

이진 격자 패턴 이미지를 이용한 비접촉식 평면 구동기의 면내 위치(x, y, θ) 측정 방법

정광석[#], 정광호^{*}, 백윤수^{**}

A Novel Measuring Method of In-plane Position of Contact-Free Planar Actuator Using Binary Grid Pattern Image

Kwang Suk Jung[#], Kwang Ho Jeong^{*} and Yoon Su Baek^{**}

ABSTRACT

A novel three degrees of freedom sensing method utilizing binary grid pattern image and vision camera is presented. The binary grid pattern image is designed by Pseudo-Random Binary Arrays and referenced to encode in-plane position of a moving stage of the contact-free planar actuator. First, the yaw motion of the stage is detected using fast image processing and then the other planar positions, x and y, are decoded with a sequence of images. This method can be applied to the system that needs feedback of in-plane position, with advantages of a good accuracy and high resolution comparable with the encoder, a relatively compact structure, no friction, and a low cost. In this paper, all the procedures of the above sensing mechanism are described in detail, including simulation and experiment results.

Key Words : Pseudo-Random Binary Sequences (PRBS, 의사 랜덤 이진 시퀀스), Pseudo-Random Binary Arrays (PRBA, 의사 랜덤 이진 배열), Binary Grid Pattern Image (BGPI, 이진 격자 패턴 이미지), In-plane Position (면내 위치), Contact-Free Planar Actuator (비접촉식 평면 액추에이터)

1. 서론

평면 구동기의 면내 운동 (in-plane position, x, y, θ) 보상을 위해 대부분의 시스템은 레이저 간섭계를 포함한 비접촉식 레이저 측정 변위계를 이용하고 있다¹⁻⁵. 즉, 병진 운동과 회전 운동을 동시에 하는 강체의 궤적 추적을 위해 위의 서보 시스템들을 이용하여 각 자유도의 독립된 측정 또는 각 자유도 측정의 조합에 의한 방법을 취하고 있다.

그러나 이러한 방법들은 구현 정밀도의 우수성에도 불구하고 복잡한 광학적 배치나 특수한 환경 제약 그리고 과도한 비용으로 인해 상대적으로 범용성 있는 일반 구동기나 이송 시스템에 적용하기에는 어려움이 따른다. 이러한 어려움을 극복하고자 본 논문에서는 CCD 카메라와 특정한 영상 패턴을 기반으로 하는 새로운 방법의 면내 위치 측정 방법을 소개한다.

특정 영상 기반 측정 기법은 하나의 CCD 카

^{**} 접수일: 2003 년 1 월 23 일; 게재승인일: 2003 년 4 월 3 일

[#] 교신저자: 충주대학교 기계공학과

Email: ksjung@chungju.ac.kr, Tel: (043) 841-5135

^{*} ㈜ JATCO

^{**} 연세대학교 기계전자공학부

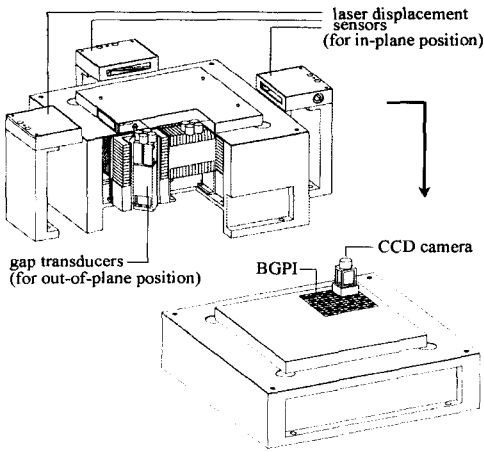


Fig. 1 Implementation of the suggested BGPI-based measuring method replacing laser displacement sensors of the contact-free planar actuator by authors

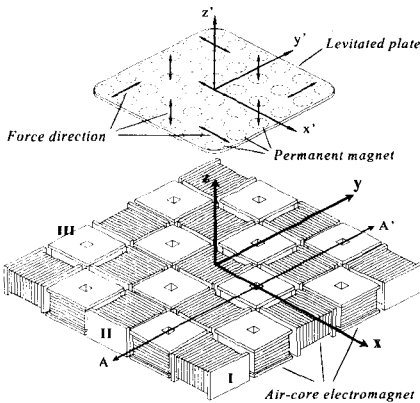


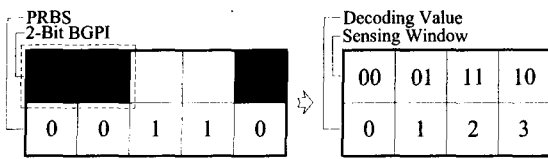
Fig. 2 Simplified perspective layout describing the force generation mechanism of the target planar actuator given in Fig. 1

매라와 영상 패턴으로 면내 운동 등의 다자유도 운동을 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 영상 기반 측정 기법은 Garner, Blakley 등에 의해 소개되었다. Garner⁶는 관절 운동 제어를 위해 격자 패턴을 근간으로 하여 비접촉으로 세 개의 회전 정보를 얻는 방법을 제안하였는데 이미지의 영상 획득을 위한 전처리 알고리즘, 이미지의 격자 직선 추적 알고리즘, 그리고 카메라 보정 알고리즘을 통한 위치 정보간의 매핑(mapping) 등의

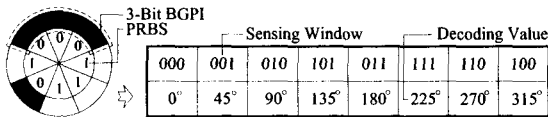
복잡한 영상 해석 과정을 필요로 한다. 또한 Blakley⁷는 6 비트 의사 랜덤 이진 격자 패턴 이미지를 실린더에 입히고 여섯 개의 반사광 스위치(reflective opto-switch)로 3D 측정 윈도우를 감지하여 x, θ 를 측정하는 2 자유도 인코더를 제안하였는데 원리적으로 측정 분해능은 반사광 스위치의 제작 크기에 제한되며 회전각의 측정은 결국 실린더의 원주 방향 이미지를 기반으로 하므로 병진 위치 측정과 동일한 의미를 갖는다. 본 논문에서는 앞서 제안된 격자 패턴 이미지를 기반으로 하는 비접촉식 측정 기법의 일환으로 Fig. 1에 묘사된 저자에 의해 개발된 자기 부상되어 구동되는 평면 액추에이터⁴의 면내 운동 보상(x, y, θ)을 위해 복잡한 비전 알고리즘은 배제하고 간단한 직선 추출법에 의한 회전각의 검출과 이를 통한 영상 역변환에 따른 병진 위치의 추출을 포함하는 새로운 방식의 카메라 영상 기반 측정 기법을 제안한다.

2. 이진 격자 패턴 이미지

CCD 카메라의 영상 참조 데이터가 되는 격자 패턴이 Fig. 1의 하부 스테이지에 부착되어있다. 앞서 언급한 것처럼 Fig. 1의 상부 시스템은 저자에 의해 개발된 반발식 자기 부상을 이용한 비접촉식 평면 액추에이터를 나타내는데 시스템의 추력 발생 메커니즘을 Fig. 2의 개념도를 이용하여 간략하게 설명하면 x, y, z 축의 각 방향과 평행하게 배치되어있는 타입 I, II, III의 공심 코일이 평판에 부착된 영구 자석과 상호 작용을 하며 이때 타입 I, II, III 코일에 전류를 인가하면 평판에는 Fig. 2의 상부 평판에 보이는 화살표 방향으로 자기력이 작용한다⁴. 이러한 세 방향 힘의 조합을 통해 공간상에서 평판의 부상된 평면 운동, 즉 6 자유도 운동이 구현된다. 이러한 부상 스테이지의 공간상에서의 위치 보상을 위해 6 자유도의 위치 되먹임 기구가 필요한데 면내 위치 정보는 스테이지 측면의 전반사 거울로부터 반사된 레이저 광을 이용하며 면의 위치(out-of-plane position) 정보는 스테이저에 장착되어있는 정전용량형 센서서를 통해 얻는다. 이러한 면내 위치 정보를 레이저 변위계가 아닌 Fig. 1의 하부 구현 예에 묘사되어있는 것처럼 스테이지에 부착되어있는 BGPI(Binary Grid Pattern Image, 이진 격자 패턴 이미지)와 CCD 카메라에 의해 얻을 수 있는 방법을 제안한다.



(a) Linear type 2-bit PRBS string



(b) Rotational type 3-bit PRBS string

Fig. 3 Examples of one d.o.f BGPI

이러한 BGPI 를 생성하기 위해 본 논문에서는 통신 데이터 전송용으로 이용되는 PRBS(Pseudo-Random Binary Sequence, 의사 랜덤 이진 시퀀스)와 PRBA(Pseudo Random Binary Array, 의사 랜덤 이진 배열)의 개념을 이용하는데 본 장에서는 이에 대한 이론적 개념과 이를 통한 BGPI 의 생성 과정을 소개한다.

2.1 격자 패턴의 1 자유도 응용 예

BGPI 를 이용한 1 차원 응용 예가 Fig. 3 에 도식화 되어있다. 특정한 방법을 통해 얻어진 PRBS 를 기반으로 1 차원 BGPI 에서 점선으로 표시되어 있는 각각의 윈도우 비트를 영상으로 잡으면 독립된 이진수가 감지되는데 이것을 위치와 각도에 대해서 매칭한 것이다. Fig. 3(a)는 1 차원 위치 정보를 얻어내기 위한 BGPI 를 나타내는데 이는 bit 수가 2 인 PRBS 를 채택한 경우이며 $3(2^n-1)$, n 은 bit 수)개의 2 bit 조합이 얻어지는데 PRBS 의 초기 이진수 앞에 '0'을 추가하면 제로('00') 윈도우 비트 까지 감지하는 것이 가능하다. 또한 Fig. 3(b)는 각도 정보를 감지하는 BGPI 를 나타내는데 PRBS 의 한 주기의 초기 이진수 앞에 '0'을 추가하고 시계 반대 방향으로 회전하는 영상을 점선에서와 같이 3bit 씩 카메라가 잡을 수 있도록 설정하면 각각의 회전각 위치에서 $8(2^3-1+1)$ 개의 독립된 이진수 조합이 생성된다. 따라서 후술하는 것처럼 BGPI 의 근간이 되는 PRBS 와 PRBA 를 이용하여 앞서 언급한 1 자유도 뿐만 아니라 여러 가지 조합의 위치 정보를 얻는 것이 가능하다.

2.2 PRBS 의 생성 메커니즘

N bit 의 PRBS 란 (2^n-1) 개의 이진수가 주기적으로 반복되는 시퀀스이며 각각의 이진수는 Table 1 에 주어진 되먹임 방정식(Feedback equation)과 배타적 논리합 함수(Exclusive OR function)를 이용하여 산출한다⁸. N bit 의 PRBS 를 생성하기 위해 우선 초기상태 이진 수열의 첫 항은 1 그리고 나머지 항은 모두 0 이 되도록 a_1 부터 a_n 까지 모두 n 개를 설정한다. 그 다음의 항 a_{n+1} 은 Table 1 에 주어진 되먹임 방정식을 이용하여 0 또는 1 의 값을 생성한다. 이 수를 a_1 으로 다시 설정하고 초기에 주어진 항들의 순서를 하나씩 증가 시키는 방법으로 이진 수열의 항을 계속해서 구해 나가면 모두 2^n-1 개로 이루어진, 주기적으로 반복되는 n bit PRBS 를 구할 수 있다.

Table 1 Example of feedback equation for PRBS

Bit	Feedback equation
2	$a_2 \otimes a_1$
3	$a_3 \otimes a_2$
4	$a_4 \otimes a_3$
5	$a_5 \otimes a_4$
6	$a_6 \otimes a_5$

Table 2 Generation process of 3-bit PRBS (one period)

PRBS	0	0	1	0	1	1	1
Bit Shift	a_3	a_2	a_1	T			
	a_4	a_3	a_2	a_1	T		
	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	T	
	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	T
	a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1

$T : a_3 \otimes a_2$

이러한 생성과정의 예로 3 bit PRBS 를 구하는 방법을 Table 2 에 나타내었다. 앞서 언급한 것과 같이 초기에 3 bit 에 해당하는 a_1 부터 a_3 까지의 값이 '100'으로 주어졌었고 그 다음의 항은 되먹임 방정식 T 에 의해 구해지며 그 다음 행은 이러한 값의 하첨자를 하나씩 증가 시켜 변환 대입함을 알 수 있다. 이러한 bit 의 변환은 이진수의 개수가 2^3-1 이 될 때까지 반복되며 따라서 3 bit PRBS 의 경우 그 주기가 7 이 됨을 알 수 있다. 따라서 Table 2 의

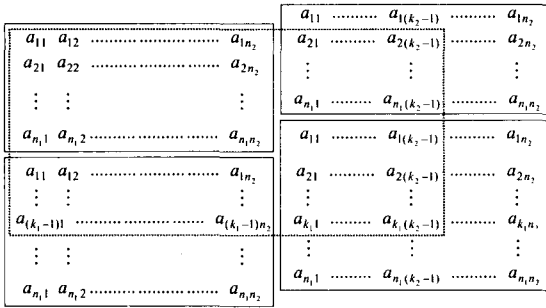


Fig. 4 Generation mechanism of N-bit PRBA based on one period-PRBS

PRBS 에 3 bit 의 윈도우 크기를 설정하면 7 개의 서로 독립된 정보(001, 010, 101 ... 100)가 존재함을 알 수 있다.

2.3 PRBA 로의 확장

앞서 설명된 한 주기의 PRBS 를 행렬 형태로 나열하여 2 차원으로 확장 시킨 개념이 PRBA 이다⁸⁻¹⁰. 우선 n-bit PRBS 의 한 주기에 해당하는 $2^n - 1$ 개의 이진수를 백하고 bit 수 n 을 1 을 제외한 두 수 k_1 과 k_2 의 곱으로 설정하여 식 (1)과 같이 PRBS 의 한 주기를 분할한다(따라서 PRBA 는 근본적으로 4bit 이상의 PRBS 를 통해서만 구현하는 것이 가능하다).

$$\begin{aligned} n_1 &= 2^{k_1} - 1 \\ n_2 &= P / n_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 P 는 $2^n - 1$ 을 나타내며 n_1 과 n_2 는 PRBA 의 한 주기에 해당하는 행과 열의 크기가 된다. 또한 PRBS 각각의 이진수를 $n_1 \times n_2$ 행렬에 대입하는 방법은 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} a_p &= a_{11}, a_{p-1} = a_{12}, \dots, a_{p-n_2+1} = a_{1n_2} \\ a_{p-n_2+2} &= a_{21}, \dots, a_1 = a_{n_1n_2} \end{aligned} \quad (2)$$

이렇게 해서 얻어진 $n_1 \times n_2$ 행렬을 가지고 P 개의 독립된 $k_1 \times k_2$ 행렬을 얻어내기 위하여 Fig. 4 와 같이 네 개의 $n_1 \times n_2$ 행렬을 배치한다. 이때 우측의 행렬들은 한 행을 위로 이동시켜서 배치하며 그림 안의 점선 사각형으로 묘사되어있는 $(n_1 + k_1 - 1) \times (n_2 + k_2 - 1)$ 행렬을 채택하면 P 개의 윈도우 특성을 갖는 n-bit PRBA 가 완성된다. 이러한 행렬에서

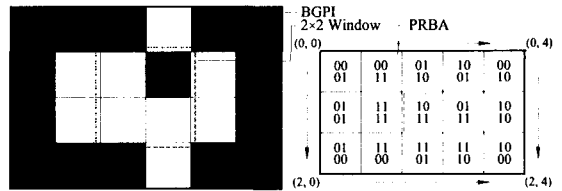


Fig. 5 BGPI by four bit PRBA and its matching codes

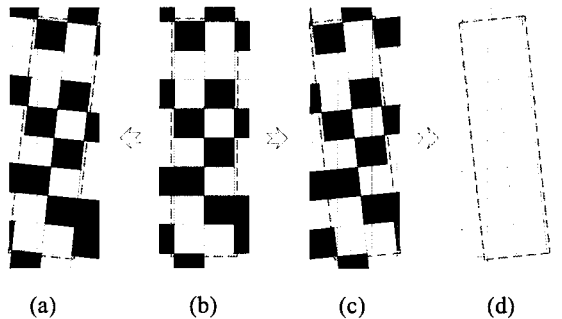


Fig. 6 Captured BGPI for angular perturbation (a) -6° (b) 0° (c) $+6^\circ$ (d) BGPI after image processing for (c)

$k_1 \times k_2$ 의 이차원 윈도우를 잡으면 각각의 행렬은 독립적이고 유일하게 된다.

위에 주어진 방법을 이용하여 4 bit PRBS 를 기초로 PRBA 를 생성하면 Fig. 5 와 같다. 기본 윈도우 크기로 왼쪽 BGPI 에서 점선 사각형으로 묘사되어있는 2×2 를 선택하면 4×6 크기의 PRBA 가 생성되며 따라서 3×5 가지의 독립된 윈도우 특성이 존재한다. 이러한 경우에 있어 대응되는 2 차원 좌표는 우측 그림의 점선 내부와 같다. 따라서 좌측 상단을 (0, 0)이라 하면 매칭 좌표는 (1, 2)가 된다. 이러한 방법으로 이차원 정보를 얻는 것이 가능하다.

3. 회전각 추출을 포함한 면내 위치 측정

전 장에서는 PRBA 를 이용하여 BGPI 를 생성하면 이를 바탕으로 2 차원 변위 정보를 얻는 것이 가능함을 보였다. 이에 추가하여 생성된 BGPI 면에 수직인 축에 대한 회전각의 정보를 추출하는 법을 bit 수가 16 인 PRBA 를 이용하여 소개한다.

우선 16-bit PRBS 에서 윈도우 비트 행렬을 Fig. 6 에 점선으로 표시되어있는 것처럼 8×2 로 설정하면 PRBA 의 크기는 Table 3 에서처럼 262×258 이 된다. 각각의 이진수를 50×50 수준의 화소 강도

Table 3 Measuring bound for BGPI and its Window size

N	P	Window	PRBA	BGPI	Max of Yaw (°)
4	15	2×2	3×5	4×6	17.2
6	63	3×2	7×9	9×10	15.0
8	255	4×2	15×17	18×18	12.0
10	1023	5×2	31×33	35×34	11.0
12	4095	6×2	63×65	68×66	11.0
14	16383	7×2	127×129	18×275	9.2
16	65535	8×2	255×257	262×258	8.0

N : No. of bit, P : One period of PRBS

행렬 (pixel intensity matrix)로 설정하여 BGPI 를 생성하면 전체 행렬의 크기는 13100×12900 이 되며 이 때 위치 정보와 회전 정보를 동시에 알아내기 위하여 450×150 의 강도 행렬만을 잡을 수 있도록 카메라의 활성창을 설정해 놓는다고 하자. 이때 생성된 BGPI 의 50×50 강도 행렬의 가장 자리에 회색 강도 128 의 라인을 추가하여 각각의 윈도우 비트 사이를 구별되게 한다. 이는 회전 정보를 얻기 위한 기준이 된다.

Fig. 6 은 카메라에 잡힌 영상을 나열한 것인데 (a), (b), (c)는 각각 시계 방향으로 6°, 0° 그리고 반시계 방향으로 6° 회전한 영상을 나타낸다. 회전각을 추출하기 위해 영상 (c)에 대해 128 강도의 감산 이미지 전처리와 임계 값 처리를 수행하면 윈도우 비트 사이의 라인 강도는 0 이 되고 흑백의 영상 패턴은 모두 사라진 즉 (d)와 같이 라인만이 존재하는 이미지를 얻는다. 이 때 첫번째 세로선의 강도에 해당하는 행렬 좌표를 감지하기 위해 가로 선의 강도 좌표를 피해야 한다. 따라서 행은 등 간격(50 행)으로 9 개의 좌표를 설정하여 첫 행부터 검색해 나간다. 이렇게 해서 검색된 첫번째 세로선의 좌표 데이터 8 개를 이용하여 1 차 최소 자승법(1st-order least square method)으로 직선의 방정식을 구하여 그 기울기로 회전 각의 정보를 얻어낸다. Fig. 6 의 (a), (b), (c)를 통해 알 수 있는 것처럼 회전각의 측정한계를 벗어나면 원하지 않는 가로선 강도 좌표의 일부가 검색되거나 두번째 세로선의 강도 좌표부터 검색하기 때문에 원하는 회전각을 얻을 수 없다. 따라서 이진 격자 패턴 이미지의 강도 행렬 좌표의 구조상의 한계 때문에, 주어진 영상의 회전각은 최대 ±8° 영역에서만 측정 가능하며 따라서 강도 행렬은 회전각의

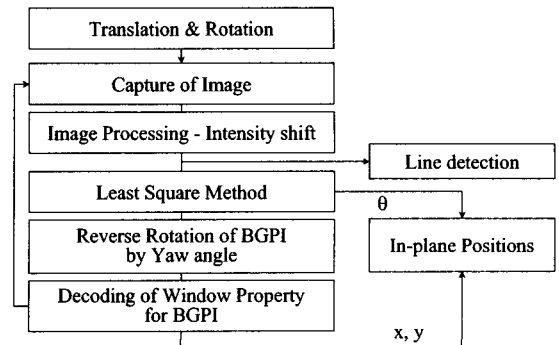


Fig. 7 Measuring process of in-plane position by BGPI

한계를 야기하며 결국 윈도우 행렬의 스케일이 이미지의 회전각의 측정 영역을 결정하는 것을 알 수 있다.

라인 검출을 통해 얻어진 회전각 정보를 이용하여 초기의 BGPI 에 대해 회전각만큼 역회전을 시킨 후에 Fig. 6 의 점선 영역 안의 윈도우 행렬을 코드화 된 PRBA 와 비교하면 2 장에서 설명한 병진 위치 추출 방법에서처럼 영상의 유일한 평면 위치를 산출할 수 있다. 이러한 면내 위치 정보를 추출하는 전체 과정을 Fig. 7 에 나타내었다.

4. 추출 메커니즘 검증

전장에 논의된 3 차원 위치 추출 방법에 대한 타당성 검증작업과 성능, 그리고 한계 인자에 대해 모의 시험과 실제 실험을 통해 분석하였다.

4.1 모의 시험을 통한 성능 평가

Table 3 은 각 bit 의 PRBA 에 대해 측정 윈도우에 따른 BGPI 의 크기가 주어졌을 때 모의 시험을 통한 회전각의 측정 범위를 나타낸 것이다. 이 때 x, y 의 측정 범위는 테이블에 제시된 한 주기의 BGPI 를 병렬로 추가하면 무한대로 확대하는 것이 가능하다. 테이블을 통해 특정 항목에 대해 구체화하면, 16bit 의 PRBS 에 대해 측정 윈도우를 8×2 로 선택하고 이차원 평면 이상의 분해능을 10μm 로 선정하면 한 주기 PRBA 의 크기 255×257 에 의해 x, y 의 측정 영역은 x 축으로 2.55mm, y 축으로 2.57mm 가 되며 BGPI 의 실제 크기는 2.62×2.58mm 가 된다. 또한 그 때의 회전각의 범위는 ±8°가 된다. 물론 앞서 언급한 것처럼 x, y 로의 측

정 영역은 위에 주어진 값이 한 주기의 최소 영역이 된다.

테이블에 주어진 각각의 PRBA 와 측정 윈도우 크기의 변화에 따른 시험 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 측정 윈도우의 각 셀 당 픽셀의 크기는 100 × 100 으로 설정하였으며 제한된 측정 기법의 특성 상 모의 시험 상에서는 평면 이동에 따른 오차의 발생은 존재하지 않으므로 회전 이동량에 대한 시

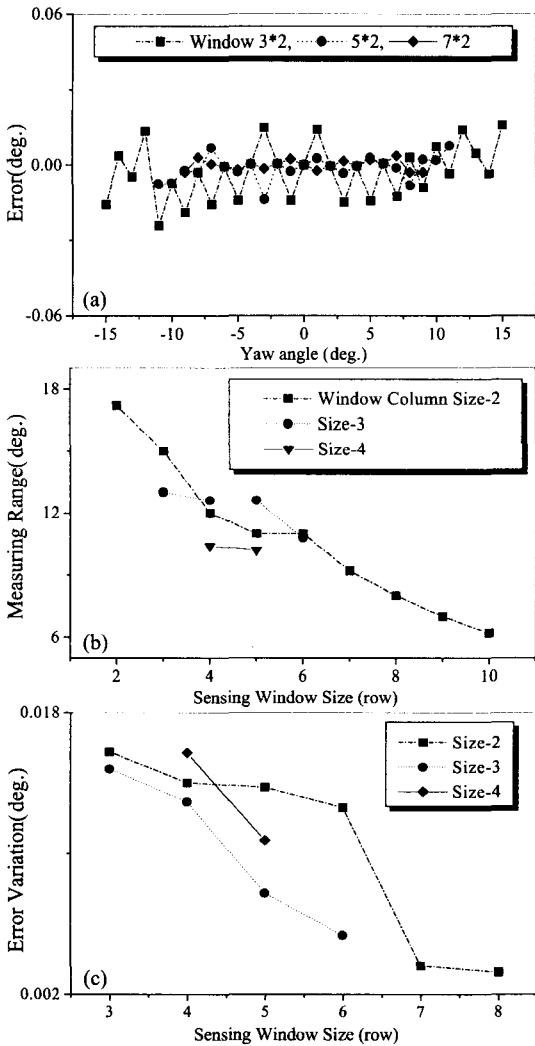


Fig. 8 Various simulation results (a) Error variation for target yaw angle (b) Measuring range of yaw angle for each sensing window size (c) Maximum error of yaw angle for sensing window size

험만을 수행하였다. 예측할 수 있는 것처럼 PRBA 의 비트수가 증가할수록 그리고 동시에 측정 윈도우 크기가 클수록 회전각의 오차량은 감소하는 것을 알 수 있지만 이와는 반대로 측정 윈도우의 증가는 회전량의 측정 범위를 제한하는 것을 역시 확인할 수 있다. 그러나 이러한 결과는 BGPI 의 물리적인 크기의 관점에서 해석되어야 한다. 즉, BGPI 는 실제로 CCD 카메라를 통해 영상 정보로 추출되는 원천적인 데이터 참조를 나타내므로 BGPI 의 크기를 고정시키면 PRBA 의 비트수가 증가된다는 것은 CCD 카메라의 분해능이 일정한 상태에서 결국 평면 이동 범위의 크기가 제약되는 결과를 낳게 된다. 이러한 이유는 CCD 칩에서 분해할 수 있는 최소 픽셀의 크기가 고정되어있기 때문이다. 따라서 비트수의 증가에 따라 연동해서 증가되는 측정 윈도우 크기는 최소 해상 분해능을 저감 시키므로 Fig. 8 의 결과에서 보듯이 측정 윈도우와 비트 수의 증가에 따른 회전 변위의 오차 감소는 이처럼 평면 이동 범위의 최소 분해능과 trade-off 의 관계를 갖는다. 따라서 비트 수와 측정 윈도우 크기는 평면, 회전 이동 범위와 그 분해능 그리고 CCD 카메라의 영상 분해능을 모두 고려하여 선택되어야 함을 알 수 있다.

4.2 정적 변위 측정

제안된 면내 위치 정보 추출 방법에 대한 실험을 Fig. 9 와 같이 구현된 장치를 이용하여 수행하였다. 시스템은 포토 에칭 기법을 통해 제작된 10μm 간격의 6bit BGPI 와 이를 통해 영상을 얻는 소니 사의 XC-77 카메라 그리고 Pic-Port 영상 그래픽(Grabber) 보드(Leutron Co.)로 구성된다. 해상

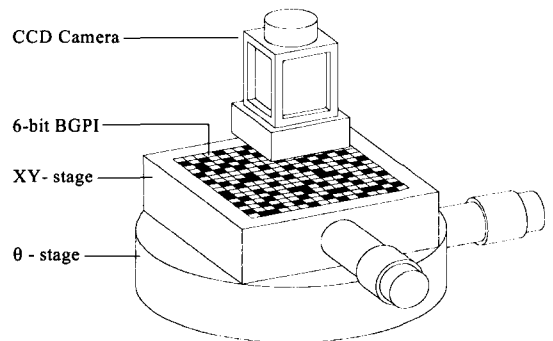


Fig. 9 Test set-up for the static measurement

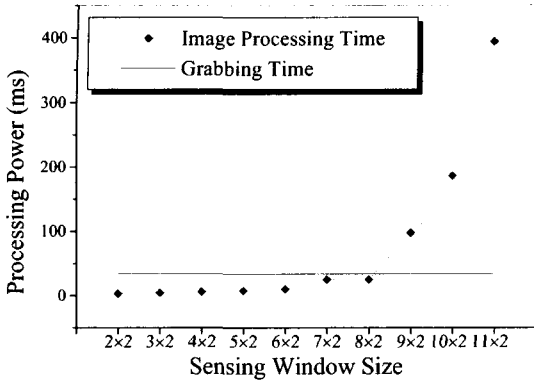


Fig. 10 Comparison of processing power for Sensing Window Size

신호의 그래빙 속도는 30Hz 이며 초점 거리 16mm 의 C-Mount 형 렌즈가 사용되었다. 이 때 BGPI 의 고정밀 변위 이송과 측정 결과 검증을 위해 분해능이 각각 1 μ m, 1/300°인 초정밀 xy 스테이지와 θ 스테이지가 중첩되어 연동된다. 이 때 전동식 구동기를 통해 동특성을 갖는 스테이지를 사용하는 것 대신 정적 변위만을 측정 대상으로 하였다. 이러한 정특성 측정의 보완으로 Fig. 10 에서처럼 간접적으로 동적 변위 측정의 한계를 고려하였다. 구성된 하드웨어 특성상 이미지 획득 시간은 30 Hz 로 고정되어있기 때문에 추출 알고리즘을 통한 변위의 decoding 은 모두 이 시간 안에 처리되어야 한다. 그러나 측정 윈도우 사이즈가 증가함에 따라 이미지 처리 시간은 과도하게 증가되며 따라서 기본적인 하드웨어의 처리 능력(processing power)의 범주를 벗어나게 된다. Fig. 10 의 결과를 통해 윈도우 사이즈가 8x2, 즉 16bit 이상이 될 때 이미지 처리 시간이 이미지 획득 시간에 비해 과도하게 증가되는 것을 알 수 있으며 따라서 16bit 이상의 BGPI 에 대해서는 동적 변위 측정 시에 실시간으로 이러한 과정을 수행하는 것이 대단히 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 앞장의 모의 시험에서 논의된 것처럼 윈도우 사이즈의 증가는 분해능의 감소 뿐만 아니라 이처럼 이미지 처리량의 증가를 야기시킨다.

평면 이동에 대한 변위 정보는 Fig. 11 에서와 같이 모의 시험과 마찬가지로 오차 없이 추출됨을 알 수 있었으나 회전 정보는 렌즈를 통한 영상의 왜곡으로 약간의 오차를 수반하는 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 오차의 범위 역시 모의 시험

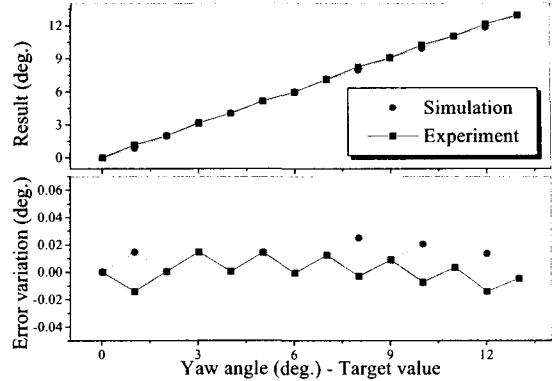


Fig. 11 Comparison of results for target angle variation

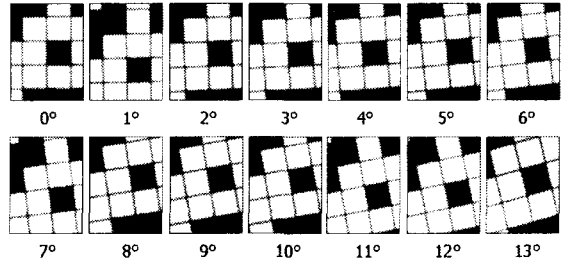


Fig. 12 Captured image of BGPI for rotation

에서 수행되었던 회전 이동에 대한 오차의 한계인 $\pm 3.5E-4$ rad 의 범위 안에 있음을 알 수 있었다.

Fig. 12 는 3x2 의 측정 윈도우를 이용하여 획득한 회전 이동에 따른 실제 BGPI 의 이미지를 나타낸다. 일반적으로 알려진 카메라의 영상 분해능을 높이기 위해 최적화되는 조명의 강도와 방향, 픽셀 분해능, 초점 거리등에 대한 논의는 배제하더라도 Fig. 11 과 Fig. 12 에서 얻어진 특정 회전각에 대한 오차의 범위는 구성된 하드웨어의 한계에 달하는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

4.3 고찰 및 추후 연구 과제

제안된 추출 방법을 1 장에서 서술한 실제 서보 시스템, 비접촉식 평면 액추에이터의 면내 위치 되먹임에 적용할 경우 BGPI 를 탑재한 이동 스테이지는 정적 운동으로 가정될 수 있는 계단 운동 뿐만 아니라 과도 특성을 포함하는 연속된 운동을 한다. 즉, 카메라에서 획득되는 영상은 이산 분포되어있는 이미지 뿐만 아니라 기본 윈도우 비트와 다음 윈도우 비트 사이에 영상이 겹쳐 있을 수 있으며 따라서 이러한 경우 현재 획득된 영상

과 가장 근사한 영상에 대한 강건한 매칭법(robust matching)을 이용하거나 연속 영상에 대한 보정(interpolation)을 통해 접근하는 것이 가능하다. 이러한 논지를 포함하여 제안된 추출 방법이 서보 시스템에 통합될 경우 발생할 수 있는 제반 문제에 관한 연구가 현재 수행중이다.

5. 결론

본 논문에서는 저자들에 의해 기 개발된 비접촉식 평면 액추에이터의 면내 운동 측정에 적용하기 위해 BGPI 와 CCD 카메라를 이용하는 새로운 방법의 x, y, θ 정보의 추출 기법을 제안하였다.

통신 공학에서 데이터 전송용으로 사용되는 암호화된 PRBS 의 2 차원 확장 개념인 PRBA 를 이용하여 CCD 카메라의 영상 참조 데이터가 되는 BGPI 를 제작하였고 각 bit 사이에 강도 128 을 갖는 회색 라인을 추가하여 라인의 기울기 정보를 추출하여 BGPI 의 회전각 변화를 계산하였다. 얻어진 회전각을 이용하여 BGPI 에 대해 회전 역변환(inverse transform)을 수행한 후 매칭 알고리즘을 통해 BGPI 의 평면 이동 변위를 추출하였다.

본 논문에서는 제안된 기법을 이용하여 PRBA 의 bit 수의 변화, 측정 윈도우 사이즈의 변화에 따른 위치 분해능, 측정 범위, 회전각 오차 한계 등을 모의 시험을 통해 정량화 하였으며 이와 더불어 위의 변화 조건에 따른 하드웨어 처리력과 회전각에 따른 오차의 변화를 실험을 통해 확인하였다.

후 기

본 연구는 2000 년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제(2000-1-30400-009-3)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- Tomita, Y. and Koyanagawa, Y., "Study on a surface-motor driven precise positioning system," *Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control*, Vol. 117, pp. 311-319, 1995.
- Kim, W. J. and Trumper, D. L., "High-precision magnetic levitation stage for photolithography," *Precision engineering*, Vol. 22, pp. 66-77, 1998.
- Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Study on a novel contact-free planar moving system using direct-drive dc coil and permanent magnet," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 35-43, 2002.
- Jung, K. S., Lee, S. H. and Baek, Y. S., "Repulsive & Attractive Type Magnetic Levitation for Mechanical Isolation of The Planar Stage Mover," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 76-83, 2003.
- Jung, K. S., Lee, S. H. and Baek, Y. S., "Feasibility Study of General-purpose Precision Stage Using A Novel Contact-Free Surface Actuator Based on Magnetic Suspension Technology," *Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 452-460, 2002.
- Garner, H., Klement, M. and Lee, K. M., "Design and analysis of an absolute non-contact orientation sensor for wrist motion control," *IEEE/ASME AIM'01 proceedings*, Italy, pp. 69-74, 2001.
- Blakley, J. J., "Two-dimensional position sensing using absolute-type encoder scheme employing pseudo-random binary arrays," *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 15, pp. 1277-78, 2000.
- MacWilliams, F. J. and Sloane, N. J., "Pseudo-random sequences and arrays," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 64, No. 12, pp. 1715-30, 1976.
- Etzion, T., "Constructions for perfect maps and pseudorandom arrays," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 34, No. 5, pp. 1308 - 1316, 1988.
- Ali, A. and Halijak, C. A., "The Pseudorandom Sequence of Arrays," *Proceedings of Twenty-First Southeastern Symposium on System theory*, pp. 138 - 140, 1989.