

## 3 축 전동테이블을 이용한 레이저 스캐너의 측정 및 레지스트레이션 자동화

손석배\* · 김승만\*\* · 이관행\*\*\*

### Automation of laser scanning and registration of measured data using a 3-axis motorized stage

Seok-Bae Son\*, Seung-Man Kim\*\* and Kwan-Heng Lee\*\*\*

**Key Words :** Reverse Engineering (전산 역설계), Automated Inspection (자동 검사), Laser Scanner (레이저 스캐너), Optimal Scan Plan (최적 측정계획), Motorized Stage(전동테이블)

#### Abstract

Laser scanners are widely used for reverse engineering and inspection of freeform parts in industry such as motors, electronic products, dies and molds. Due to the lack of measuring software and positioning device, the laser scanning processes have been erroneous and inconsistent. In order to automate measuring processes, an automated scan plan generation software and a proprietary hardware are developed.

In this paper, an automated laser scanning system using a 3-axis motorized stage is proposed. In the scan planning step, scan directions, paths, and the number of scans are generated considering optical and mechanical parameters. In the scanning step, the generated scan plan is downloaded into the laser scanner and the motorized stage and the points on the surface are captured automatically. Finally, the point data set is analyzed to evaluate the performance of the system.

#### 1. 서 론

최근 자동차, 항공, 가전, 컴퓨터 그래픽등 다양한 분야에서 심미적인 곡면의 사용이 늘어나고 있다. 이는 고객의 욕구를 만족시키고 공학적인 특성을 향상시키려는 노력에서 비롯되며, 이러한 파트를 생산하는데 있어서 전산 역설계(reverse engineering) 기술은 핵심적인 역할을 수행하고 있다.<sup>(1-3)</sup> 전산 역설계 기술을 기반으로 하는 설계나 검사에서는 기존의 프로세스와 달리 실제로 프로토타입을 제작한 다음에 측정을 통하여 곡면의 데이터를 획득하고 이를 이용하여 최종 CAD 모델을 생성하게 된다. 여기에서 파트의 형상 정보를 얻는 과정이 중요한데, 이를 위해서는 다양한 중

류의 측정기가 사용되고 있다.

현재 산업현장에서 사용되는 대표적인 측정장비로는 CMM(Coordinate Measuring Machine)과 3 차원 레이저 스캐너가 있다. 접촉식 측정기인 CMM은 정밀도는 우수하나 측정 속도가 느린 단점이 있어 주로 측정점의 수가 많이 요구되지 않는 특징형상의 측정에 많이 이용되고 있다. 반면에, 비접촉식 측정기인 레이저 스캐너는 상대적으로 정밀도가 조금 낮지만 한꺼번에 많은 점데이터를 얻을 수 있으므로 자유곡면의 측정에 유리하다.<sup>(1-3)</sup>

레이저 스캐너를 이용하여 측정 작업을 수행하기 위해서는 측정깊이(depth of field), 가림현상(occlusion), 측정각(view angle), 측정폭(field of view) 등의 광학적인 제약조건과 측정방향 및 경로에 따라서 측정 데이터의 품질이 달라진다. 하지만 자유 곡면의 측정에 있어서 작업자가 직관적으로 이러한 파라미터를 결정하여 수동으로 측정을 수행하므로, 측정 데이터의 품질에 대한 일관성이 결여될 뿐만 아니라 작업시간 및 비용의 낭비가 초

\* 광주과학기술원 대학원 기전공학과

\*\* 광주과학기술원 대학원 기전공학과

\*\*\* 광주과학기술원 기전공학과

래된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 레이저 스캐너 및 파트의 특성을 동시에 고려하여 측정계획을 자동으로 수립할 수 있는 알고리즘이 필요하고, 실시간으로 파트의 위치를 변경할 수 있는 하드웨어 시스템도 요구된다.

본 연구에서는 3 축 전동식 로터리 테이블을 이용한 자동 레이저 스캐닝 시스템을 개발하였고, 이는 최적 측정계획 생성 모듈과 자동 위치 결정 시스템으로 구성된다. 측정 계획 생성 모듈에서는 파트의 형상, 전동 로터리 테이블 정보, 측정기의 파라미터들로부터 최적의 측정 방향, 측정 회수, 측정 경로를 생성하게 된다. 여기에서 생성된 측정 계획은 좌표변환을 거친 후 3 축 전동식 로터리 테이블과 컨트롤러로 구성되는 위치 결정 시스템과 레이저 스캐너에 다운로드 되어 측정작업을 수행하게 된다. 최종적으로 얻어진 곡면의 점데이터와 CAD 모델과의 비교를 통해서 시스템의 정밀도와 활용성을 보였다.

## 2. 3 차원 측정시스템

### 2.1 3 차원 레이저 스캐닝

본 연구에서 사용되는 3 차원 레이저 스캐닝 시스템의 개략도를 Fig. 1 에 보였다. 레이저 프로브는 3 축 CNC 로 구동되며, 15mm 길이의 레이저 스트라이프를 물체에 비추어 이를 두개의 CCD 카메라로 이미지를 획득한 다음 삼각법을 이용하여 Z 축의 좌표를 계산하게 된다. 파트의 형상정보를 정확하게 읽기 위해서는 몇 가지 조건을 만족하여야 한다. 우선 측정될 점이 측정깊이 내에 들어가야 하고, 측정점에서 곡면의 법선벡터와 측정방향과 이루는 각이 일정값 이하여야 한다. 마지막으로 레이저가 물체에 가리는 가림현상이 없어야 하며, 파트의 표면에서 빛이 심하게 난반사 되거나 투과되지 않아야 한다.<sup>(4,5,6,7,8,11)</sup>

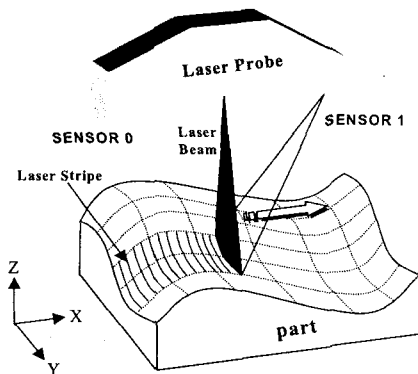


Fig. 1 Laser Scanning Mechanism

### 2.2 전체 시스템 흐름도

전체 시스템의 흐름도를 Fig. 2 에 보였다. 본 연구에서는 측정하고자 하는 파트의 CAD 모델은 존재한다고 가정하였다.<sup>(4,5)</sup>

먼저 자유곡면의 CAD 모델을 입력 받은 다음에 장비 파라미터, 곡면 형상, 위치 결정 시스템의 정보를 이용하여 측정 회수, 측정 방향, 측정 경로를 생성한다. 생성된 측정방향과 경로에 따라서 로터리 테이블의 위치와 각 축의 회전각을 결정한다. 파트를 정확하게 테이블 위에 위치시키기 위해서는 고정구가 사용되며, 자동 측정을 위해서 측정기의 좌표계와 로터리 테이블의 좌표계간의 연관관계도 정확하게 구하여야 한다.

이와 같이 파트 및 로터리 테이블의 셋업이 끝난 다음에는 앞서 설명한 측정장비와 로터리 테이블간의 연관관계에 따라서 측정 계획을 장비 좌표계에 맞도록 변환한 후에 레이저 스캐너에 다운로드하여 실제 측정작업을 수행한다. 측정회수가 2 회 이상인 경우에는 최초 측정 후 다시 로터리 테이블을 회전시켜 파트의 위치를 변경한 후 측정작업을 수행하게 된다.

최종적으로 측정이 종료된 다음에는 여러 방향으로 측정된 점데이터를 하나의 좌표계로 일치시키는 레지스트레이션 작업이 수행되며, 이는 측정 계획 생성 모듈에서 구한 측정방향 정보를 이용하여 자동으로 이루어진다. 그리고 제안된 방법으로 측정된 점데이터가 충분한 정밀도를 가지고 있는지를 확인하기 위해서, 측정 데이터를 CAD 모델과 비교하였다.

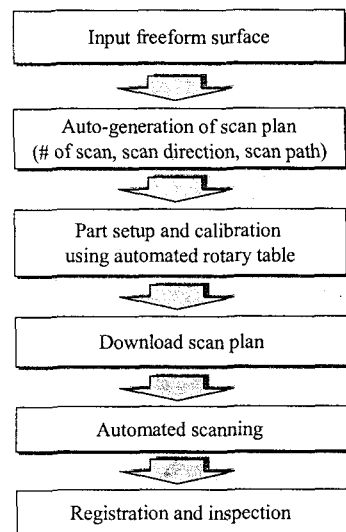


Fig. 2 Flowchart for Overall System

### 3. 측정 계획 자동 생성

#### 3.1 측정 계획 생성 모듈의 흐름도

측정 계획 생성 모듈의 흐름도를 Fig. 3 에 보았다. 이 모듈에서는 최적의 측정방향, 측정회수, 측정경로를 생성한다. 각 과정에 대한 자세한 내용은 다음절에 설명하였다.

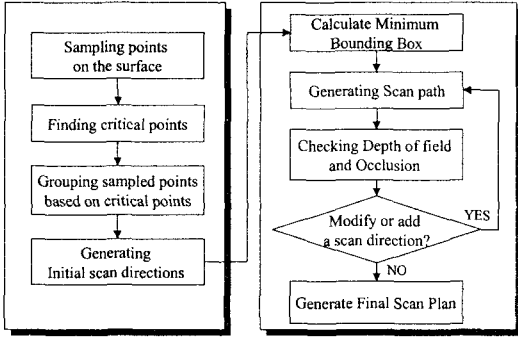


Fig. 3 Scan Plan Generation Module

#### 3.2 최적 측정계획 생성 모듈

##### 3.2.1 곡면상의 점 샘플링

자유곡면의 모델링을 위해서는 베지어 곡면을 이용하였다. 파라미터 도메인상에서  $u, v$  방향을 따라서 각각 21 점씩 모두 441 점을 샘플링하였고, 곡면상의 수직선은 법선벡터를 나타낸다(Fig. 4). 이들 점들은 주변 영역들을 대표하며, 점간의 길이는 레이저 스트라이프의 길이보다 충분히 작게 설정하였다. 그러므로 이 점들이 모두 측정가능하면 곡면이 모두 측정된다고 가정하였다.

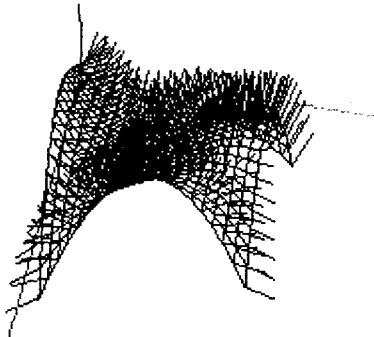


Fig. 4 Point Sampling on Surface

##### 3.2.2 특징점(Critical point) 찾기 및 그룹화

레이저 스캐너의 광학적인 제약조건 가운데 측정각은 곡면의 법선벡터와 레이저와의 각을 나타내며, 정해진 각보다 크면 대상점을 측정할 수 없다. 그러므로 곡면상의 샘플링 점들의 법선벡터들간의 사이각을 구하여 80 도 이상이 되면 두 점을 특징

점이라고 하였다. 이러한 점들은 한 방향에서 동시에 측정될 수 없다는 것을 의미한다. Fig. 5(a)에서 보듯이 우선 특징점을 찾은 다음에 측정각을 기준으로 특징점들을 Fig. 5(b)와 같이 그룹화 한다.

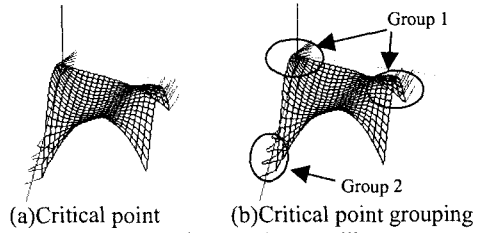


Fig. 5 Critical Point Handling

##### 3.2.3 초기 측정 방향 결정 및 측정경로 생성

초기 측정방향은 앞 절에서 생성된 특징점 그룹(critical point group)기반으로 만들어진다. 측정방향은 각 특징점 그룹내의 각 점에서 측정각안에 속하는 모든 점을 찾은 다음 법선벡터의 전체 평균을 구함으로써 얻어진다(식 1, Fig. 6).

$$\text{Initial Scan Direction } ISD_i = \frac{\sum_{j=1}^n D_j}{n_i} \quad (1)$$

여기에서  $D_j$  는 각 샘플링점에서의 단위 법선벡터이고,  $n_i$  는 각 그룹의 영역  $i$  에서의 점의 수를 나타낸다.

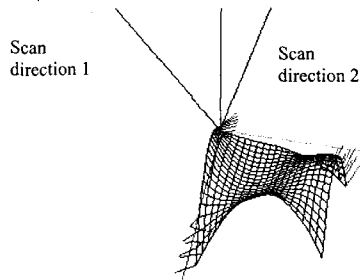


Fig. 6 Generation of Scan Direction

측정경로는 위에서 생성된 측정 방향별로 생성된다. 먼저 하나의 측정방향에 해당되는 샘플링점들을 2 차원 평면상에 투영하여, 점들을 둘러싸는 사각형 바운딩이 최소가 되도록 한다(Fig. 7). 다음에는 사각형의 장변에 대해서 Y 축 방향으로 레이저 스트라이프의 길이만큼 나누어서 여러 개의 직사각형을 만든다. 그리고 각각의 직사각형에 대해서 X 축 방향으로 점간의 간격이 스트라이프의 길이보다 커지는 곳을 찾아서 분할함으로써 측정 경로를 생성하게 된다. 결과적으로 Fig. 7 에서 보듯이 레이저 스트라이프가 모든 점을 포함할 수 있도록 측정 시작점과 끝점을 결정한다. 각 측정경로의 Z 축 좌표는 각 측정경로의 시작점과 끝점의 Z 좌표에서 측정방향으로 stand-off 거리만큼 빼줌으로써

구할 수 있다. 다른 측정방향에 대해서도 같은 방식으로 위의 과정을 반복함으로써 모든 방향에 대한 측정경로를 생성하게 된다.

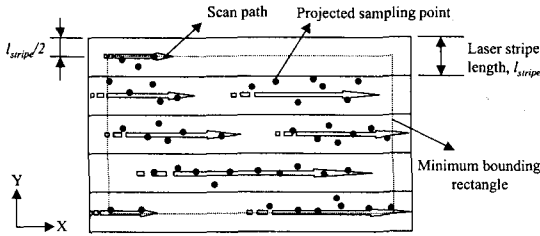


Fig. 7 Generation of Scan Path

위와 같은 과정으로 구해진 측정경로를 3 차원 상에 표시해보면 다음 Fig. 8 과 같다. 그림에서는 두 측정방향에 대해서 곡면을 모두 측정할 수 있는 측정경로를 보여주고 있다.

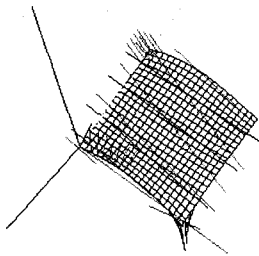
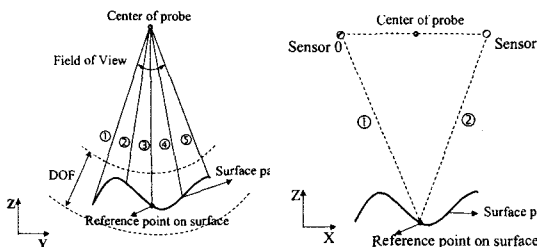


Fig. 8 Generated 3D Scan Path

### 3.2.4 측정깊이와 가림현상 검사

측정계획 생성의 마지막 단계로 측정깊이(depth of field)와 가림현상(occlusion)의 검사가 이루어진다. 이 과정에서는 앞서 생성된 측정경로 계획이 실제로 모든 곡면을 검사하는 데 문제가 없는지를 확인하는 것이다. DOF는 레이저 스캐너가 한번에 측정할 수 있는 Z 축 방향의 폭을 의미하며, 이 폭을 벗어날 경우에는 주변의 점들이 측정되지 않는다. 가림현상 문제는 물체에 비추어진 레이저 빛이 센서에 전달되지 않음으로 해서 발생하며, 센서와 측정점 사이에 파트나 다른 고정구가 존재할 때 발생한다.



(a) Depth of Field (b) Occlusion  
Fig. 9 Models for DOF and Occlusion Check

Fig. 9 의 모델을 이용하여 검사를 수행하고 측정이 불가능한 점이 생기면 새로운 측정방향을 추가하도록 하였다.

## 4. 자동 측정 시스템 구현

### 4.1 시스템 구성

다음의 Fig. 10 에 측정 시스템의 구성도를 보였다. 하드웨어는 3 축 전동 로터리 테이블과 레이저 스캐너로 구성된다. 실제로 전동 테이블은 레이저 스캐너상에 설치된다. 측정계획 생성 모듈은 Windows NT를 기반으로 Visual C++ 6.0 과 OpenGL 을 이용하여 개발되었다. 측정 계획 생성 모듈에서 구해진 측정경로, 방향, 회수 정보는 각각 컨트롤러와 좌표축 변환을 통해서 하드웨어로 다운로드 된다.<sup>(12)</sup>

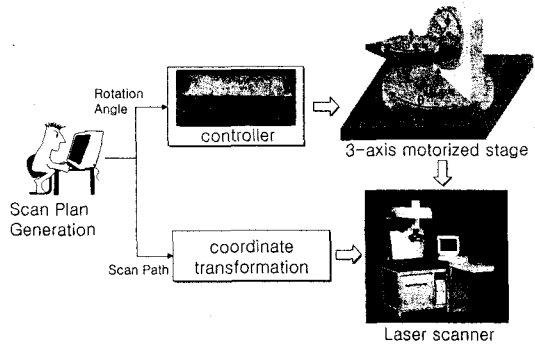


Fig. 10 Schematic Diagram of Overall Scan System

### 4.2 측정 대상 파트

측정 실험을 위해서 다음 Fig. 11 과 같이 한 면은 자유곡면으로 되어 있고 나머지 5 면은 평면으로 구성된 테스트 파트를 설계하여 제작하였다. 이 파트는 알루미늄으로 NC 가공하였으며, 본 연구에서는 평면 부위를 데이텀으로 이용하여 자유곡면 부위를 측정하는 것을 목표로 하였다. 자유곡면 부분은 아주 곡률의 변화가 아주 크므로 실제로 연구에서 사용된 레이저 스캐너로는 한 방향으로 측정이 되지 않는다.



Fig. 11 Test Part

### 4.3 위치 보정 및 자동 측정

본 시스템은 소프트웨어 모듈과 두개의 하드웨어로 구성되어 있다. 이들 각 모듈은 각각의 독립적인 좌표계를 가지고 있다(Fig. 12). 그러므로 측정계획 생성 모듈에서 만들어진 측정경로 및 방향 정보는 아무런 변환을 거치지 않은 상태에서 진동 테이블이나 레이저 스캐너에서는 사용할 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 각각의 좌표계들 간의 상대적인 차이를 구해서 이를 하나의 글로벌 좌표계를 중심으로 표현해 주어야 한다. 이때 글로벌 좌표계를 레이저 스캐너의 좌표계와 동일하게 두면 계산을 편리하게 할 수 있으며, 좌표변환은 다음의 식 2 와 같이 표현될 수 있다.

$$[P]' = [T]_{Rot} [T]_{Trans} [P] \quad (2)$$

이때 [P]는 초기 위치를 나타내고 [P]'은 변환된 후의 위치를 나타내며,  $[T]_{Rot}$  는 두 좌표계에 따른 회전변환,  $[T]_{Trans}$  는 병진변환을 나타낸다.

정확한 변환값은 하드웨어의 각 데이터면을 측정하여 구할 수 있다. 특히 회전축은 회전평면에 정밀구를 붙이고 각을 변화시키면서 여러 번 측정하여 회전중심을 구한다.

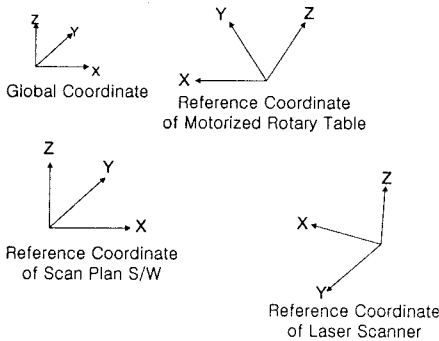


Fig. 12 Coordinate System of Each Module

이와 같이 각 모듈의 좌표축을 하나의 글로벌 좌표계로 표현하게 되면, 측정계획 생성 모듈에서 계산된 측정방향 및 경로 정보를 하드웨어에 맞게 변환하여 측정작업을 자동으로 수행하게 된다.

사용된 레이저 스캐너(Surveyor 1200)는 폭이 15mm 인 스트라이프 형태이며, 한 스트라이프당 240 개의 점이 얻어진다.

### 4.4 측정 데이터의 레지스트레이션

복잡한 파트의 경우 실제 측정작업은 파트의 위치를 바꾸어 여러 방향에서 측정하므로 하나의 좌표계상으로 데이터를 일치시키는 레지스트레이션 과정이 필수적이다.<sup>(10)</sup> 주어진 테스트 파트의 경우

는 측정계획에 따라서 전체 파트를 2 회에 걸쳐서 측정하게 되며, 측정방향이 이미 알려져 있으므로 자동으로 레지스트레이션 작업을 수행하였다. 얻어진 점데이터는 중복된 영역이 존재하기 때문에 *space sampling* 을 통해서 모델링 및 NC 데이터 생성에 이용될 수 있는 형태로 만들었다(Fig. 13).

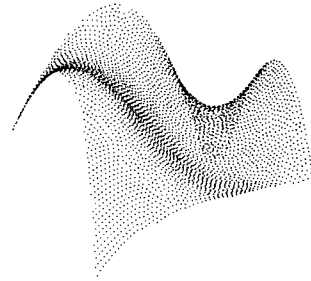


Fig. 13 Scanned Point Data

### 4.5 측정 데이터의 검사

#### 4.5.1 Data localization

측정된 점데이터를 CAD 모델과 비교하기 위해서는 두 모델간의 좌표계를 일치시켜야 한다(Fig. 14).<sup>(9)</sup> 이를 위해서 두 가지 방법이 사용될 수 있는데, 첫째로는 4.3 절에서 구한 각 좌표계간의 상관관계를 이용할 수 있으며, 두 번째로는 점데이터와 곡면간의 최소자승 에러를 최소화하도록 점데이터를 CAD 모델로 움직여 가는 방법이 있다.

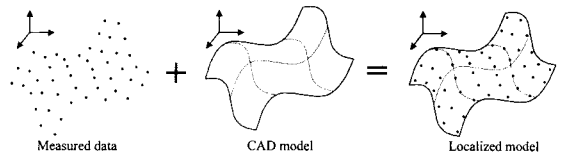


Fig. 14 Data localization

여기에서는 두 번째 방법을 이용하여 점데이터와 CAD 모델을 일치시켰다(Fig. 15). 다음의 그림에서 격자는 곡면모델의 *iso-parametric* 곡선을 보여주고 있다.

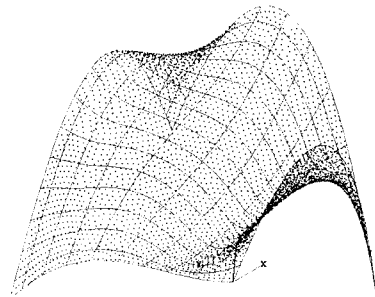


Fig. 15 Result of data localization

#### 4.5.2 비교 분석

레이저 프로브를 이용하여 측정된 점데이터는 광학적인 특성으로 인하여 예측 불가능한 에러를 포함하게 된다. 이러한 에러는 통상적으로 수백  $\mu\text{m}$  정도 되기 때문에 반드시 제거해 주어야 한다.

점데이터와 곡면간의 에러를 검사하기 위해서 *Surface-Cloud-Difference* 방법을 이용하였으며, 상용 RE 소프트웨어인 *Surfacer(SDRC)*에서 수행되었다.<sup>(13)</sup> 다음의 Table 1 은 비교 결과를 보여주고 있다. 여기에 나타난 에러는 레이저 스캐너, 전동 테이블, 고정구 등에서 나타난 모든 에러의 합이다. 그러므로 에러를 줄이기 위해서는 좀더 정밀한 시스템의 사용 및 위치 보정이 요구된다.

Table. 1 Comparison of CAD Model and Point data(mm)

	Maximum deviation	Average deviation	Standard deviation
Positive value	0.19817	0.05278	0.04087
Negative value	-0.18627	-0.05178	0.03894

### 5. 결론

본 연구에서는 3 축 전동 로터리 테이블과 레이저 스캐너를 이용하여 자유곡면을 자동으로 측정하는 시스템을 개발하였다. 이를 위해서 자유곡면에서 자동으로 측정방향, 회수, 경로를 추출하는 측정계획 생성 모듈도 개발하였다.

이러한 시스템을 이용함으로써 얻을 수 있는 장점을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 곡면 분석으로부터 측정계획을 생성하므로 작업자가 일관성 있고 정밀도 높은 측정작업을 수행할 수 있다. 둘째, 측정단계에서 전동 테이블을 이용함으로써 측정시간이 획기적으로 단축될 것이다. 셋째, 측정방향 정보를 이용한 자동 레지스트레이션이 가능하므로, 기존에 툴링볼을 이용한 작업에 비하여 단순하고 지루한 작업을 줄일 수 있다. 그리고 툴링볼을 이용한 레지스트레이션에 비해서 높은 정밀도를 기대할 수 있다.

본 연구에서 보인 측정계획 생성 모듈은 단일 곡면을 대상으로 이루어졌기 때문에, 향후 휴대폰 및 터빈 블레이드와 같은 제품에 응용하기 위해서는 여러 개의 패치 곡면에 대한 확장이 이루어져야 할 것이다. 그리고 파트의 곡면별로 설계의도에 맞는 측정작업을 수행하기 위해서 다양한 센서를 동시에 사용할 수 있도록 할 계획이며, 이를 위해서 파트 셋업 및 고정 방법(fixturing)에 대한 연구도 필요하다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 특정기초연구 지원과제(2000-1-30400-006-3)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Tamas Varady, Ralph R. Martin and Jordan Cox, 1997 "Reverse Engineering of Geometric Models - An Introduction", Computer Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268
- (2) 손석배, 박현풍, 이관행, 1999 "전산역설계를 위한 측정계획 수립 알고리즘 개발", 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 410-413
- (3) K. H. Lee, H. Park and S. Son, 2001 "A Framework for Laser Scan Planning of Freeform Surfaces", International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 17, pp. 171-180
- (4) F. Xi and C. Shu, 1999 "CAD-based path planning for 3-D line laser scanning", Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 473-479
- (5) A. Bernard and M. Véron, 1999 "Analysis and Validation of 3D Laser Sensor Scanning Process", Annals of the CIRP, Vol. 48/1
- (6) E. Zussman, H. Schuler and G. Seliger, 1994 "Analysis of the Geometrical Feature Detectability Constraints for Laser-Scanner Sensor Planning", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 9:56-64
- (7) F. Funtowicz, E. Zussman and M. Meltser, 1998 "Optimal Scanning of Freeform Surfaces Using a Laser-Stripe", Israel-Korea Geometric Modeling Conference, pp. 47-50, TelAviv, Israel
- (8) A. J. Spyridi and A. A. G. Requicha, 1990 "Accessibility Analysis for the Automatic Inspection of Mechanical Parts by Coordinate Measuring Machines", IEEE, 1284-1289
- (9) W. Choi and T. R. Kurfess, 1999 "Dimensional Measurement Data Analysis, Part 1: A Zone Fitting Algorithm", Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 121, pp. 238-245
- (10) C. Doral, G. Wang, A. K. Jain, and C. Mercer, 1998 "Registration and Integration of Multiple Object Views for 3D Model Construction", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 1, pp. 83-89
- (11) S. N. Spitz, A. J. Spyridi, and A. A. G. Requicha, 1999 "Accessibility Analysis for Planning of Planning of Dimensional Inspection with Coordinate Measuring Machines", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 4, pp. 714-727
- (12) DataSculpt User's Manual, Version 4.0, Laser Design Inc., 1995
- (13) Surfacer User's Guide, Version 9.0, Imageware Inc., 1999