

## 대면적/고정밀 3차원 표면형상의 5자유도 정합법 개발 및 평가

이동혁<sup>a</sup>, 안정화<sup>b</sup>, 조남규<sup>c\*</sup>

## Development and Evaluation of Stitching Algorithm With five Degrees of Freedom for Three-dimensional High-precision Texture of Large Surface

Dong-Hyeok Lee<sup>a</sup>, Jung-Hwa Ahn<sup>b</sup>, Nham Gyoo Cho<sup>c\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Design And Mechatronics, Hanyang Univ., Republic of Korea<sup>b</sup> Manufacturing and Measuring Research Department, Hyundai Maritime Research Institute, Republic of Korea<sup>c</sup> Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	2	July	2013
Revised	27	January	2014
Accepted	26	March	2014

## Keywords:

Surface stitching  
3D profile  
Alignment error  
Large surface texture  
Uncertainty analysis

## ABSTRACT

In this paper, a new method is proposed for the five-degree-of-freedom precision alignment and stitching of three-dimensional surface-profile data sets. The control parameters for correcting the alignment error are calculated from the surface profile data for overlapped areas among the adjacent measuring areas by using the “least squares method” and “maximum lag position of cross correlation function.” To ensure the alignment and stitching reliability, the relationships between the alignment uncertainty, overlapped area, and signal-to-noise level of the measured profile data are investigated. Based on the results of this uncertainty analysis, an appropriate size is proposed for the overlapped area according to the specimen’s surface texture and noise level.

## 1. 서론

최근 웨이퍼, 솔라셀, LCD (liquid crystal display), PDP (plasma display panel), 마이크로 렌즈 어레이(micro-lens array), 대형 광학거울 및 반사경 등의 대면적 고정밀 부품에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 3차원 형상 측정방식을 이용한 부품 표면의 미세형상 정밀측정 및 평가기술이 더욱 중요시 되고 있다.

광학식 측정기들은 시료에 직접적인 접촉이 필요하지 않아 손상의 염려가 없으며, 접촉식 측정기에 비하여 상대적으로 고속의 정밀측정이 용이하다는 장점으로 인해 지속적으로 주목을 받고 있다. 게다가 근래의 급격한 광학 기술의 발전과 가공기술에 힘입어, CCD (charge coupled device), CMOS (complementary metal-oxide

semiconductor), 그리고 PMT (Photomultiplier Tube)와 같은 이미지 센서들을 채택하고 있는 다양한 광학식 측정기들이 연구 개발되어 범용화되고 있다.

이와 같은 이미지 센서의 활용은 측정영역 내의 형상정보를 한번에 획득할 수 있도록 하여, 고속측정이 가능하다. 그러나 미세 표면형상의 측정과 같이 고배율 측정이 요구되는 경우에는 대물렌즈의 배율에 따라 측정영역 및 횡방향 분해능이 제한되게 된다. 그에 비해, 대면적 고정밀 부품의 정밀측정 및 평가의 요구가 증가하고 있어, 이와 같은 제약은 반드시 극복되어야 할 한계이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 여러 개의 이미지 센서를 연결하거나, 대형 이미지 센서를 이용하여 대면적의 측정데이터를 획득하는 연구들이 진행되었다<sup>[1-4]</sup>. 그러나 이러한 접근 방법은 제품이 커지

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-400-5286

Fax: +82-31-436-8112

E-mail address: ngcho@hanyang.ac.kr (Nahm Gyoo Cho).

고 복잡해지므로, 요구되는 측정영역의 크기에 따라 제작해야 하는 문제점과 함께 제품이 고가화되는 문제점을 갖고 있다. 이런 단점을 해결하기 위해 단일 이미지센서로 구축되는 단순한 광학 측정계와 정밀 구동 스테이지를 적용하여 복수의 형상 측정 데이터를 획득한 후, 이들을 정합하여 대영역의 데이터를 획득하고자 하는 연구들이 수행되고 있다<sup>15,6)</sup>. 그러나 획득된 형상 측정 데이터들 사이에는 위치 및 자세오차를 가지고 있다. 따라서 이 데이터들 사이의 오차들을 최소화하는 것을 정합(stitching)이라고 부른다.

획득된 형상 데이터세트들 사이의 위치 및 자세오차를 고려하는 정합법은 1) ‘특징점들을 추출하여 이 특징점들이 일치하도록 정합하는 방법’들과 2) ‘프로파일 데이터의 통계적 처리 등에 의한 정보를 추출하고 이를 기반으로 정합하는 방법’들로 크게 분류된다. 이 중, 특징점 추출에 의한 정합법은 파노라마사진과 같은 이미지 정합에서는 많이 사용되고 있다. 그러나 기계가공형상 같은 특징점 추출이 어려운 경우 혹은 형상 데이터세트들이 갖는 자세오차의 정밀한 교정이 요구되는 경우에는 적용이 어렵다.

따라서, 정밀측정에 의한 데이터의 정합에는 형상 데이터의 통계적 처리에 의한 정합법들이 더 적합하며<sup>7-9)</sup>, 이를 위해서는 인접하는 데이터 영역 위치에 공통영역을 갖도록 데이터를 획득한 뒤, 최소제곱법 등을 이용하여 이 공통영역 부분의 자세정보를 추출한 뒤, 이를 기반으로 자세오차를 교정하여 정합하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다<sup>10,11)</sup>. 측정데이터들로부터 순차적으로 최소제곱법에 의한 자세정보를 추출하고, 이를 이용한 자세오차의 교정 및 정합을 수행하는 연구 결과가 발표되었다<sup>12-14)</sup>. 그러나 이러한 방법은 순차적으로 형상 데이터세트들의 정합을 수행하기 때문에, 정합되는 데이터의 수가 많아질 경우, 누적오차가 지나치게 커지는 문제점이 있다.

이러한 문제점으로 인해, 전체 측정영역에 대해 획득된 형상 데이터세트들의 교정오차 누적이 최소화되도록 최적화 알고리즘이 제안되었다<sup>15-19)</sup>. 이를 이용하여 X-Y 평면 영역에서 얻어진 형상 데이터세트의 X-축 회전오차, Y-축 회전오차, 그리고 Z-축 방향의 병진이동오차의 3자유도 오차성분의 교정과 정합이 수행되었다.

이들 연구에 의해, X-축과 Y-축 방향의 정밀 구동이 가능한 측정 시스템을 기반으로 하는 측정프로파일의 정합이 가능하게 되었다. 그러나 정밀한 정합이 이루어질 수 있도록 신뢰성 높은 자세정보의 추출을 위해서는, 측정시스템과 측정되는 시료의 특성을 고려한 공통영역 설정조건에 대한 체계적인 검토가 필요하다. 또한, 이 방법은 X-축과 Y-축의 병진이동오차가 무시할 수 있을 정도의 정밀한 구동시스템을 전제로 한다. 따라서 대면적 시료의 고정도 측정을 위해서는 대구동이 가능한 고정밀의 구동장치가 요구되며, 이는 측정기의 가격 상승 요인으로 작용한다. 한편, 이러한 문제점을 해결할 수 있도록, 시료에 마커를 제작하고 상호상관함수를 이용하여

자세정보를 추출하여 이용하는 정합법을 제안하였으나<sup>20-22)</sup>, 실제 측정에 적용을 위해서는 모든 시료에 마커를 제작해야 하며, 시료에 따라서는 마커의 제작이 곤란한 경우도 있어, 근본적인 해결책이 되기에는 부족하다.

이와 같은 배경으로부터, 본 논문에서는 저가의 범용 구동장치만을 사용하여 획득되는 형상 데이터세트의 대면적 고정밀 정합이 가능하도록 하기 위한 정합법을 제안하고, 아울러 이를 적용하여 신뢰성 있는 정합이 가능하도록 하기 위해, 정합 불확도 분석을 통한 공통영역의 설정조건을 검토하여 제시하였다.

## 2. 삼차원 측정데이터의 정밀 정합법

이미지 센서를 이용하여 형상 데이터세트를 획득하도록 설계된 광학식 측정시스템과 X-Y 구동 스테이지를 이용한 대면적 시료의 고정밀 측정의 예를 Fig. 1에 보인다. 일반적으로 이미지 센서에 의해 한 번에 획득이 가능한 단위 측정영역보다 큰 영역에 대한 측정을 수행할 경우에는, 서로 인접하는 측정 데이터가 공통영역을 가지고 중첩되도록 스테이지를 구동하며 연속적으로 데이터를 획득한다.

그러므로 이런 측정방식에 의해 얻어지게 되는 각각의 단위영역 측정데이터는, Fig. 2에 보이는 것처럼, 스테이지 및 리니어가이드의 제작/제어 오차 등을 포함하는 스테이지 구동오차에 의해 6자유도의 위치 및 자세오차를 포함하게 된다. 구동 스테이지를 통해 X-축에 대한 이송량  $\Delta X$ , Y-축에 대한 이송량  $\Delta Y$ 만큼 이동된 위치에서, 측정된 임의의 단위영역 측정데이터는 구동 중의 외란에 의해 X-축, Y-축, 그리고 Z-축 방향의 병진이동오차  $e_x, e_y, e_z$ 와 회

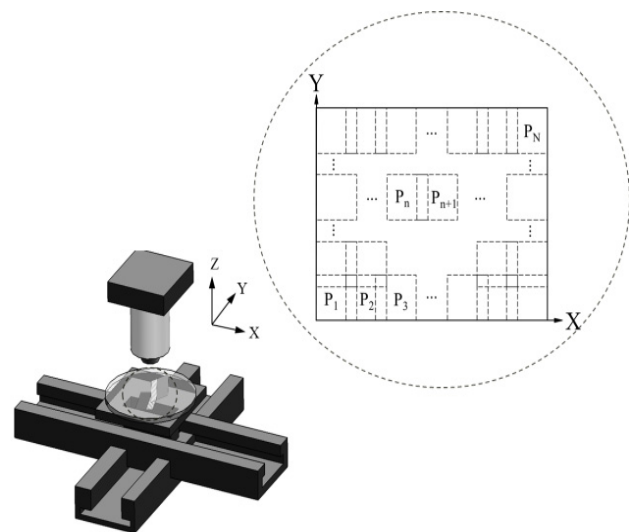


Fig. 1 Typical 3D profile data acquisition using optical probe and X-Y stage

전에 의한 오차  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  및  $\theta_z$ 를 포함하게 된다. 여기서,  $P_A$ 는 병진 및 회전오차를 갖지 않았을 때의 측정하고자 하는 영역을 나타낸다.

그러나 일반적으로 이러한 측정장비에 널리 사용되는 직렬형 구동기구의 특징상, Z-축 방향의 회전오차  $\theta_z$ 는 다른 오차 성분에 비해 상대적으로 작다. 따라서, 본 연구에서는 이 오차성분에 의한 영향은 미미한 것으로 판단하고, 본 논문의 저자들이 개발한 5자유도 오차 교정 알고리즘을 바탕으로 수행하였다<sup>[8,10,11]</sup>.

앞에서 언급한 인접한 형상 측정 데이터 사이에 발생하는 기하학적 오차는 주요 요인에 따라 다음과 같이 구분이 가능하다. 횡방향의 병진이동오차  $e_x$ ,  $e_y$ 는 구동 스테이지의 구동정밀도와 리니어 가이드의 수평 진직도 등에 의해 나타난다. 그리고 회전에 의한 오차  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  및 Z-축 방향의 병진이동오차  $e_z$ 는 측정 프로브의 설치 오차, 리니어가이드의 수직 진직도와 측정 프로브의 높이 측정 불확도 등에 의해 나타난다. 또한, 오차  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  및  $e_z$ 는 누적오차가 최소화되도록 하는 최소제곱법 기반의 정합 알고리즘에 의해 교정이 가능하다.

따라서 기하학적 오차 발생 요인에 따른, 데이터 처리 방식의 상이성 등을 고려하여, 횡방향의 병진 이동오차  $e_x$ ,  $e_y$ 를 교정하여 하나의 측정좌표계에 정렬한다. 그리고 정렬된 모든 측정데이터셋을 누적오차가 최소화 가능한 알고리즘에 적용함으로써  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  및  $e_z$ 를 교정한다. 이 과정은 Fig. 3에 간략하게 보인다.

측정시 발생하는  $e_x$ 와  $e_y$ 의 교정량은 공통영역(overlap area)의 데이터 중 동일위치로 예상되는 위치의 형상 데이터셋을 이용하

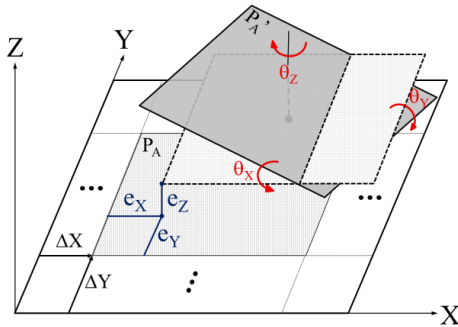


Fig. 2 Rotation and translation error of a unit profile data set during measurement process

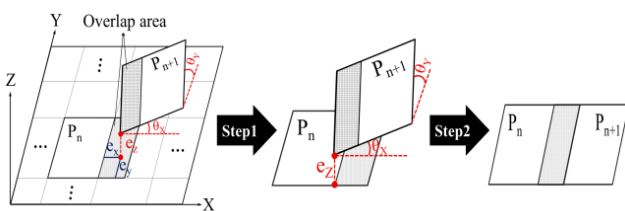


Fig. 3 5-DOF error correction and stitching

고 정규화 상호상관함수(normalized cross correlation function)를 이용하여 산출된다.

Fig. 4에 보이는 바와 같이, 임의의 위치에서의 측정평면인  $P_n$ 에 대하여 인접하는 평면  $P_{n+1}$ 가 X-축 방향으로  $e_x$ , 그리고 Y-축 방향으로  $e_y$  병진이동오차를 갖는다고 하면, 각각의 공통영역에서 추출된 두 형상 데이터들의 2차원 정규화 상호상관함수는 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$c(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [Z_{P_r}(x, y) - \overline{Z_{P_r}}][Z_{P_t}(x - \Delta x, y - \Delta y) - \overline{Z_{P_t}}]}{\left\{ \sum_{x,y} [Z_{P_r}(x, y) - \overline{Z_{P_r}}]^2 \sum_{x,y} [Z_{P_t}(x, y) - \overline{Z_{P_t}}]^2 \right\}^{0.5}} \quad (1)$$

여기서,  $c(u, v)$ 는 산출된 상호상관계수를 나타내며,  $Z_{P_r}$ 은 측정데이터  $P_n$ 내부의 참조영역  $P_r$ 의 높이데이터를 나타낸다. 또한,  $Z_{P_t}$ 은 측정데이터  $P_{n+1}$ 내부의 비교영역  $P_t$ 의 높이데이터를 나타낸다. 그리고,  $\overline{Z_{P_r}}$ 과  $\overline{Z_{P_t}}$ 는  $Z_{P_r}$ 과  $Z_{P_t}$ 의 평균값이다.

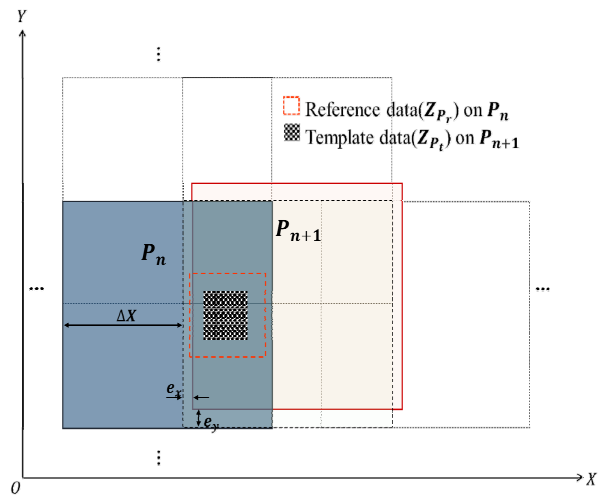


Fig. 4 Horizontal translation error between the adjacent planes

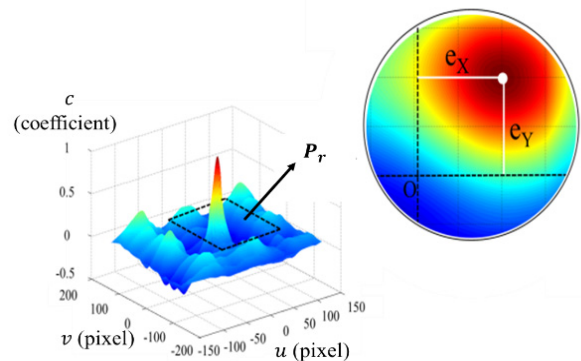


Fig. 5 Normalized 2D cross-correlation function and estimated translation errors in the direction of X- and Y-axis

식 (1)에 의해 산출된 정규화 상호상관함수의 결과 예를 Fig. 5에 보인다. 두 프로파일데이터세트의 수평방향 부정합량은 상호상관함수가 최대값을 보이게 되는 지점으로 표현되는 공간지연량 (spatial lag)으로 추정된다. 따라서 그림에서와 같이 설정되는 X-Y스테이지 등의 구동장치가 갖는 구동오차한계를 고려한 영역 내에서 상호상관함수가 최대값을 갖는 지점을 찾아 교정 오차량을 결정하게 된다. 앞에서 설명한 바와 같이 산출된 병진이동오차  $e_x$ 와  $e_y$  교정값을 적용하여 X-축 및 Y-축에 대한 병진이동오차가 교정된 결과 데이터평면은 최소제곱법의 응용 알고리즘을 적용하여 추가적으로 다시 3자유도의 자세 및 수직 병진이동오차 교정이 수행된다.

측정프로브 시스템에 의한 측정오차의 영향이 충분히 작다면, 예를 들어  $e_x$ 와  $e_y$ 가 교정된 데이터평면  $P_n$ 과 그로부터 X-축 방향으로  $\Delta X$ 만큼 구동 후 측정된 인접한 데이터평면  $P_{n+1}$ 의 공통영역으로부터 구해지는 각각의 최소제곱평면은 측정과정에서 유입된 다양한 외란에 의한 영향으로 발생된  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  그리고  $e_z$ 에 의해, 식 (2)의 관계로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_n(x, y) &= Z_{n+1}(x - \Delta X, y) + ax + by + c & (2) \\ a &= \tan\theta_x \\ b &= \tan\theta_y \\ c &= e_z \end{aligned}$$

여기서, Z는 각 평면의 공통영역 내 높이 측정데이터이다. a, b와 c는  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 와  $e_z$ 에 대한 보정계수이다. 각각 이 관계식을 사용하여 공통영역 내 동일 위치의 높이 차를 나타내고, 이 높이 차이를 최소화하는 계수를 최소제곱법을 이용하여 구한다. 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$\sum \{Z_n(x, y) - [Z_{n+1}(x - \Delta X, y) + ax + by + c]\}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

정합하기 위해서는 위의 식 (3)의 확장이 필요하다. 이때, 임의 측정데이터  $P_n$ 을 기준으로 삼는다고 가정하면, 다른 데이터들과  $P_{n+1}$ 은 식 (4)와 같은 관계식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_{P_n} &= Z_{P_1}(x - \Delta X_1, y - \Delta Y_1) + a_1 x + b_1 y + c_1 \\ &= Z_{P_2}(x - \Delta X_2, y - \Delta Y_2) + a_2 x + b_2 y + c_2 \\ &= \dots \\ &= Z_{P_{n-1}}(x - \Delta X_{n-1}, y - \Delta Y_{n-1}) + a_{n-1} x + b_{n-1} y + c_{n-1} & (4) \\ &= Z_{P_{n+1}}(x - \Delta X_{n+1}, y - \Delta Y_{n+1}) + a_{n+1} x + b_{n+1} y + c_{n+1} \\ &= \dots \\ &= Z_{P_N}(x - \Delta X_N, y - \Delta Y_N) + a_N x + b_N y + c_N \end{aligned}$$

식 (4)의 관계식도 최소제곱법을 이용해서 하여 기준으로 정한 데이터와 다른 모든 데이터들의 높이 차들의 합이 최소가 되도록 하는 각각 평면들의 계수를 구한다. 이때, 계수들의 해를 쉽게 계산할 수 있도록 행렬방정식으로 표현하여 계산한다. 모든 측정평면들에 대하여 각 픽셀 별 Z 오차값의 제곱합이 최소가 되도록 하는 오차의 교정값을 산출하기 위한 행렬식은 식 (5-8)로 표현하였다<sup>[17,18]</sup>.

$$\begin{aligned} \left[ \left( \sum_{k=0}^{m-1} D_{ik} \right) \right] &= \left[ \left( Q_{ij} - \delta_{ij} \sum_{k=0}^{m-1} Q_{ik} \right) \right] \left[ (S_i)_i \right] & (5) \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{if } i=j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \end{aligned}$$

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i,y} x \Delta(x, y) \\ \sum_{i,y} y \Delta(x, y) \\ \sum_{i,y} \Delta(x, y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

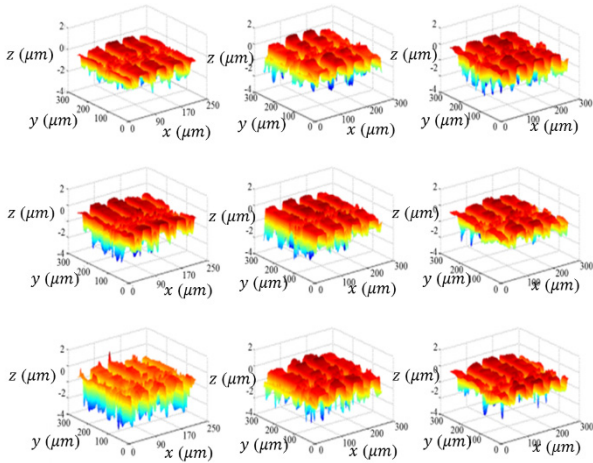
$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} x^2 & \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} x \\ \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} y^2 & \sum_{i \cap j} y \\ \sum_{i \cap j} x & \sum_{i \cap j} y & n_{ij} \end{bmatrix}, Q_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

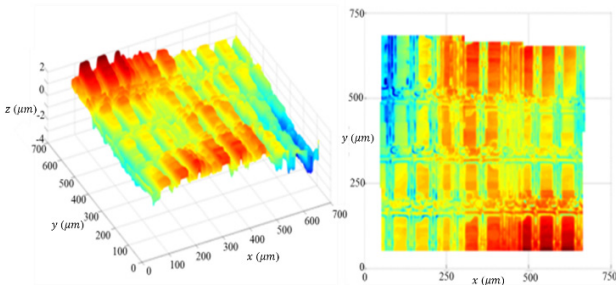
이때, 행렬식에서 i는 최소제곱법 적용시 기준이 되는 데이터평면의 번호이며, j는 기준평면에 대해 알고리즘을 적용하게 되는 평면의 번호를 의미한다. m은 최소제곱법을 적용하는 전체 평면의 개수이다.

이 관계를 적용함으로써, 측정된 평면의 개수가 많아지더라도 최소제곱법의 행렬 변환식을 사용하여 오차의 누적현상을 가능한 억제할 수 있는 오차교정값을 효율적으로 산출할 수 있다.

실제의 측정프로파일데이터세트를 대상으로 개발된 오차교정 알고리즘을 적용한 사례를 Fig. 5에 보인다. 프로파일데이터는 공초점 현미경(CLSM; confocal laser scanning microscopy, NS-3000, Nanoscope system, Korea)을 사용하여 50배율로 LCD패널을 공통영역을 30%로 설정하여 순차적으로 9번 측정하였다. 각각의 단일 측정데이터를 Fig. 6(a)에 보인다. 또한, 제안된 정합법을 적용한 결과를 Fig. 6(b)에 배경도(좌)와 평면도(우)를 보인다. 평면도를 보면 X-축 방향과 Y-축 방향의 병진이동오차가 교정된 것을 쉽게 확인할 수 있다. 참고로, 일반적인 경험을 바탕으로 현재 ZYGO, WYCO사 등을 비롯한 몇몇 현미경업체에서는 안정적으



(a) Measured data sets (3 × 3)



(b) Stitched data by proposed method (3 × 3)

Fig. 6 LCD surface data stitching

로 고신뢰성의 데이터정합이 이루어질 수 있도록 20-30%의 면적을 추천하고 있다<sup>[21]</sup>. 일반적으로 공통영역의 비율을 추천값보다 작게 설정하는 경우, 부정합이 일어날 가능성이 높아진다. 그러나 공통영역의 비율에 따라 정합을 위해 필요한 단일 측정영역의 개수가 많은 차이가 난다. 따라서 정합에서 공통영역의 비율은 굉장히 중요한 파라미터가 된다. 하지만, 현재까지는 이러한 공통영역의 비율과 시료의 특성에 따른 정합된 데이터의 정확정밀도에 대한 검토가 부족하다. 따라서, 실제의 경우에는 시료의 표면 특성, 측정 프로브의 종방향 분해능과 횡방향 분해능, 그리고 측정데이터 평면의 부정합 정도 등에 대한 관계 분석을 기반으로 하는 엄밀한 검토가 필요하다.

### 3. 제안된 5자유도 정밀 정합법 평가

파노라마 사진을 위한 데이터 정합과 같은 경우에도 정합의 성능은 결과사진의 질적 수준에 영향을 미친다. 더욱이 본 연구에서 대상으로 하고 있는 바와 같이, 대면적 영역에 대한 3차원 정밀 형상의 측정을 목표로 하고 있는 경우에는, 정합 정도가 측정대상의 평

가 결과에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 측정하고자 하는 전체 측정영역을 일정한 공통영역을 가지고 분할하여 측정할 경우에, 그 공통영역의 정보는 정합을 위한 데이터로서 정합된 데이터의 신뢰성에 직접적으로 영향을 끼친다. 따라서, 공통영역의 크기를 크게 설정하여 공통영역 데이터가 많은 경우에는, 정합된 데이터의 신뢰성은 쉽게 보장될 수 있다. 그러나, 대면적을 측정하기 위해서는 공통영역을 작게 설정하여 측정 횟수를 감소시키는 것이 중요하다. 그러므로, 단순히 효율적인 정합에 그칠 것이 아니라, 요구되는 측정 및 평가정밀도에 만족할 수 있도록 정밀한 정합이 이루어지기 위해서는, 효율적인 정합방법과 함께 이 방법을 적용하여 고신뢰성 데이터를 확보할 수 있는 정합조건 도출 또한 매우 중요하다.

이웃하는 데이터영역의 데이터와 비교할 수 있는 데이터의 양은 측정 시에 설정되는 공통영역의 크기에 의해 결정된다. 따라서 정합도의 향상을 위해서는 단위 검토를 위한 평가용 형상 데이터는 최근 대면적 고배율 측정의 요구가 증가하고 있는 대상인 LCD 패널, PDP 패널, 사파이어 웨이퍼(Bump), 높이 표준시편(step height standard)이 CLSM을 사용하여 측정되었다. 측정된 단일영역 데이터의 크기는  $250 \times 250 \mu\text{m}^2$  ( $512 \times 512$  pixels)이며, 수평방향의 측정분해능은 488 nm, 그리고, 수직 방향의 측정분해능은 10 nm이다.

모사실험을 위해, 상기 4종류의 시료로부터 얻어진 형상 데이터 세트를 기반으로 외란에 의해 위치 오차를 포함한 단일영역 형상 데이터세트들이 식 (9)의 관계를 이용하여 준비되었다.

$$\begin{aligned} P_r &= P_0(x_i, y_j) + N(x_i, y_j) \\ P_t &= P_0(x_i + e_x, y_j + e_y) + N(x_i, y_j) \end{aligned} \quad (9)$$

식에서,  $P_0(x_i, y_j)$ 는 측정된 형상 데이터를 기반으로 하는 측정 오차가 전혀 없는 가상의 진프로파일 데이터세트며, 그에 대해  $P_r(x_i, y_j)$ 은 임의의 위치에서 선택된 모사실험시 기준이 되는 평면을 의미하며,  $P_t(x_i, y_j)$ 는 기준평면을 기준으로 X-축과 Y-축 방향으로 각각 병진이동오차  $e_x$ 와  $e_y$ 를 가지는 데이터를 의미한다. 또,  $N(x_i, y_j)$ 는 각 픽셀에서 측정시 발생하는 우연오차 성분이다.

$P_r$ 과  $P_t$ 에 알고리즘을 적용하여 교정된 추정이동평면  $\hat{P}_t$ 를 구한다. 이때,  $\hat{P}_t$ 와 실제 이동평면인  $P_t$ 의 X-축 및 Y-축 방향의 병진 이동오차의 차이 값을  $e_{cx}$ ,  $e_{cy}$ 라고 한다. 이를 식 (10)에 나타내었다.

$$\hat{P}_t(x_i, y_j) = P_0(x_i + e_x + e_{cx}, y_j + e_y + e_{cy}) + N(x_i, y_j) \quad (10)$$

측정 데이터에 대한 공통영역의 비율  $R_0$ 을 충분히 크게 설정하는 것이 바람직하다. 그러나,  $R_0$ 이 증가함에 따라 공통영역의 증가

에 따른 측정해야 할 단일 측정 데이터의 수가 증가하게 되며, 그에 따라 측정 횟수와 측정 시간도 증가하게 되어 측정 효율이 감소하게 된다. 또한, 공통영역의 수뿐 아니라 공통영역 내의 데이터 크기도 증가하게 되므로, 정밀 교정량의 산출을 위한 연산 시간 역시 급격하게 증가하게 된다. 이와 같이, 측정 효율 감소의 원인이 되는 공통영역의 크기를 줄이기 위해, 본 연구에서는, 측정 프로브에 의해 유입되는 노이즈의 크기  $N_A$ 와 공통영역비율  $R_0$ 가 정합오차 교정량 산출에 미치는 영향에 대한 검토가 수행되었으며, 그 결과를 기반으로 공통영역 비율의 결정을 위한 조건을 결정하였다.

이렇게 준비된 형상 데이터셋들에 다양한 크기의 공통영역과 노이즈 레벨을 적용하고 식 (1)의 정규화 상호상관함수를 이용하여 X-축과 Y-축 방향의 병진이동오차를 산출 후 주어진 병진이동오차와의 차이를 비교하였다. 이상의 모사실험에 의한 검토결과, 공통영역비율과 측정 노이즈 레벨에 대한 X-축과 Y-축 방향의 병진이동오차의 추정불확도  $U_x$ 와  $U_y$ 의 관계를 Fig. 7에 보인다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 CCD 등의 이미지센서에 의한 데이터 수집방식을 채택하고 있는 측정기의 경우, 인접해서 얻어지는 단위 프로파일 데이터셋들 간의 병진이동오차 분해능은 이미지 센서의 횡방향 분해능에 의존한다. 따라서, 공통영역비율과 측

정 노이즈 조건을 고려하여, 병진이동오차 교정분해능의 한계값인 1픽셀 내의 교정불확도를 갖도록 교정과 정합을 수행한다면 최적의 정합이 이루어질 수 있다.

X-축과 Y-축 방향 회전오차 및 Z-축 방향 병진이동오차 교정량 산출의 정밀도 평가를 위해, X-축 및 Y-축 방향의 병진이동오차량 추정 정밀도의 검토방법과 유사하게, 4종류의 시료로부터 얻어진 형상 데이터셋을 기반으로 외란에 의해 위치 오차를 포함한 단일 영역 형상 데이터셋들이 식 (11)의 관계를 이용하여 준비되었다.

$$\begin{aligned} P_r &= P_0(x_i, y_j) + N(x_i, y_j) \\ P_{rt} &= P_0(x_i, y_j) + (ax_i + by_j + c) + N(x_i, y_j) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $P_{rt}(x_i, y)$ 는 기준평면을 기준으로 회전오차  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 와 병진이동오차  $e_z$ 를 가지는 데이터를 의미한다. a는 b는 임의로 주어지는 인접하는 두 프로파일데이터셋의 최소제곱평면이 갖는 x-축 및 y-축 방향 기울기오차이고, c는 z-축 방향 병진이동오차이다.

식 (11)을 적용하여 다양한 크기의 공통영역을 갖고, 측정 프로브 우연오차 성분과 함께 X-축과 Y-축 방향 회전오차 및 Z-축 방향 병진이동오차 성분을 포함하도록 준비된 데이터셋들로부터 추정 최소제곱평면이 산출되었다. 산출된 추정 X-축과 Y-축 방향 회전오차 및 Z-축 방향 병진이동오차 값들과 주어진 자세 및 병진이동오차의 차이 값으로 여러평면을 산출하였고, 이를 통해 교정량의 추정 불확도를 산출하였다.

본 연구에서는 모사실험에 의한 X-축과 Y-축 방향의 회전오차와 Z-축 방향 병진이동오차의 교정 정밀도의 평가를 위해, X-축과 Y-축 방향의 회전오차 교정량 추정 불확도  $U_a$ 와  $U_b$ , 그리고 Z-축 방향의 병진이동오차의 교정량 추정불확도  $U_c$ 를 직접 평가하는 대신, Fig. 8에 보이는 바와 같이, 두 최소제곱평면의 Z-축에 대한 편차  $e_z(x_i, y_j)$ 로 부터 추정되는 부정합 불확도  $U_z$ 를 산출하여 평가를 수행하였다. 교정량 추정불확도  $U_a$ ,  $U_b$  그리고  $U_c$ 는 서로 다른 성분의 오차 요소이지만, 이 오차 성분들은 최소제곱법에 의한 최소제곱평면의 산출에 의해 일괄적으로 결정되는 요소이다. 그러므로, 각각의 오차 성분들의 정확도도 중요하지만, 중첩된 데이터셋의 공통영역들로부터 산출된 두 최소제곱평면의 정밀한 정합을 위해서는 이 두 평면이 얼마나 정확하게 부합하는지의 평가지표가 되는  $U_z$ 가 더욱 효과적이다.

$P_r$ 과  $P_r$ 로부터 산출되는 두 최소제곱평면의 Z-축에 대한 편차  $e_z(x_i, y_j)$ 로 부터 산출된 정합된 데이터의 Z-축 방향의 부정합 불확도  $U_z$ 를 Fig. 8에 보인다.

최소제곱평면을 이용하는 X-축과 Y-축 방향의 회전오차와 Z-축 방향 병진이동오차의 교정을 위한 공통영역 크기는 정합 후의 정합오차가 측정기기의 Z-축 분해능 10 nm를 초과하지 않도록 결정된

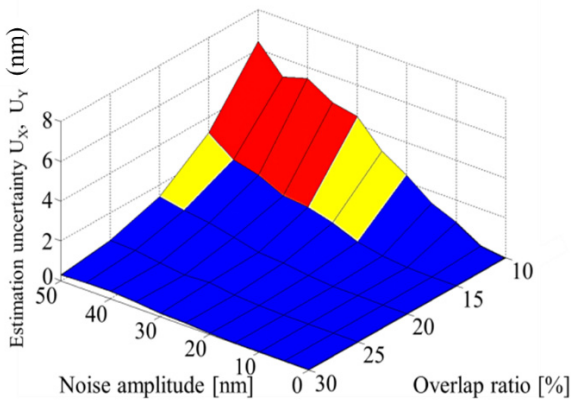


Fig. 7 Estimation uncertainty  $U_x$  and  $U_y$  of correction value  $e_x$  and  $e_y$

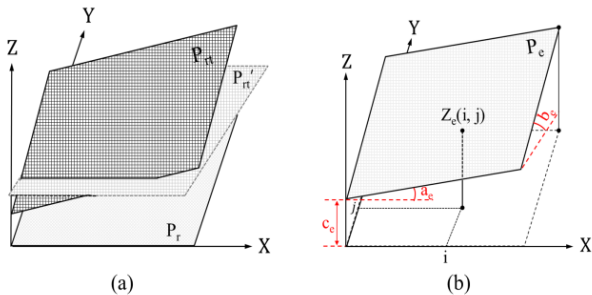


Fig. 8 Disconformity of the least squares fitted planes

다면 충분할 것이다. 한편, 본 논문에서 제안하고 있는 식 (4)로 표현되는 교정량 산출식은 앞서도 언급하였듯이, 다수의 단위 프로파일데이터셋으로 구성되는 측정결과의 정합에 의해 발생하게 되는 누적오차를 억제하는 기능을 갖고는 있으나, 완전히 누적에 의한 영향으로부터 자유롭다고는 할 수 없다. 따라서, 이런 경우까지 고려해야 하는 정밀 측정의 경우에는 이 조건보다 조금 더 보수적으로 측정을 해야 한다. 예를 들어,  $M \times N = MN$  ( $M < N$ )개의 순차적인 측정 데이터를 통해 정합을 하는 경우, 사각형의 전체 측정영역의 대각 방향으로 공통영역은  $N$ 개가 나타난다. 그 확률은 매우 작지만, 추정된 불확도가  $N$ 번 중복하여 나타날 때가 가장 큰 불확도를 가질 때이다. 즉, X-축과 Y-축 방향으로의 각 측정 데이터 개수 중 더 큰 측정 데이터의 개수를  $n_p$ 로 정의하면,  $U_Z$ 대신에 식 (12)로 표현되는  $U_{ZP}$ 를 사용하면 충분할 것이다.

$$U_{ZP} = n_p U_Z \quad (12)$$

#### 4. 제안된 5자유도 정밀 정합법을 위한 정합조건

이상의 결과로부터, 본 논문에서 제안하고 있는 5자유도의 정밀 정합법이 적용된 경우, 최종적인 교정 불확도를 Fig. 9에 보인다. 이 정합조건을 확인하기 위해, 10배율로  $1,250 \times 1,250 \mu\text{m}^2$ 의 영역을 측정한 데이터를 0.01 nm 단위로 스플라인 보간을 하고, 정규분포로 발생된 노이즈 성분을 추가하였다. 생성된 가상의 표준을 기반으로 위치 및 자세 오차가 유입된 상태의 단일영역 형상 데이터들을 추출하였다. 공통영역이 30%와 10%인 경우에 대해, 각각 5회 다른 위치에서 형상 데이터들을 추출하여서 모사실험을 수행하였다. 이때, 측정에 의한 우연오차를 추가로 유입하여, 측정 과정을 모사하였다. 그 결과를 Table 1에 보인다.

이 결과는 가상의 표준 데이터와 정합된 데이터의 RMS오차가

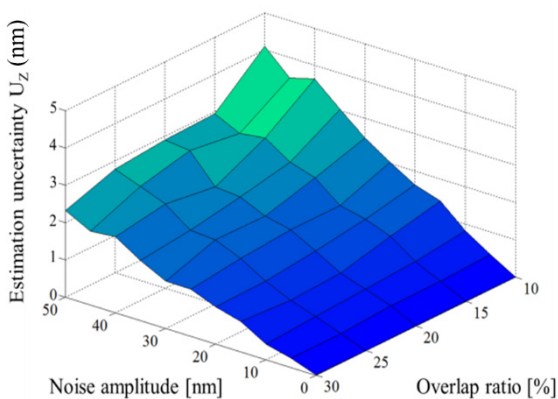


Fig. 9 Disconformity  $U_Z$  after stitching using the least squares fitted planes  $P_r$  and  $P_t$

Fig. 10으로부터 추정된 불확도와 근소한 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, RMS오차의 분포도 매우 작은 범위를 가지는 것을 알 수 있었다. 따라서 제안된 정합조건을 바탕으로 정합된 데이터의 불확도 추정이 가능함하고, 이를 바탕으로 정합을 위한 측정조건 설계가 가능함을 확인하였다. 따라서, 이제까지 발표된 정합관련 연구논문들이나 상용화된 측정장비에서 3자유도의 정합을 위해 채택되고 있는 30%의 공통영역비율에 비해, 본 논문에서 제안하고 있는 정합법을 사용할 경우에는 5자유도의 정밀정합을 수행하면서도 공통영역의 면적은 10% 정도로 충분하여 측정시간의 단축과 고속의 연산이 가능한 효율적인 정합의 가능성을 확인할 수 있다. 이 결과를 적용하여 성공적으로 정합이 수행되고 있는 사례들을 Fig. 11에 보인다.

Table 1 Simulation results on the overlap ratio and uncertainty

Overlap ratio	30%	10%
Number of measurements	$5 \times 5 = 25$	$4 \times 4 = 16$
Area of the stitched data	$(875 \times 875) \mu\text{m}$	$(900 \times 900) \mu\text{m}$
RMS error	7.21	9.04
(5 times)	0.10 nm	0.15 nm
Estimated uncertainty by Fig. 9	6.12 nm	8.45 nm

Stitched result ( $\mu\text{m}$ )

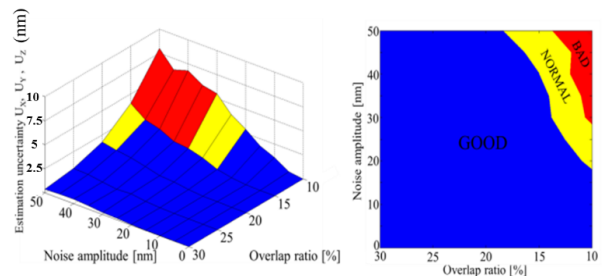
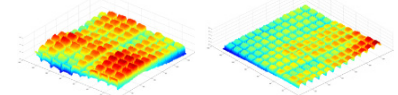
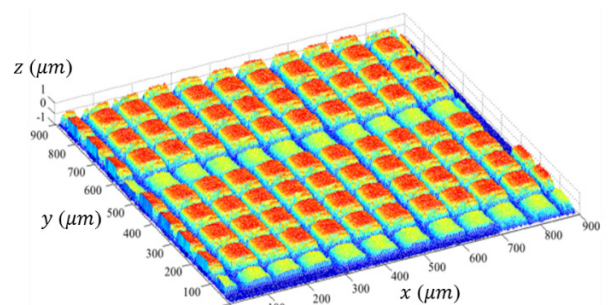
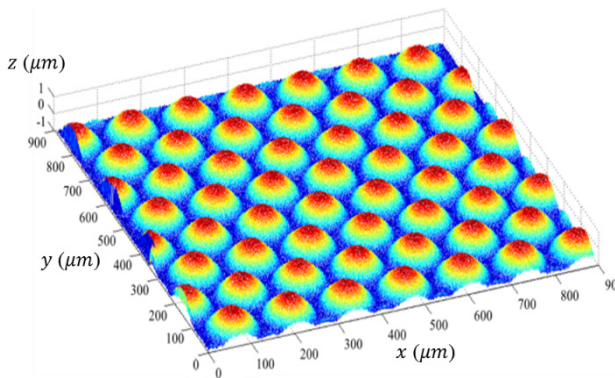


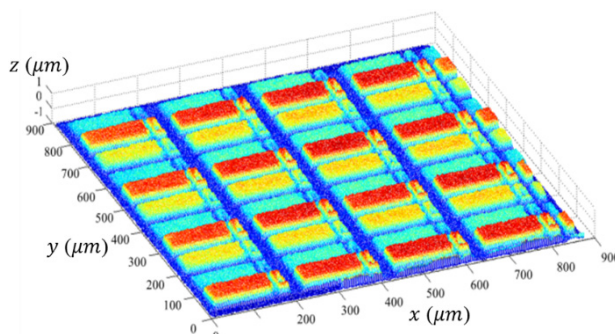
Fig. 10 5-DOF error estimation total result graph



(a) LCD ( $4 \times 4$ )



(b) Bump (4 × 4)



(c) PDP (4 × 4)

Fig. 11 stitched result using overlap ratio 10%

## 5. 결론

저가의 범용 구동장비를 사용하면서도 고정도의 대면적 측정이 가능하도록 X-축과 Y-축의 병진이동오차의 정밀 교정을 포함하여 5자유도의 자세와 병진이동오차 기능을 갖는 3차원 프로파일데이터의 정밀 정합법을 제안하였다. 또한, 제안된 정합법의 효율적인 운영과 적용을 위한 정합 정밀도 추정법과 그를 이용한 적용 기준을 제시하였다.

## 후기

이 연구는 지식경제부 기술혁신사업(첨단연구장비 경쟁력향상사업, 10038752)으로 지원된 연구임.

## References

[1] Kim, C. J., Wyant, J., 1981, Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface, J. Opt. Soc. America 71 1587.

[2] Thunen, J. G., Kwon, O. Y., 1982, Full aperture testing with subaperture test optics, Proc. SPIE 351:1 19-27.

[3] Chow, W. W., Lawrence, G. N., 1983, Method for subaperture testing interferogram reduction, Optics letters 8:9 468-470.

[4] Stuhlinger, T. W., 1986, Subaperture optical testing: experimental verification. In 1986 International Symposium/Innsbruck (International Society for Optics and Photonics), 350-359.

[5] Lee, D. H., Cho, N. G., 2012, Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer, Measurement Science and Technology 23:10 5601.

[6] Lee, D. H., 2013, 3-Dimensional profile distortion measured by stylus type surface profilometer, Measurement 46:1 803-814.

[7] Ahn, J. H., Lee, D. H., 2012, The comparison of stitching technology that use feature extract and least squares fitting, Proc. KSMTE spring conference 2012 132.

[8] Ahn, J. H., Lee, D. H., Kim, M. G., Baek, S. Y., Cho, N. G., 2012, Evaluation of 5 degrees of freedom stitching algorithm for high precision large surface texture, Proc. KSPE autumn conference 2012 2 631-632.

[9] Lee, D. H., Cho, N. G., 2012, The 3 d.o.f stitching method of 3 dimensional measured data for high precision and large measuring area, Proc. KSMTE spring conference 2012 254.

[10] Lee, D. H., Cho, N. G., 2012, Five degree of freedom stitching method and system of three dimensional profile data, KR patent: 10-2012-0077762.

[11] Lee, D. H., Cho, N. G., 2012, The 5-d.o.f. Stitching Method of Micro-surface Data for High Spatial Resolution, Proc. KSMTE spring conference 2012 254.

[12] Bray, M., 1997, Stitching interferometer for large plano optics using a standard interferometer, Optical Science, Engineering and Instrumentation '97, International Society for Optics and Photonics 39-50.

[13] Bray, M., 2004, Stitching interferometry: recent results and absolute calibration, In Optical Systems Design, International Society for Optics and Photonics 305-313.

[14] Yu, Y., Chen, M., 2002, Correlative stitching interferometer and its key techniques, International Symposium on Optical Science and Technology, International Society for Optics and Photonics 382-393.

[15] Lee, D. H., Cho, N. G., 2012, Spatial synchronized Algorithm for Lateral Resolution Differences Between Multi-Datasets, Proc. KSPE autumn conference 2012, 685-686.

[16] Lee, D. H., Ahn, J. H., Cho, N. G., 2011, Development of Optical Surface Profiler Sensor Fusion Algorithm, Proc. KSPE autumn conference 2011, 641-642.



- [17] Otsubo, M., Okada, K., 1992, Measurement of large plane surface shape with interferometric aperture synthesis, International Symposium on Optical Fabrication, Testing, and Surface Evaluation, International Society for Optics and Photonics 444-447.
- [18] Otsubo, M., Okada, K., 1994 Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms, Optical Engineering 33:2 608-613.
- [19] Burge, J., Su, P., 2008, Optical metrology for very large convex aspheres, SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation, International Society for Optics and Photonics 701818-701818-12.
- [20] Xu, Z., Li, S., 2009, Three-dimensional profile stitching based on the fiducial markers for microfluidic devices, Optics Communications 282:4 493-499.
- [21] Schmit, J., Wyant, J. C., 1998, Large field of view, high spatial resolution, surface measurements, International Journal of Machine Tools and Manufacture 38:5 691-698.
- [22] Ahn, J. H., 2013, A precision stitching method of 3-dimensional surface profile data, Master Thesis, Hanyang university, Republic of Korea.