

이중화된 패턴을 참조하는 평면 변위 측정 방법

박성준¹, 정광석^{1*}

¹한국교통대학교 기계공학과

Measuring Method of Planar Displacement Referring to The Double Linear Patterns

Sung Jun Park¹, Kwang Suk Jung^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 두 개의 1차원 주기 패턴을 수직으로 중첩시켜 상하층 패턴으로부터 이축 변위 정보를 각각 디코딩할 수 있는 방법을 제안한다. 투명한 상층 패턴 판별은 굴절률차에 기인한 레이저 빔의 디플렉션 검출을 통해 이뤄지고 하층 패턴 판별은 수광 전압 차의 검출을 통해 이뤄진다. 빌드 업 필름 재질의 상층 패턴은 UV 레이저 가공에 의해 미세가공되고 그리고 알루미늄 하층 패턴은 초정밀 머시닝에 의한 트렌치 가공과 불투명 소재 증착 그리고 폴리싱 과정을 통해 제작된다. 10마이크로미터 간격으로 제작된 샘플 패턴과 이를 인코딩할 수 있는 전용 광학계에 의한 변위 측정 방법은 대면적 스테이지에 장착되어 레이저 간섭계를 이용한 측정데이터와 비교하여 검증된다.

Abstract Two-dimensional displacements are obtained from the sandwiched patterns, which superpose two linearly-periodic patterns orthogonally, respectively. The transparent top pattern is identified by deflection of the laser beam due to a difference of refractivity and the opaque bottom pattern is identified by deviation of the beam intensity due to a difference of reflectance. In the sample setup, the top pattern made up of build-up film is manufactured by UV laser machining and the bottom pattern is manufactured by ultra-precision trench machining and deposition for aluminum plate. The proposed decoding method is verified experimentally using the 10 μ m equally spaced sample patterns and the devised optical system. The Korea Academia-Industrial cooperation Society.

Keywords : Reflectance, Refractive index, Superposed patterns, Surface encoder

1. 서론

로터리 엔코더나 선형 스케일(Linear scale)등과 같이 주기적으로 반복되는 패턴을 참조하여 변위를 디코딩하는 장치는 신호의 강건함과 고속 처리 능력 등의 특성 덕분에 1차원 변위 측정의 표준이 되어왔다[1-4]. 이러한 인코딩 방법을 2차원적으로 확장하기 위해서는 Fig. 1(a)에서와 같이 서로 수직인 1차원 패턴을 병렬로 배치하고 각 패턴을 별도의 검출기로 검출하여 이축 변위 정

보를 동시에 얻는 방법을 고려할 수 있다[5]. 이와 대별되어 Fig. 1(b)에서와 같이 패턴을 2차원적으로 주기화하여 이를 디코딩하여 변위 정보를 얻는 방법이 보고되었다[6,7]. 그러나 전자의 경우 패턴 영역을 확대하여 측정 범위를 확장하기 위해서는 패턴뿐만 아니라 듀얼 감지기(Transducer)를 포함한 광학 헤드의 크기도 동시에 확대되어야 하고 후자의 경우 1차원 패턴 정밀도에 준하는 2차원 참조패턴의 정밀도 확보가 난제이다[8].

본 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2013R1A1A4A01005675).

*Corresponding Author : Kwang Suk Jung(Korea National University of Transportation)

Tel: +82-43-841-5135 email: ksjung@ut.ac.kr

Received April 6, 2015

Revised June 10, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

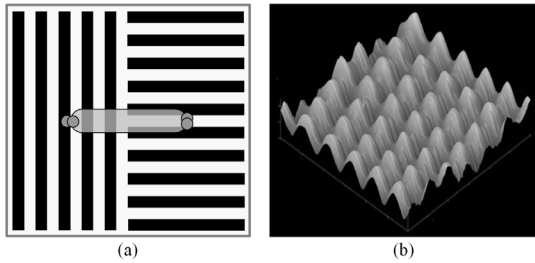


Fig. 1. Reference patterns for surface encoding
 (a) two orthogonal linear patterns
 (b) two-dimensionally periodical pattern

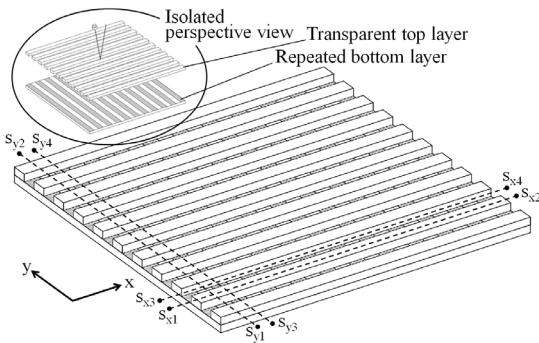


Fig. 2. Concept of surface encoding for multi-layer pattern composed of a transparent top layer and an opaque bottom layer

본 논문에서는 1차원적으로 트렌치 가공된 패턴을 중첩하여 라미네이션된 복층패턴으로 2차원 정보를 얻는 새로운 변위 측정 방법을 논의한다. 제안된 강건한 디코딩 방법은 레이저 다이렉트 머시닝과 초정밀 절삭 가공에 의해 얻어진 $10\mu\text{m}$ 폭의 미세 패턴과 전용 광학계를 통해 실증되며 레이저 간섭계 기반의 서보 피드백 구조를 갖는 대면적의 초정밀 스테이지에 장착되어 검증된다.

2. 중첩 패턴에 대한 서피스 인코딩 방법

트렌치 가공된 1차원 패턴의 경우 이에 입사하는 빔의 광학적 특성 변화를 야기하여 산과 골을 판별할 수 있는 다양한 광학적 방법이 있다. 따라서 이차원 변위 디코딩을 위한 참조 패턴으로 서로 수직 방향으로 패턴화된 두 개의 1차원 선형 패턴을 중첩시킨 패턴을 제안한다[9]. 본 장에서는 이러한 패턴의 변위 측정 원리와 디코딩용 광학계를 논의한다.

2.1 측정 토폴로지

라미네이트된 중첩 패턴은 Fig. 2에서와 같이 투명한 상층과 불투명한 하층으로 구성된다. 상층에는 y방향으로 0차 오더의 단면 구조를 갖는 패턴이 형성되어있으며 하층의 경우에는 x방향으로 반사도가 서로 상이한 패턴이 단일 평면에 형성되어있다. 이러한 복층 패턴에서 x축을 따라 빔이 스캔되면 상층에의 영향없이 하층 패턴의 반사도(Reflectance) 차가 수광 빔에 전달되며 y축을 따라 스캔된 빔은 상층 패턴의 굴절률(Refractive index) 차에 의해 편향된다. 따라서 타겟 패턴에서 최종적으로 반사된 빔의 시프트된 양과 강도를 검출하면 이축 방향의 변위 정보를 각각 검출할 수 있다.

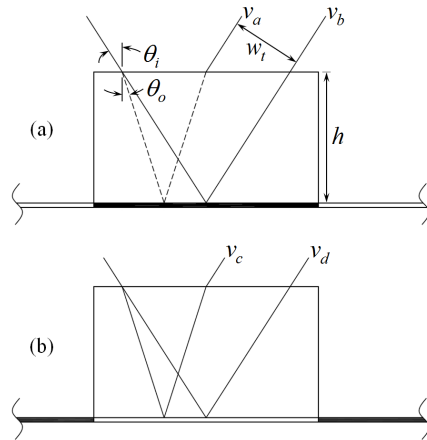


Fig. 3. Variation of the returned beam due to the difference of refractivity and reflectivity of the target pattern

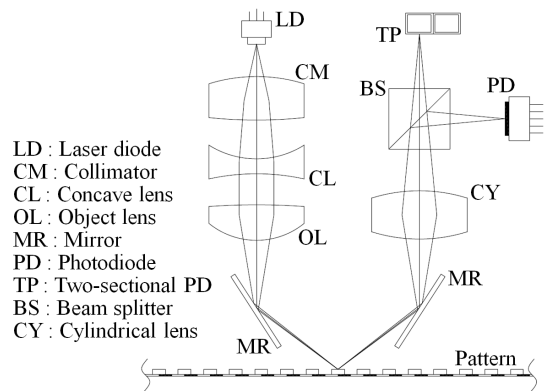


Fig. 4. Optic system for measuring the deflection and power deviation of the return beam

상층의 매질을 통과한 빔 v_a 는 공기와의 굴절률 차에 의해 매질을 통과하지 않고 하층에서 반사되는 빔 v_b 와 비교하여 w_i 만큼 디플렉션 되는데 그 크기는 Fig. 3(a)의 기하학적 관계를 참조하면 다음 식으로 표현된다.

$$w_i = 2h(\tan\theta_i - \tan\theta_o)\cos\theta_i \quad (1)$$

여기에서 θ_i, θ_o 는 빔의 입사각과 굴절각을 나타낸다. 따라서 v_a 와 v_b 의 광 강도(light intensity)는 동일하다. 또한 하층의 어두운 패턴에 도달하는 빔은 강도가 달라지며 Fig. 3(b)에서와 같이 v_a 는 v_c 로 v_b 는 v_d 로 크기가 감소한다. 물론 반사된 빔 v_a 와 v_c 그리고 v_b 와 v_d 의 경로는 동일하다.

2.2 인코딩을 위한 광학계 레이아웃

이중 패턴으로부터 굴절률 차에 의한 빔의 편향과 반사를 차에 의한 강도를 측정하여 변위 정보를 인코딩하는 광학계 구성을 Fig. 4에 나타내었다. 레이저 다이오드(LD)로부터 발진된 빔은 콜리메이터(CM)와 오폭렌즈(CL)를 통해 평행광이 되고 패턴 위에서 집광될 수 있게 대물렌즈(OL)를 통과하는데 이때 전반사 거울을 통해 편향되어 패턴에 일정 각도로 입사한다. 반사된 빔은 원통형 렌즈(CY)를 통해 재차 집광되는데 이후 빔 분할기(BS)에서 분할되어 50%의 빔은 2분할 다이오드(TP)로 그리고 나머지 50%의 빔은 포토다이오드(PD)에 수렴한다. 상층 패턴의 매질을 통과한 힘 v_a, v_c 는 2분할 다이오드의 좌측에 그리고 v_b, v_d 는 우측에 수렴한다. 하층 패턴의 반사도차에 의한 v_a 와 v_c 간의 그리고 v_b 와 v_d 간의 강도 차는 포토다이오드의 수광 전압에 반영된다.

3. 상하부 적층 패턴 제작

3.1 레이저 가공에 의한 적층패턴의 상부 투명 트렌치 가공

적층패턴의 상부 패턴에 사용된 빌드업 필름 재료는 SiO₂ 재질이며 평균 필러 사이즈가 0.5 μ m이고 열팽창 계수는 39ppm/°C이다. 재료의 특정 입자가 빛에 반응하여 다른 에너지 형태로 변형되는 현상은 레이저 펄스폭에 따라 그 특징이 다르게 나타나며 이것은 가공 정밀도, 가공면의 상태 등에 영향을 미친다[10,11].

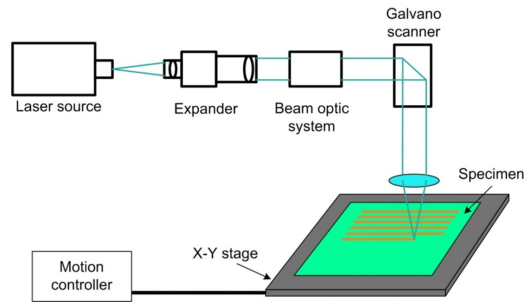


Fig. 5. Schematic diagram of laser patterning system

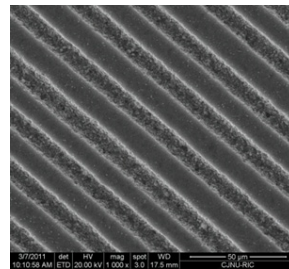


Fig. 6. SEM image of 10 μ m pattern by laser machining

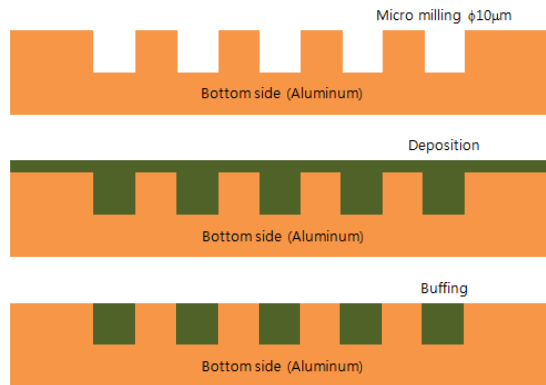


Fig. 7. Manufacturing process for bottom patterning

본 연구에 적용된 피코초 펄스 폭은 나노초와 펨토초 중간에 위치하여 나노초에 비해 열손상으로 녹는 현상이 적고 고출력을 내기 힘든 펨토초에 비해 고출력을 발생시킬 수 있으므로 상대적으로 높은 가공성을 나타낸다. 피코초 레이저를 이용한 레이저 다이렉트 패턴 가공을 위한 실험 장치는 Fig. 5와 같이 개략적으로 나타낼 수 있는데 조사된 레이저는 빔 익스팬더를 거쳐 빔 크기가 확대된다. 이는 빔 스폿 사이즈를 좀 더 미세하게 만들기 위한 것이며 전용 광학계를 거쳐 갈바노 스캐너를 통해 재료에 조사된다.

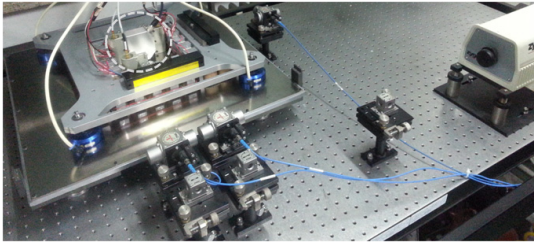


Fig. 8. Overall system layout for verifying feasibility of the proposed measuring method

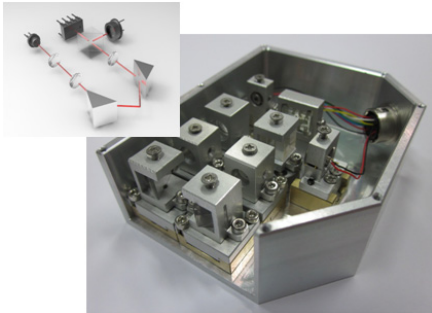


Fig. 9. Optical encoding system for the superposed patterns

발진주파수가 고정된 상태에서 레이저 출력과 가공속도를 조절하여 10 μ m로 가공된 패턴을 SEM으로 촬영하여 Fig. 6에 나타내었다. 상기 패턴의 열영향부(HAZ)는 거의 0에 가까우며 가공으로 인한 부스러기(Debris)는 없는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 초정밀 가공을 이용한 적층 패턴의 하부 마이크로 트렌치 가공

하층부 음양 패턴의 경우 50000RPM 이상의 초정밀 절삭 가공(드릴링, 엔드밀, 내경 그라인딩의 반복)을 통해 10 μ m의 폭과 10 μ m의 깊이로 알루미늄 소재에 패턴닝을 진행한 후 경질 아노다이징 후처리를 통해 3~5 μ m의 검은색 염료로 패턴 상판에서 증착(deposition)하여 골영역을 매우고 전체 영역에 대한 평탄화(Buffering) 과정을 거쳐 반사도가 다른 패턴을 얻었다. 이러한 과정을 Fig. 7에 요약하여 나타내었다. 특히 실제 패턴닝 과정은 저속의 주축 피딩률(Feeding rate)로 진행되므로 과도한 시간이 소요된다.

Table 1. Specifications of optical layout used in the encoding system

ITEM	Specification
LD	$\lambda(635\text{nm})$, 5mW, $\phi 5.6\text{mm}$
CL	$\lambda(670\pm 20\text{nm})$, NA : 0.3, Acrylic material Eff/Back focal length : 10.46, 8.86mm
OL	$\lambda(632\text{nm})$, $\phi 5\text{mm}$, BK7 Eff/Back focal length : 29.311, 27.671mm
PR	$\lambda(633\text{nm})$, 8 \times 8 \times 8mm, BK7
BS	$\lambda(633\text{nm})$, 8 \times 8 \times 8mm, BK7
PD	$\lambda(320\sim 1100\text{nm})$, 0.45A/W(at 660nm)
TP	128 \times 1, 400DPI, to 8MHz

4. 하드웨어 구축 및 시험 결과

상기 적층패턴을 참조하는 2차원 변위 측정 방법을 검증하기 위해 Fig. 8에 제시된 초정밀 스테이지와의 연동 시험을 실시하였다. 대상 스테이지는 공기 베어링에 의해 부상되어 접촉없이 평면 운동을 하는 시스템으로 면내(in-plane) 운동의 경우 레이저 간섭계(interferometer)로 동시에 면외(out-of-plane) 운동의 경우 정전용량형 센서로 측정되어 대략 10nm 수준의 정밀도로 구동 가능한 시스템이다^[12]. 제작된 패턴은 스테이지 하부 프레임 상면에 부착되어있고 동시에 이를 인코딩하는 광학계는 그림 안의 점선으로 표기된 부분에 안착되어있는데 실제 형상은 Fig. 9와 같다.

인코딩을 위한 실제 광학계 설계시 점검 사항은 최소 패턴 폭 이하로 빔 웨이스트를 줄여야 하는 것과 상단 패턴의 굴절률 차에 기인하는 빔 오프셋이 다분할 다이오드의 각 영역에 초점이 맺히도록 빔 폭을 확대하는 원통형 렌즈 역할과 집광 역할을 하는 대물렌즈의 초점 심도 결정에 있다. 이를 위해 라이트 툴(Light tool)을 이용한 바이어 요소의 민감도 해석이 수행되었으며 이러한 결과는 보정 기구를 튜닝하는 지그 설계에 이용되었다. 상용화 수준의 조절 지그를 갖는 구축된 광학계의 제원을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 8에 제시된 실험 장치를 통한 상기 측정 방법의 타당성은 두 가지 방법으로 수행되었다. 우선, 스테이지 자체의 서보 루프로 일정 속도 운동을 할 때 내장된 광학계에서의 신호 측정 그리고 적층 패턴과 광학계로 구성된 서보 루프로 제어 시험을 할 때 레이저 간섭계에 의해 측정된 참조 신호와의 비교가 그것이다.

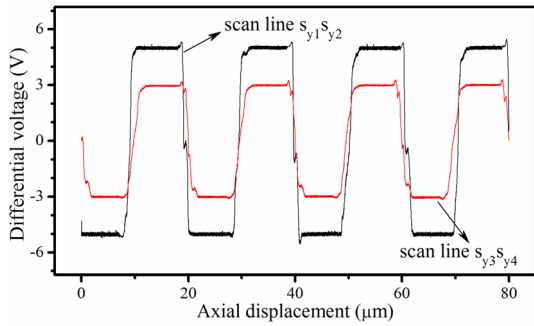


Fig. 10. Differential voltages of 2-sectioned photodiodes according to the axial scanning of the optic head

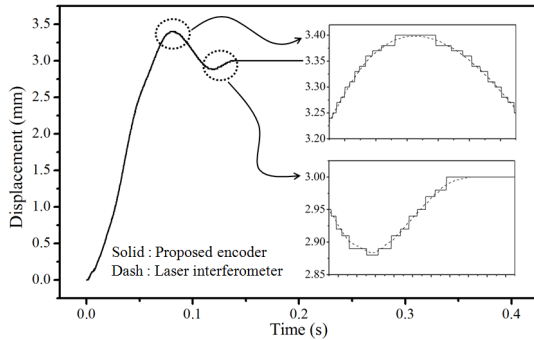


Fig. 11. Transverse motion test result of the stage using the proposed measuring method as a feedback sensor

첫 번째 검증 방법으로 Fig. 2에서와 같이 $s_{y1} s_{y2}$ 와 $s_{y3} s_{y4}$ 를 따라 y축 방향으로 패턴을 이동시킬 때 2분할 다이오드 양단자의 전압차를 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 스캔라인 $s_{y1} s_{y2}$ 의 경우 입사빔은 Fig. 3(a)의 환경하에 있고 따라서 수광전압 v_a, v_b 가 반복되어 나타나며 $s_{y3} s_{y4}$ 의 경우 Fig. 3(b)의 조건이므로 v_c, v_d 가 반복되어 나타난다. v_a, v_b 의 절대값은 5V가 되도록 튜닝되었는데 동일한 증폭비에서 v_c 와 v_d 의 전압차는 3V 수준에 있는 것을 알 수 있다. 2분할 다이오드에서는 상층 굴절률의 차를 검출하는 것이 주목적이고 따라서 빔의 편향에 따른 수광 전압을 디지털화하면 v_a 와 v_b 혹은 v_c 와 v_d 를 구별할 수 있음을 알 수 있다. 또한 하층 반사도의 차는 포토다이오드의 광량 변화에 기인하는 수광 전압의 차로 알 수 있는데 Fig. 10의 결과를 통해 간접적으로 알 수 있듯이 v_a 와 v_c 혹은 v_b 와 v_d 는 장착된 신호처리 조건에서 약 2V의 차를 갖으며 간단한 컴퍼레이터를 통해 구

분할 수 있다. 본 실험을 통해 대략적으로 $10\mu\text{m}$ 마다 주기적인 신호가 검출됨을 확인할 수 있으며 패턴간의 미세 편위는 제작 오차에 기인하는 것으로 판단된다.

다음으로 본 적층 패턴과 광학계를 면내 운동을 위한 피드백 센서로 이용하여 스테이지의 계단 운동 시험을 실시하여 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 계단 크기는 3mm이며 일반적인 비례-적분 제어기를 이용하여 제어를 수행하였으며 스테이지의 횡변위는 제안된 패턴 참조 인코더외에 레이저 간섭계를 이용하여 동시에 측정되었다. 그림에서는 두 측정 기기간의 차를 확인할 수 없으므로 변곡점에서 측정 결과를 확대하여 그래프 안에 삽입하였다. 기본적으로 제안된 인코더는 분해능이 $10\mu\text{m}$ 이므로 마이크로 스케일로 가면 계단 형태의 응답 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 동시에 측정된 간섭계의 신호는 상기 분해능 대비 약 1000배 정밀하므로 인코더의 정밀도를 비교 참조할 수 있으며 그림에서 확인할 수 있듯이 인코더 신호는 레이저 간섭계의 패턴을 근사하게 추종하는 것을 알 수 있다. 인코더에 의한 계단 파형을 정확하게 간섭계가 관통하지 못하는 이유는 Fig. 10에서도 확인할 수 있듯이 이웃 패턴간의 간격이 $10\mu\text{m}$ 를 기준으로 약간의 오차를 갖기 때문이다. 이러한 오차가 Fig. 11의 제어 시험에서도 동일하게 영향을 준 것으로 판단된다. 추가로 패턴에 동기화된 제안된 인코더의 응답 특성은 디지털 인코더에서와 같이 신호처리용 증폭기, 데이터 수집기 등의 샘플링 주파수에 전적으로 의존하며 본 시험 장치에서는 대략 5MHz의 대역폭을 갖는다.

5. 결론

공작 기계의 공구 첨단(End-effector), 로봇의 첨단 위치 등은 작업 정밀도를 높이기 위해 고정 프레임 기준 으로 한 보정 작업이 반복 수행되어야 하므로 자체적으로 검증할 수 있는 참조 테스트 패턴을 내재하고 있으면 대단히 용이하게 응용할 수 있다. 특히 이러한 패턴 기반 디지털 인코딩 방법은 기존 레이저 추적 방식의 계측 방법보다 훨씬 강건하고 편리하게 이용될 수 있으며 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 투명한 상층과 반사율을 다르게 설정한 하층으로 구성된 적층 패턴을 대상으로 단일 레이저 빔만으로 이축 변위 측정이 가능함을 실험적으로 검증하였다.

둘째, 격자 판별은 다양한 방법에 의해 구현될 수 있는데 본 연구에서 상층 격자 판별은 굴절을 차에 기인하는 빔의 편이 정보를 이용하였으며 하층의 경우에는 반사도에 기인하는 광 강도 변화를 통해 수행하였으며 상기 광검출 방법으로 제작된 패턴과 동기하는 변위 정보를 얻을 수 있었다.

셋째, 패턴 기반 측정법의 정밀도는 기본적으로 패턴 정밀도에 전적으로 의존하므로 미세 패턴 제작에 의해 측정 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있다. 더욱 정교하게 제작된 패턴을 대상으로 하는 패턴 기반 측정 방법론의 개발은 심화시켜 연구되어야 할 주제인 것으로 판단된다.

References

- [1] A. E. Brennemann, Holic, R. L., "Magnetic and optical fluorescence position sensing for planar linear motor", *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 101-107, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/iros.1995.525869>
- [2] S. H. Lee, K. S. Jung, "Precision displacement measurement using astigmatism", *J. of Korean Society Precision Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 87-94, 2008.
- [3] KEYENCE Corp. Application Note, <http://www.keyence.co.kr/application/appli_204022.asp?no=4022>.
- [4] B. hnlicka, A. Besancon-voda, H. J. Schroder, G. Filardi, "Modeling the focus error characteristic of a DVD player", *Proc. of the 2002 Int. Conf. on Control Application*, Vol. 2, pp. 629-630, 2002.
- [5] Two-dimensional encoder from Heidenhain, <<http://www.hidenhain.com>>.
- [6] W. Gao, S. Dejima, H. Yanai, K. Katakura, S. Kiyono, Y. Tomita, "A surface motor-driven planar motion stage integrated with an XYZ Θ_2 surface encoder for precision positioning", *Precision Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 329-337, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2003.12.003>
- [7] S. H. Lee, K. S. Jung, E. S. Park, K. B. Shim, "Surface encoder based on the Half-Shaded Square Patterns (HSSP)", *Int. J. of Precision Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 82-84, 2008.
- [8] S. Kiyono, P. Cai, W. Gao, "An angle-based position detection method for precision machines", *JSME Int. J.*, Vol. 42, No. 1, pp. 44-48, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jsmec.42.44>
- [9] S. J. Park, K. S. Jung, Position measurement apparatus, KR Patent: 10-1249126, 2013.
- [10] J. W. Kang, "Laser machining properties for high density embedded pattern of IC substrates using UV laser", *MEMaster Thesis, Korea National University of Transportation*, 2011.
- [11] J. H. Lee, H. K. Sohn, "Ultrafast laser micro-machining technology", *J. of Korean Society Precision Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 7-12, 2010.
- [12] K. S. Jung, K. B. Shim, "Study on the air-bearing stage driven by linear induction motors", *J. of Korean Society Precision Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 39-46, 2010.

박 성 준(Sung Jun Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 연세대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2008년 2월 : 삼성전기 중앙연구소 책임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

3D프린팅, 나노머시닝, 잉크젯프린팅, 마이크로 EDM, 공작기계

정 광 석(Kwang Suk Jung)

[정회원]



- 1995년 2월 : 연세대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : LG전자 생산기술원 선임연구원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

초정밀계측제어, 서피스엔코더, 전기에너지변환기기, 마그네트기어, 자기부상, FPD 제조장비