

3 차원 형상측정에서 점 패턴매칭을 이용한 점 데이터의 결합방법

The Merging Method of Point Data with Point Pattern Matching in 3D Measurement

조택동*, 이호영, 양상민
(Taik-Dong Cho, Ho-Young Lee, and Sang-Min Yang)

Abstract : We propose a measuring method of large object using the pattern matching. It is hard and expensive to get the complete 3D data when the object is large and exceeds the limit of measuring devices. The large object is divided into several smaller areas and is scanned several times to get the data of all the pieces. These data are aligned to get the complete 3D data using the pattern matching method such as point pattern matching method and transform matrix algorithm. The laser slit beam and CCD camera are applied for the experimental measurement. Visual C++ on Windows 98 is implemented in processing the algorithm.

Keywords : pattern matching, point matching, 3D measurement, image processing, registration, CCD(charge coupled device)

I. 서론

3차원 측정 시스템은 물체 모델링, CAD/CAM, 멀티미디어, 가상 현실 그리고 검사시스템과 같은 여러 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 자유곡면의 형상의 경우에는 직접적인 모델링 방법보다 측정에 의하여 형상을 복원하는 방법을 많이 이용하고 있다. 또한 가공 자동화나 검사 시스템에 많이 이용되고 있다. 3차원 측정 시스템에는 프루브를 이용한 점 측정 방법, 레이저 슬릿빔을 이용한 측정 방법, 구조화된 빛(structured light)를 이용한 방법, 모아레 무늬를 이용한 측정 방법, 등 여러 가지가 있다[1-6]. 그러나 이러한 측정 시스템에서 측정한계를 벗어나는 큰 물체를 측정하기 위해서는 여러 번 나누어서 측정한 다음 하나로 합치는 측정 데이터의 레지스트레이션이 필요하게 된다. 기존의 연구로는 서로 대응되는 3쌍의 3차원 점, 평면, 구를 각각 이용한 방법[7], ICP(iterative closest point) 알고리즘을 이용한 방법[8-11]과 툴링볼을 이용한 연구[12]가 있다. 서로 다른 방향에서 측정된 데이터에서 대응되는 특징을 찾는 것은 매우 어려운 작업이며, ICP 알고리즘은 먼저 초기 값을 임의로 설정하고 이 위치를 반복적으로 줄여 나가면서 레지스트레이션을 수행하는 방법으로 잘 못된 초기값을 입력하는 경우에 레지스트레이션이 잘 못될 가능성이 있어[8] 대략적인 레지스트레이션 후에 좀 더 정확하게 레지스트레이션을 조정할 때 주로 사용하는 방법이다[9-11]. 툴링볼을 이용한 방법은 fixture를 구성할 수 있는 작은 물체에 대해서는 측정이 가능하고 정밀도를 향상시킬 수 있으나 큰 물체인 경우에는 fixture를 제작하기가 어려울 것으로 예상된다.

본 연구에서는 레이저 슬릿빔과 CCD 카메라를 이용하여 3차원 측정 시스템을 구성하고 측정 시스템의 정밀도를 향

상시키기 위한 영상처리 방법과 패턴 매칭을 이용한 레지스트레이션 방법을 제안한다. 제안한 방법은 측정하고자 하는 물체의 임의의 위치에 점 형태의 패턴을 입히고 이 패턴이 일정부분 겹치도록 나누어 측정한 다음 측정시 얻어지는 영상에서의 점의 위치와 측정된 데이터 간의 비교를 통하여 패턴 점들의 3차원 위치를 계산하고 이들 3차원 점 패턴을 패턴매칭 알고리즘을 이용하여 두 데이터 간의 변환행렬을 계산한 후 두 데이터를 하나로 합치는 방법이다. 툴링볼을 사용하는 것과 같은 특별한 fixture를 사용하지 않아도 되며 형상 자체로부터 대응되는 3차원 점들을 찾기 어려운 경우 손쉽게 적용될 수 있다. 또한 ICP알고리즘을 사용하는 경우보다 계산시간이 많이 걸리지 않으며, 대략적인 레지스트레이션 없이도 측정시 패턴만 추출하면 레지스트레이션이 가능하므로 수동으로 대응되는 부분을 결정해 주거나 겹치는 부분을 결정 해줄 필요가 없고 측정물체 셋업의 어려움과 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

II. 영상처리

1. 레이저 슬릿빔의 추출

레이저 슬릿빔이 카메라에 맺히는 위치를 이용하여 3차원 물체의 높이 값을 측정하는 방법이므로 영상에서 레이저 슬릿빔을 추출하여야 한다. 레이저 슬릿빔 중심위치의 정확도는 측정 데이터의 정밀도에 영향을 미치므로 정확한 위치를 찾는 것은 중요하다. 그리하여 본 논문에서는 개선된 영상처리 알고리즘을 제시하고 실험을 통하여 기존의 방법과 비교하여 보았다. 영상처리를 통하여 슬릿빔의 위치를 얻은 방법은 슬릿빔 영상을 이진화한 후 세선화 기법을 이용하여 중심선을 찾는 방법과 슬릿빔 영상 단면의 광강도를 가중치로 하여 중심선을 찾는 방법이 주로 사용되고 있다[3-6].

이진화를 통한 세선화 기법에서는 먼저 임계값(threshold value)을 가지고 영상을 이진화를 한 후에 잡음처리 알고리즘을 이용하여 슬릿빔외에 잡음을 제거한다. 그러면 그림 1(a)처럼 두께를 가지는 슬릿빔을 얻게 된다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 15., 채택확정 : 2003. 7. 1.

조택동, 이호영 : 충남대학교 기계설계공학과

(tdcho@cnu.ac.kr / hoyoung@cnu.ac.kr)

양상민 : 한밭대학교 기계공학과(s_smyang@cnu.ac.kr)



그림 1. 슬릿빔을 추출하는 절차:

(a) 이진화와 필터링, (b) 중심선

Fig. 1. The procedure of the extraction of the slit-beam:

(a) threshold & filtering, (b) mid-line

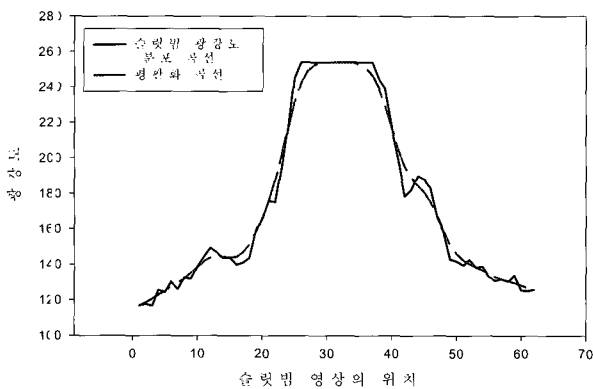


그림 2. 슬릿빔의 광강도 분포곡선 및 평활화 곡선.

Fig. 2. The intensity curve of the slit-beam and smoothing curve.

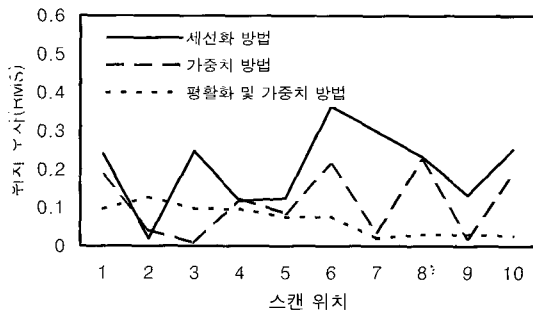


그림 3. 영상처리 기법에 따른 측정 오차.

Fig. 3. The measurement error according to the image processing methods.

그림 1(b)은 세선화 기법을 이용하여 슬릿빔의 중심선을 추출한 것을 보여준다.

광강도를 가중치로 하여 중심선을 찾는 방법은 식(1)에 의하여 구하게 된다. 여기서 y_c 는 중심선의 위치이며, y_i 는 슬릿빔 영상에서 슬릿빔의 위치이고 $I(y_i)$ 는 그때의 광강도 값이다.

$$y_c = \frac{\sum y_i \cdot I(y_i)}{\sum I(y_i)} \quad (1)$$

본 논문에서 제시한 방법은 슬릿빔 영상의 단면을 평활화한 후 가중치 방법을 이용하여 중심선을 측정하는 방법이다. CCD픽셀의 한 픽셀단위로 슬릿빔의 위치를 판단할 경우에

슬릿빔에서 가장 밝은 위치는 변하지 않더라도 슬릿빔의 이동에 따라 인접한 픽셀들의 광강도는 변하므로 이를 고려하여 높이 변화가 작은 경우에 분해능을 향상시킬 수 있으며 슬릿빔 단면의 광강도 분포는 가우시안 분포 형태로 나타나게 된다[2]. 슬릿빔이 맺히는 물체의 단면 곡률에 따라 분포 곡선의 모양의 변형이 일어나게 되지만 슬릿빔 단면은 곡선 형태로 나타나게 된다. 이러한 곡선 형태로 근사하기 위하여 평활화 방법을 이용하여 단면 곡선의 꼭지점을 찾아 좀 더 정확하게 슬릿빔의 중심 위치를 찾는다. 슬릿빔 영상의 광강도 분포는 그림 2와 같이 나타나며, 이 분포 곡선을 평활화한 후 이 곡선의 꼭지점 위치와 광강도 분포 곡선에서 가중치법을 이용하여 구한 중심점과의 평균으로 슬릿빔의 중심 위치를 결정한다. 그림 3은 높이를 알고 있는 기울어진 시편을 3가지 영상처리 방법을 이용하여 3차원 높이를 측정하여 얻어진 값과 실제 위치와의 RMS오차를 나타낸 그래프이다. RMS오차는 같은 시편에 대하여 10번을 반복 측정하여 계산하였다. 세선화 방법 보다 가중치 방법이 오차가 좀 적으며 평활화와 가중치법을 혼용한 방법이 가중치법 보다 좀 더 결과가 나은 것을 볼 수 있다.

2. 패턴 점들의 추출

큰 물체 또는 물체의 전면을 모두 측정하기 위해서는 물체를 여러 부분으로 나누어서 측정한 다음에 이를 하나의 데이터로 합성하는 방법을 이용하게 된다. 그러기 위해서는 먼저 각각의 부분을 측정할 때 측정 물체에 표시되어 있는 점 패턴을 추출하여 그 위치에 대한 정보를 가지고 있어야 한다. 점 패턴은 그림 4와 같이 물체에 입혀지게 되며 이러한 점들은 형상을 측정하는 동안에 영상처리를 통하여 추출하게 된다. 패턴 점들은 파란색으로 하였으며 어두운 영역이므로 낮은 임계값(약 60이하)을 가지고 이진화를 수행하면 패턴의 점들의 위치 외에 그림자 영역과 어두운 영역에 대한 영상이 추출된다. 이러한 부분을 제외한 패턴 점만을 추출하기 위하여 칼라영상의 RGB색 정보를 이용하여 다른 색에 비해 파란색의 강도가 높은 부분을 추출하면 영상 위에서의 패턴 점들의 위치를 찾아낼 수 있다. 패턴 점의 영상에서 위치의 계산은 패턴 점의 픽셀들을 질량 중심 계산법에 의하여 1/4픽셀단위로 추출하게 된다.

III. 패턴 매칭 및 변환 행렬

측정 물체 위에 있는 패턴 점들의 위치 정보를 이용하여 측정 데이터에서 그 위치에 대응되는 3차원 위치를 먼저 얻어낸다. 3차원 위치는 측정 데이터에서 스캔 방향에 수직한 방향으로 인접한 2개의 점을 추출하여 일차 보간법에 의하여 추정하게 된다. 여기서 얻어낸 3차원 점들에 대한 정보는 무작위로 얻어낸 정보이므로, 패턴 매칭 알고리즘을 통하여 서로 나누어 측정된 데이터의 패턴 점들에 대해 서로 대응되는 점들만을 추출하여, 3차원 변환행렬을 구하고 이 변환행렬을 이용하여 두 데이터간의 결합을 수행하게 된다.

1. 패턴 매칭을 이용한 매칭 점 찾기

측정 데이터 상의 패턴 점들에 대한 3차원 위치 정보 중에서 첫 번째 측정된 데이터에서 패턴 점들의 집합을 A라하고, 두 번째 측정된 데이터의 패턴 점들의 집합을 B라 하면,

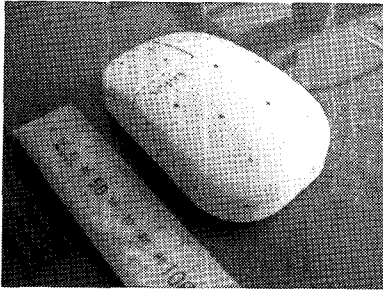


그림 4. 물체 위의 패턴 점들.
Fig. 4. Pattern points on the object.

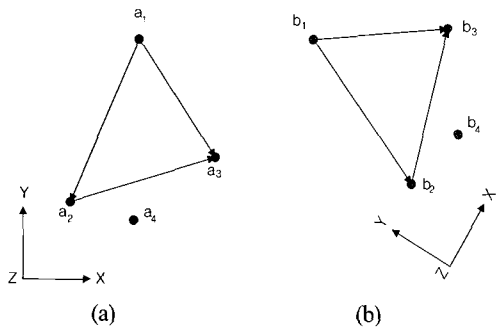


그림 5. 특징점들간의 위치관계: (a) 첫 번째 특징점들, (b) 두 번째 특징점들.
Fig. 5. The location relation of the feature points: (a) first feature points, (b) second feature points.

두 번째 측정된 데이터의 패턴 점들의 집합을 B라 하면, 첫 번째 측정에서 m개의 패턴 특징점에 대해 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 두 번째 측정에서는 n개의 패턴 특징점에 대해 $B=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 과 같이 정의 된다.

이들 패턴 특징점들은 임의의 순서로 추출되었고 또한 측정 영역이 일부는 서로 다르므로 변환 행렬을 구하는데 사용하기 위해서는 서로 대응되는 점들의 쌍을 찾아야 한다. 서로 대응되는 특징점들간의 특성을 살펴보면 그림 3에서 보는 것처럼 서로 매칭이 되는 3차원 점들은 회전 또는 이동변환 후에도 서로간의 거리가 같고 벡터의 방향이 일치하게 된다. 이러한 특징을 이용하여 매칭되는 점을 찾는다. 그림 5에서 특징점 a_i 는 b_i 와 서로 매칭 관계이다($i=1,2,3,4$).

서로 대응되는 특징점들의 쌍을 찾기 위해서 각각의 집합에서 3개의 점들을 추출하여 두 점간의 거리를 구하는 방법을 이용하여 3개의 거리에 대한 정보를 계산하고 두 점간의 방향을 단위벡터로 계산하여 첫 번째와 두 번째 특징점들 각각에서 계산된 3쌍의 거리와 3쌍의 단위벡터에 대한 오차가 오차범위 안에 들어오면 각각의 세 점들은 서로 대응되는 점들로 인식된다. 대응되는 점들로 인식된 경우에는 대응되는 위치의 $M[m \times n]$ 행렬 값을 1씩 증가시킨다. 모든 점들에 대하여 순서대로 모두 적용한 다음 M매핑 행렬의 값을 조사하여 일정수 이상의 대응관계가 이루어진 점들을 모아서 매칭 점들의 쌍을 생성한다. 매칭되는 특징점들의 쌍을 찾는 알고리즘은 그림 6과 같다. 각각의 두 개의 패턴점 집합에서 순서에

```

1. for i=0, ..., m-2, do
  for j=i+1, ..., m-1, do
    for k=j+1, ..., m, do
      calculate distance & direction of A; i,j,k
      for p=0, ..., n-2, do
        for q=p+1, ..., n-1, do
          for r=q+1, ..., n, do
            calculate distance & direction of B; p,q,r
            if ( distance condition < margin distance &
                direction condition < margin direction )
              accumulate M matrix of each pair
2. for i=0, ..., m, do
  for p=0, ..., n, do
    if (M[i,p] > threshold number)
      a_i & b_p : taken as matching pair
    
```

그림 6. 대응되는 매칭 점들의 쌍 결정 알고리즘.
Fig. 6. The algorithm for finding the matching pairs.

상관없이 3개의 점을 추출하는 방법의 수만큼 계산을 반복하게 되므로 조합으로 나타낼 수 있으며 알고리즘의 복잡도는 $mC_3 \times nC_3$ 가 된다.

2. 변환 행렬 및 데이터 결합

위에서 구한 패턴 특징점들의 매칭쌍을 이용하여 데이터간의 변환 행렬을 구한다. 매칭에 의해 구해진 특징점들의 쌍 중에서 A집합에서 찾아진 매칭점을 P_{ai} 라 하고 B집합에서 찾아진 매칭점을 P_{bi} 라 하면 일반적으로 3차원 변환 행렬은 다음의 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 H는 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 찾아진 특징점들의 쌍을 이용하여 H 행렬의 인자들을 찾고 H 행렬을 이용하여 측정된 데이터들을 결합하면 된다.

$$P_{ai} = H \cdot P_{bi} \tag{2}$$

$$H = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 $P_{ai}=[x_{ai}, y_{ai}, z_{ai}, 1]^T$, $P_{bi}=[x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}, 1]^T$, R은 회전변환 행렬이며 T는 이동변환 행렬을 의미한다.

H행렬을 구하기 위하여 (2)를 (4)와 같이 오차식(E_i)으로 놓고 구하고자 하는 H 행렬의 인자들을 (5)처럼 H_r 행렬로 하고,

$$E_i = H \cdot P_{bi} - P_{ai} \tag{4}$$

$$H_r = [h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{14}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{24}, h_{31}, h_{32}, h_{33}, h_{34}]^T \tag{5}$$

(4)를 재구성하면 다음과 같은 (6)을 얻을 수 있다.

$$E_i = C_i \cdot H_r - P_{ai}' \tag{6}$$

여기서

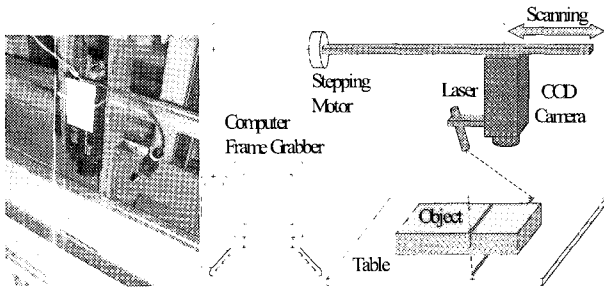


그림 7. 시스템의 개략도 및 사진.
Fig. 7. The diagram and photograph of the system.

$$C_i = \begin{bmatrix} x_{bi} & y_{bi} & z_{bi} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{bi} & y_{bi} & z_{bi} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{bi} & y_{bi} & z_{bi} & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{ci}' = [x_{ai} \quad y_{ai} \quad z_{ai}]^T$$

가 된다.

시로 대응되는 매칭 쌍의 수를 k개라고 하고 이를 정리하면 (7)을 얻을 수 있으며[9], 이 식을 최소자승 근사법(least square estimation)을 이용하여 H_r 행렬의 값을 구하였다. 이 식에서 살펴보면 $k \geq 4$ 인 경우에 $\text{rank}(C) = 12$ 가 되므로 H_r 행렬을 계산하여 최종적으로 H 행렬을 구할 수 있게 된다.

$$E = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 H_r - P_{a1}' \\ C_2 H_r - P_{a2}' \\ \vdots \\ C_k H_r - P_{ak}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_k \end{pmatrix} H_r - \begin{pmatrix} P_{a1}' \\ P_{a2}' \\ \vdots \\ P_{ak}' \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$= C \cdot H_r - P_a'$$

IV. 실험 및 결과

1. 시스템의 구성

시스템의 측정부는 레이저 슬릿빔과 CCD 카메라를 이용하여 영상을 측정하는 부분이며 구동부는 스텝핑 모터를 이용하여 레이저와 카메라를 이동시키면서 물체를 측정하는 부분이다. 그림 7은 시스템의 개략적인 구성도를 보여준다. 구성한 시스템의 측정범위는 $130 \times 70 \times 100(\text{mm}^3)$ 이고 CCD 카메라에서는 640×480 의 칼라영상을 얻을 수 있다. 그림 8은 측정화면을 보여준다. 정확한 형상측정과 패턴 점의 추출을 위하여 카메라 보정작업을 수행하였으며, 3차원 정보를 알고있는 여러 개의 시편을 이용하여 보정작업을 하였다[2].

2. 형상측정

그림 4와 같은 마우스를 측정실험에 사용하였다. 마우스 형상은 모두 여섯 부분으로 나누어 측정을 수행하였으며 측정 데이터의 결합을 위하여 측정 부분의 일부분이 겹쳐지도록 조정하였다. 그림 9는 여섯 부분 중 윗부분과 오른쪽 측면 부분을 측정정한 형상을 보여 준다. 측정 형상 위에 나타난 숫자는 측정시 얻어진 패턴 점들의 위치와 찾아진 순서를 나타낸다.

3. 패턴매칭 및 변환행렬

마우스의 윗 부분의 측정에 있어서 패턴의 특징점들은 총 13개를 얻었으며 오른쪽 측면 부분의 측정에서는 11개의 특징점들을 얻었다. 여기서 실제 서로 매칭되는 점들은 그림 9에서 보는 것처럼 6개의 매칭 특징점들의 쌍을 얻을 수 있다. 표 1은 패턴매칭을 수행하여 얻어진 특징점들의 매칭 쌍을 정리한 것이다. 여기서 구해진 특징점들의 매칭 쌍을 가지고 최소자승 근사법으로 구해진 변환행렬은 (8)과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} 0.6996 & -0.0754 & 0.6871 & -1.0291 \\ 0.0329 & 0.9998 & 0.0345 & 3.5783 \\ -0.7054 & -0.0104 & 0.6562 & -17.8886 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

표 1. 패턴 특징점들의 매칭 관계.

Table 1. The matching pair of feature points.

번호	각 데이터에서 특징점의 번호	
	첫 번째	두 번째
1	0	0
2	1	1
3	4	3
4	6	8
5	9	7
6	11	10

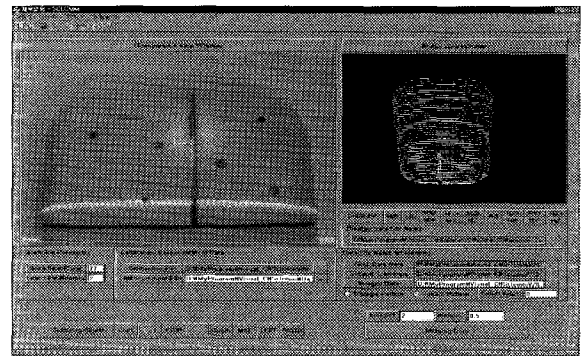


그림 8. 측정 화면.
Fig. 8. The main window for measurement.

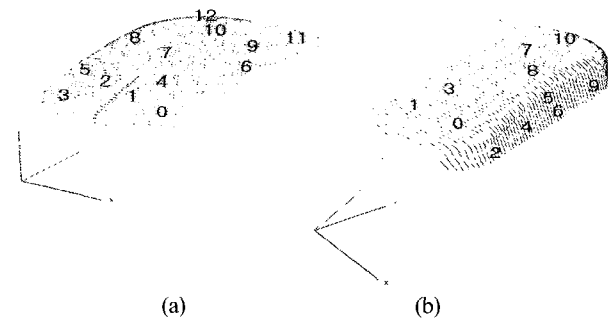


그림 9. 마우스 측정 데이터: (a) 윗 부분 (b) 오른쪽 측면부분.
Fig. 9. The measuring data of the mouse: (a) upper part, (b) right side part.

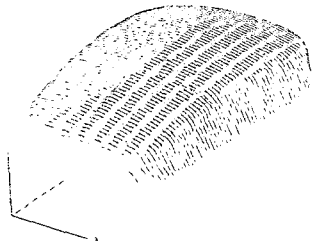


그림 10. 위쪽과 오른쪽 측면부 데이터의 결합.
Fig. 10. The merged data of the upper and right side part.

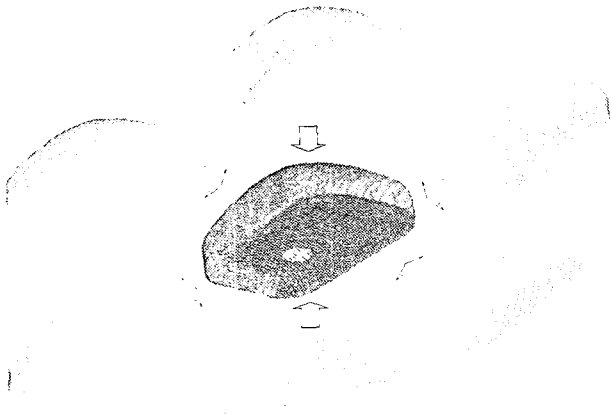


그림 11. 마우스 데이터의 결합.
Fig. 11. The merged data of the mouse.

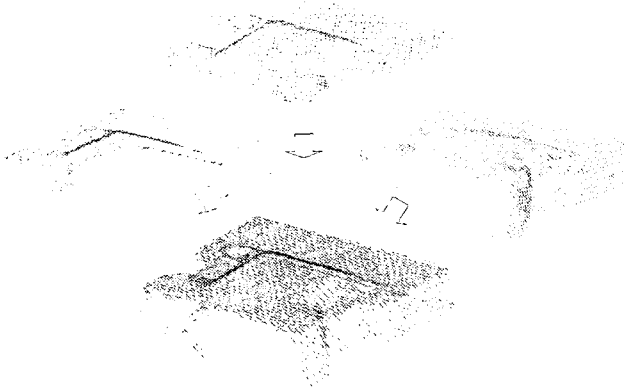


그림 12. 커넥터 데이터의 결합.
Fig. 12. The merged data of the connector.

4. 데이터 결합

위에서 구해진 변환행렬(H)를 이용하여 두 데이터의 결합을 수행한 결과 다음의 그림 10처럼 결과가 나오는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 위와 같은 방법으로 측정된 6개의 면에 대한 데이터를 모두 결합한 결과를 보여주며 결합된 데이터에 계속적으로 데이터를 합쳐 나가면 최종적인 형상이 이루어지게 된다. 그림 12는 커넥터 형상에 대한 측정 및 결합 결과를 보여준다.

V. 결론

레이저 슬릿빔과 CCD 카메라를 사용한 측정 시스템에서 발생할 수 있는 오차 중 영상에 맺히는 레이저 슬릿빔의 오차가 실제 측정 데이터의 오차에 미치는 것을 살펴보면, 레이저 슬릿빔의 위치 오차는 측정 데이터의 모든 좌표축에 대하여 오차를 발생 시킨다. 그러므로 레이저 슬릿빔의 위치를 정확하게 추출하는 것은 측정 정밀도를 향상시키는데 중요한 사항이다. 그리하여 본 논문에서는 슬릿빔의 중심 위치를 찾는 방법 중 많이 사용되고 있는 두 가지 방법에 대하여 살펴보고 슬릿빔의 광각도 분포의 평활화와 가중치법을 혼용하는 방법과 비교하여 좀 더 정확하게 슬릿빔의 위치를 찾을 수 있었다.

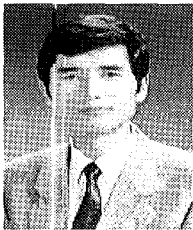
레이저 슬릿빔과 CCD 카메라를 이용하여 측정 시스템을 구성하고 Windows 98 상에서 Visual C++을 이용하여 측정 알고리즘과 레지스트레이션 알고리즘을 구현하여 마우스에 패턴 점을 입히고 이 패턴 점들을 추출하여 패턴 매칭이 이용할 수 있었으며 패턴 점들과 레이저 슬릿빔과의 간섭이 적어 패턴 점들 위에서도 데이터의 측정이 가능하였다. 추출된 패턴 점들을 패턴 매칭을 통하여 서로 대응되는 매칭 점들의 쌍을 구할 수 있으며 이를 이용하여 두 데이터 간의 변환 행렬을 구한 후 측정 데이터의 결합을 수행하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 점 패턴을 이용함으로써 복잡한 셋업의 작업이나 특정한 fixture의 사용을 하지 않고도 측정 데이터의 레지스트레이션을 할 수 있으며 자유곡면과 같은 경우 서로 대응되는 특징점을 찾기가 쉽지 않은 단점을 보완할 수 있다. 제안된 레지스트레이션 방법으로 실제 측정실현을 한 결과 데이터의 레지스트레이션에 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

향후 연구과제로는 슬릿빔의 위치 정밀도를 좀 더 향상시킬 수 있는 영상처리 알고리즘에 대한 연구와 패턴 영상의 특징점을 좀 더 정확하게 추출해내는 방법에 대한 연구가 필요하며 측정된 후 결합된 데이터는 순서가 일정하지 않은 아주 많은 양의 점 데이터들로 구성되어 있으므로 측정된 데이터를 CAD 모델로 변환하기 위해서는 데이터를 적절하게 줄여주는 알고리즘에 대한 연구가 필요하리라 사료된다.

참고문헌

- [1] C-F. Lin and C-Y. Lin, "A New approach to high precision 3-D measuring system", *Image and Vision Computing*, vol. 7, pp. 805-814, 1999.
- [2] 박현구, "슬릿광을 이용한 3차원 자유곡면 형상의 비접촉식 자동측정 및 검사" 한국과학기술원, 박사학위 논문, 1994.
- [3] 주병권, "3차원 비접촉 측정 및 자유곡면 모델링", 충남대학교, 석사학위 논문, 1999.
- [4] D. D. Harrison and M. P. Weir, "High-Speed Triangulation-Based 3-D Imaging with Orthonormal Data Projections and Error Detection" *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 4, pp. 409-416, 1990.
- [5] Y. Sato, H. Kitagawa and H. Fujita, "Shape Measurement of Curved Objects Using Multiple Slit-Ray Projections" *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.

- FAMI-4, no. 6, pp. 641-646, 1982.
- [6] W.-Y. Kim, "Range Data Analysis using Cross-stripe Structured-light System" *SPIE Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision V*, vol. 1385, pp. 216-218, 1990.
- [7] J. Y. Lai, W. D. Ueung and C. Y. Tao, "Registration and Data Merging for Multiple Sets of Scan Data", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 15, pp. 54-63, 1999.
- [8] F. J. Besl and N. D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.
- [9] C. Dorai, G. Wang, A. K. Jain and C. Mercer, "Registration and integration of Multiple Object Views for 3D Model Construction", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 1, pp. 83-89, 1998.
- [10] A. E. Jhonson, S. B. Kang, "Registration and integration of textured 3D data", *Image and Vision Computing*, vol. 17, pp. 135-147, 1999.
- [11] H. T. Yau, C. Y. Chen and R. G. Wilhelm, "Registration and integration of multiple laser scanned data for reverse engineering of complex 3D models", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 269-285, 2000.
- [12] 김용환, 윤정호, 이관행, "튠링볼을 이용한 레지스트레이션 방법 개발", *한국 CAD/CAM 학회지 논문집*, vol. 4, no. 1, pp. 60-68, 1999.
- [13] S.-H. Chang, F.-H. Cheng, W.-H. Hsu, G.-Z. Wu, "Fast Algorithm for Point Pattern Matching: Invariant to Translations, Rotations and Scale Changes", *Pattern Recognition*, vol. 30, no. 2, pp. 311-320, 1997.



조택동

1952년 7월 8일생. 1974년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1980년 서울대학교 기계공학과(공학석사). 1983년~1988년 Univ. of Michigan, Ann Arbor 수료. 현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 관심분야는 용접제어, 신호처리, 진동제어.



이호영

1973년 10월 24일생. 1996년 충남대학교 기계설계공학과(공학사). 1998년 충남대학교 기계설계공학과(공학석사). 1999년~현재 충남대학교 기계설계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 영상처리, 로봇비전, 시스템 자동화.



양상민

1966년 8월 28일생. 1992년 충남대학교 기계공학과(공학사). 1994년 충남대학교 기계설계공학과(공학석사). 2001년 충남대학교 기계설계공학과(공학박사). 2001년 3월~2003년 2월 한밭대학교 기계공학과 겸임교수. 2002년 7월~현재 (주)한

빛퍼워서비스 기술연구소 선임연구원. 관심분야는 용접자동화, 세척 및 제어.