다채널 스캐닝 레이저를 이용한 위상천이간섭계 개발

Phase-shifting interferometry using a multi-channel scanning laser

*#김재완[1], 김종안[1], 강주식[1], 엄태봉[1], 장로마[2], 김재은[2], 박해용[2]
*#J.W.Kim[1](jaewan@kriss.re.kr),J.-A.Kim[1],C.-S.Kang[1],T.B.Eom[1],R.Jang[2],J.-E.Kim[2],H.Y.Park[2]
[1] 한국표준과학연구원 길이시간센터, [2]한국과학기술원 물리학과

Keywords:Laser,Interferometer,Phaseshift,Profiler,Metrology

1. 서론

위상천이간섭계(phase-shifting interferometer, PSI)는 광학소자의표면형상이나[1] 게이지블록의 길이측정[2] 등에 널리사용되고 있다. 간섭계 기술을 이용하면측정대상의표면형상을나노미터의 정밀도로정확히측정할수있다. 위상천이를위해서는 piezo-electrictransducer(PZT)가 널리사용되고있지만 PZT로 만드는 위상천이에는다양한 계통오차와우연오차가 내포되어있다.[3] 위상천이간섭계에서 PZT의비선형오차는중요한오차요인중 하나이다. 또한 PZT를 이용해 거울의 위치를 변조하는 방법으로는 넓은 면적에서 공간적으로 균일한 위상차를 만드는 것도 어렵다. 비대칭구조의간섭계에서는 PZT 대신에레이저파장을 변화시켜서 위상천이를 만들 수 있다. PZT와 같이 기계적인 이동에 의해위상변조를 하지 않고파장을변조할수있는다이오드 레이저를 이용하면 공간적으로균일한위상변조를만들수 있음은 잘 알려져 있다.[4]

위상천이간섭계의 간섭영상으로부터 각 화소의위상정보를 얻기 위해서는 일정한 위상간격(phase step)을 갖는 여러 개의 영상이필요하다. 예를들어 4-step 알고리즘을이용하려면 정확하게 π/2 위상간격을 구현해야 한다. 측정오차를 줄이기위해 여러 가지 위상복원알고리즘이연구되고있다.[5,6] 임의의 위상간격을 갖는 영상정보로부터 위상정보를 복원해내는 알고리즘으로는 까레 알고리즘(Carre algorithm)이 가장널리사용된다. 까레 알고리즘은동일한 간격을 갖는 4개의 간섭영상이 필요한데[7] 측정정확도는 위상간격오차에 매우 민감하게되므로 가장 위상오차가 작게발생하는 조건에 대한 연구나 5개의간섭영상을 이용하는 변형알고리즘에 대해서도 연구되고 있다.

위상천이간섭계에서진동등의영향을줄이고생산성을높이기 위해서는 측정 속도가 빨라져야 한다. 여기서는 까레 알고리즘을구현하기 위해서고속으로등간격위상차를발생할수있는 다이오드 레이저 파장 스캐닝 장치를 제안하고 이를 이용한 위상천이간섭계를 구현하였다.

2. 실험장치

레이저 다이오드(Laser Diode, LD)는 다양한 파장을 구현할 수 있고 온도나전류를변조하여발진주파수를조절할수있으며가격도 저렴한장점이있다. LD를 간섭계에 적용하기 위해서는 발진 파장을 10^{-8}의정확도로알아야하지만온도와전류만조절하는방법으로는 10^{-5} 정도의정확도를 얻을 수 있다. 패브리 페로공진기(Fabry-Perot Cavity, FPC)는 주기적으로 정확한 주파수 간격 기준을 제공할 수 있으므로 레이저의주파수 안정이나주파수 측정에널리사용되고 있다. FPC의 공진모드에 순차적으로 레이저 주파수를 안정시키는 방법으로위상천이간섭계를구현한연구도있으나이방법은하나의 공진모드에 주파수를안정화하고 영상을얻은후다음공진모드로 이동하는 과정을반복하므로 안정적인 구현이 어렵고 고속측정이 불가능하다. 여기서는 Fig. 1과 같이 공진조건을 만족할 때 FPC에서 레이저로 반사되어되돌아가는 빛이 레이저에서 다시 증폭되면서 주파수를 잠그는 현상(Injection locking)을 이용한다. LD의파장을 스캔하는중간에 FPC의 공진조건을만족할때는자동으로레이저의 주파수가 고정되므로 이 때 간섭계의 광원으로 사용하게 된다.

레이저는 635nm에서 단일종모드로 발진하며출력은 10 mW인 LD를 사용하였다.LD에서나온레이저빛은렌즈와핀홀로구성된 공간필터(spacial filter)를 거쳐 가우시언모드로 만들어지고일부는 공초점패브리페로공진기(ConfocalFabry-PerotCavity,CFPC)에입사하고대부분의빛은광절연체(opticalisolator, OI)를 거쳐 광섬유에 입사된다. LD의전류는 50Hz의삼각파로변조되어발진파장이주기적으로변하게된다. CFPC의 자유스펙트럼영역(Free spectralrange)은 5 GHz이고 4개 이상의공진모드가 한 주기에 나타날 수 있도록 전류의 변조진폭을조절하였다.

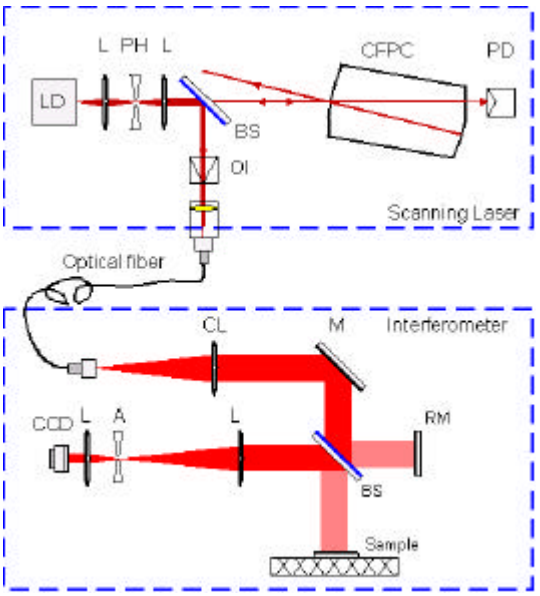

Fig.1Experimentalsetupforthemulti-channelscanninginterferometer

광섬유를 통해 간섭계로 입사된빔은시준렌즈(Collimation lens, CL)를이용하여직경이 50 mm인시준광으로만들어마이켈슨간섭계를 구성한다. 기준거울(Reference mirror, RM)과 광속분할기(beam splitter, BS)는 평면도가 λ/20으로 가공되었다. 간섭신호는 렌즈와 조리개를통과한후대안렌즈로 CCD 카메라에입사된다. 고속측정을 구현하기위해 500 fps의 측정속도와전송속도를지원하는카메라와 영상보드를사용하였다. CFPC를투과한공명신호와 LD의전류변조 신호를 조합하여 CCD 카메라의셔터를조절함으로써 LD의 파장이 연속적으로변하는와중에 CFPC와 공진되는파장만카메라에노출되어 동일 파장의 간섭신호를 얻게 된다.

3. 측정결과

간섭계가 정상적으로 동작하는지확인하기위해 25 mm 크기의 광학거울의 표면을 측정하였다. 레이저의 파장은 50 Hz로 변조되므로 실제상황에서는 발진 파장을 측정하기가 어렵다. CFPC의 공진이발진파장에영향을주는것을확인하기위해 레이저 변조주파수를 0.01 Hz로 천천히파장을바꾸면서파장계(HighFinesse, WSU)로 레이저의 파장(주파수)를측정하였다. 발진 주파수가 연속적으로 변하다가 Fig. 2의 (a)에 (1), (2), (3), (4)로 표시된 지점에서 CFPC의 공진에 의해 주파주가변하지 않고 정지되는 것을 확인할 수 있다. 동일한 시점에 CFPC를 투과한 빛을 트리거신호로 하여 CCD 카메라로 얻은 위상 영상은 Fig.2-(b)와같다.그림의각번호는 Fig. 2-(a)에 표시된공진시점에 대응된다. 까레알고리즘을이용하여위상정보를복원하였고 (Fig. 2-(c)) Herraez의 알고리즘[8]을 이용하여 2π 모호성을제거한

결과가 Fig.2-(d)와 같다. 레이저는 100 Hz의변조주파수에서도 인젝션로킹이일어남을확인하였다. 하나의위상신호를얻기위해서는 최소한 4장의 영상이 필요하므로 500 Hz의 CCD로는 약 100 fps의 속도로측정이가능하다. 최종적으로는 2개의파장을 이용하여 측정할 것이므로 본 실험에서는레이저의주파수 변조를 50 Hz로 하였고 형상데이터도 50 fps의 속도로 측정하였다.

위상복원 알고리즘의 데이터 처리 속도가 위상정보를 얻는 속도를 따라가지 못하므로본실험에서는데이터를메모리에 저장한 후 처리하는 방식을 이용하였다.

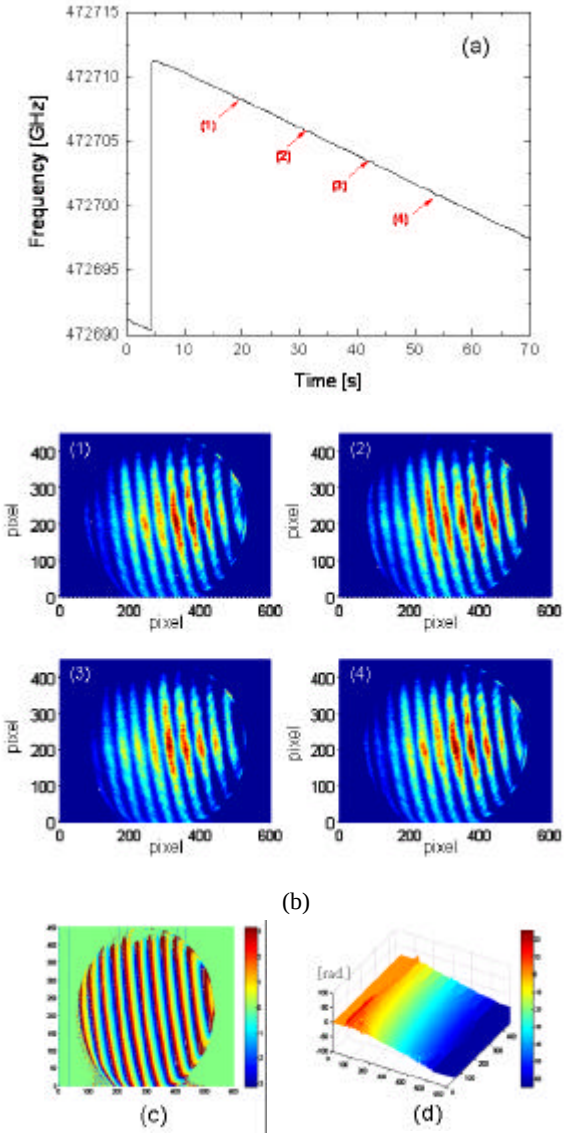

Fig.2Experimentalresults:(a)Resonancefrequenciesof(1),(2),(3),and(4),(b)phaseimageofeachchannel,(c)wrappedphasemap calculatedwithCarrealgorithm,and(d)unwrappedphasemap.

4. 결론

본 연구에서는 CFPC의 공진모드에 LD의 발진주파수를자동으로 고정시키는 passive injection locking 방법을 이용하여 고속으로 파장을 스캔하면서도특정한주파수를반복적으로얻을수 있는다채널스캐닝레이저를개발하였고이를통해고속으로 형상을측정할 수 있는 위상천이간섭계를 구현하였다. 광학과 영상장치로얻은신호로부터위상영상(wrapped phase map)을 얻는 것은 50 fps까지 처리가 가능하지만 unwrap 프로그램은 처리속도가 1~2 fps에 불과하므로 데이터를 메모리에 저장한 후 처리를 하고 있다.

후기

본연구는교육과학기술부의재원으로과학재단이지원하는 나노원천기술개발사업 중 하나로 수행되었음 (2007-02721).

참고문헌

1. Malacara,D.,Servin,M.,andMalacaraZ.,"Interferogramanalysis for opticaltesting,"inOpticalEngineering,MarcelDekker,61, 247-278,1998.
2. Bitou,Y.andSeta,K.,"Gaugeblockmeasurementusingawavelength scanning interferometer," Jpn. J. Appl. Phys., 39, 6084-6088,2000.
3. Patil,A.,Oreb,B.F.,andRastogi,P.,"Anintegralapproachtophase shiftinginterferometryusingasuper-resolutionfrequencyestimationmethod,"Opt.Express,12,4681-4697,2004.
4. Ishii,Y.,Chen,J.,andMurata,K.,"Digitalphase-measuringinterferometrywithatunablelaserdiode,"Opt.Lett.12,233-235,1987.
5. Larkin,K.G.andOreb,B.F.,"Designandassessmentofsymmetrical phase-shifting algorithms," J. Opt. Soc. Am. A 9, 1740-1748,1992.
6. Patil,A.,Raphael,B.andRastogi,P.,"Generalizedphase-shifting interferometrybyuseofadirectstochasticalgorithmforglobal search,"Opt.Lett.29,1381-1383,2004.
7. Kemao,Q.,Fangjun,S.andXiaoping,W.,"Determinationofthe bestphase stepof the Carre algorithm in phase shiftinginterferometry,"Meas.Sci.Technol.11,1220-1223,2000.
8. Herraez,M.A.,Gdeisat,M.A.,Burton,D.R.,andLalor,M.J., "Robust,fast,andeffectivetwo-dimensionalautomaticphaseunwrappingalgorithmbasedonimagedecomposition,"Appl.Opt. 41,7445-7455,2002.