물의 세계가 보이기 시작했다. 식물의 성장속도가 끊임없이 흔들리고 있는 것도 그 한 예이며 새로운 발견이다. 우리들은 본 방법을 이용하여 환경오염이 식물에 미치는 영향을 알고, 식물을 통한 환경 Sensing으로 발전시키고 싶다.

계측법 그 자체에 대해서 말하자면, 간섭계측에 한정시키지 않고 일반적인 계측에서도 통계를 이용한다고 한다면 어떤 인상을 갖을까. 아마도 많은 독자는 측정 시스템이 불안정하며, 노이즈가 너무 많기 때문에 교육지책으로 여러 번 측정하여 통계를 이용해 우격다짐으로 값의 오차를 억제한다고 하는 부정적인 이미지를 갖는 것은 아닐까. 그러나 여기에서 설명한 계측법은 임의성 그 자체가 본질적인 역할을 하고 있다. 이 점이 종래의 계측법과 결정적으로 다른 점이며, 이후 이러한 시점을 기초로 새로운 계측법이 개척될 것을 기대하고 있다.

참고문헌

1. P. Hariharan: Optical Interferometry, Academic press, Inc. (1985).
2. H. Kadono, and S. Toyooka: "Statistical interferometry based on a statistics of speckle phase," Opt. Lett., 16-12 (1991), 883-885
3. Kadono Hirofumi: Speckle 간섭계에서의 액정위상 Shifter의 교정법(校正法), 광학, 20-5 (1991), 273-274
4. H. Kadono, S. Toyooka, and Y. Iwasaki: "Speckle shearing interferometry using a liquid crystal cell as a phase modulator," J. Opt. Soc. Am, A8 (1991), 2001-2008
5. Kadono Hirofumi, Toyooka Satoru: 통계적 간섭계측법에 의한 고정밀 변위 계측, 광기술Contact, 32-5 (1994), 17-23
6. H. Kadono, Y. Bitoh, and S. Toyooka: "Statistical interferometry based on fully developed speckle field: An experimental demonstration with noise analysis," J. Opt. Soc. Am A, Vol. 18, (2001), 1267-1274
7. H. Kadono, H. Kitajima, and S. Toyooka: "Thermal strain measurement of joint materials over a small spatiol region using statistical interferometry," Proc. 18th Congress of the International Commission for Optics (1999) 741-742
8. H. Kadono, T. Nakamura, K. Matsui, and S. Toyooka, "Monitoring of biological activity and growth of plants using laser speckle techniques", Proc. VII International Conference on Optics within Life science (2003) (In press).
9. Dainty, J. C., ed.: Laser speckle and related phenomena, Springer-Verlag, Berlin (1975)
10. H. Kadono, and T. Asakua: "Statistical properties of the speckle phase in the optical imaging system," J. Opt. Soc. Am. A2 (1985), 1787-1792
11. H. Kadono, N. Takai, and T. Asakua: "Statistical properties of the speckle phase in the diffraction region," J. Opt. Soc. Am. A3 (1986), 1080-1089

『광학세계』 원고모집

한국광학기기협회에서 발간하는 '광학세계'의 원고를 모집하고 있습니다.
 '광학세계'에 관심을 갖고 계신 관련업체, 학계, 연구계 및 개인 구독자 여러분의 많은 참여를 부탁드립니다.

●●● 원고모집 안내 ●●●

1. 원고 내용 : 연구논문, 회사소개, 제품소개, 국내·외 기술동향, 이달의 독자, 수필 등
 2. 원고 분량 : 제한 없음
 3. 원고 마감 : 수시 접수중
 * 기사로 활용할만한 좋은 소재를 알고계신 경우 연락주시면 직접 방문하여 취재하겠습니다.
- 연락처 : 한국광학기기협회 '광학세계' 편집부
 - TEL: (02)3481-8931 • FAX: (02)3481-8669