

3차원 측정기를 이용한 Flexible Inspection System

조 명 우*, 박 용 길*

Flexible Inspection System using CAD Database and Vision Guided Coordinate Measuring Machine

ABSTRACT

The objective of this research is in the development of a flexible 3-dimensional inspection system for the sculptured surface by integrating the Coordinate Measuring Machine (CMM), CAD database, and vision system. To achieve the proposed flexible inspection system, two research categories are discussed in the study: new inspection planning methods and new object recognition/localization methods. The proposed inspection planning method includes a new measuring point selection method and various new probe path generation methods. The object recognition and localization process for the unknown surface can be easily carried out by introducing a new concept called "Z-Layer". The experimental results indicate that the developed flexible inspection system, with the proposed algorithm, can be implemented in real situation.

1. 서 론

최근에 3차원 측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)는 기업의 품질관리에 필수적인 장비로 정착되고 있으며, 고도의 정밀도를 요구하는 부품이나 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 가지고 있는 부품의 정도 측정을 위한 검사 설비로서 그 중요성이 날로 증대하고 있다. 3차원 자유곡면은 많은 기계부품 등에서 찾아볼 수 있으며, 현재 설계 추세가 보다 부드러운 곡선 형태로 변해가고 있기 때문에 다양한 형태의 3차원 곡면 형상이 몰드(Mold)와 다이(Die) 등과 같은 많은 제품에서 사용되고 있다. 이렇게 부품의 형상이 복잡해지면서 3차원 측정기는 이에 대한 효과적인 측정장치로서의 역할이 갈수록 증대되고 있다.

현재 사용되는 3차원 측정기는 일반적으로 온라인 교시법(Teaching-Playback method)을 채택하고 있다.

그러나 현재의 생산형태는 다품종소량 생산의 유연생산시스템(Flexible Manufacturing Method)으로 변하고 있으며, 검사공정의 대상물체는 일반적으로 샘플링한 부품들을 측정하기 때문에 다른 공정보다 작으며, 검사 측정 대상물체 빈번하게 바뀔 가능성이 높다. 따라서 만약에 다품종의 복잡한 형상을 가진 부품을 검사하여야 한다면 검사공정은 매우 지루하고 따분한 공정이 될 수도 있다. 또한 현재의 측정방법으로는 작업자의 교시과정에서 뜻하지 않은 실수를 할 수도 있으며, 이는 예상치 못한 측정오차를 발생시킬 수도 있다. 따라서, 위에서 언급한 여러가지 문제점을 해결하기 위해서 최적의 검사계획 수립, 피검사물의 인식, 정확한 위치 결정,

* 대우전자 시스템 사업본부

신속하고 정확한 측정, 측정결과의 분석등의 일련의 검사공정을 자동으로 수행할 수 있는 유연 검사시스템 (Flexible Inspection System)이 개발되었으며, 이는 다품종 소량 생산 시스템에 필수적인 경제적이고 정확한 측정설비가 될 수 있다. 3차원 측정기를 진정한 의미의 유연한 자동 측정 설비로 하기 위해서는 CAD (Computer Aided Design) 데이터베이스, 컴퓨터 화상기술, 그리고 3차원 측정기술의 접합이 이루어져야 한다.

3차원 자유곡면을 측정하기 위한 유연검사시스템의 도식적그림을 그림 1에 나타내었으며 이 시스템은 CAD 데이터베이스로부터 측정위치의 선정, 측정경로의 결정등을 포함한 검사 데이터베이스를 만들어 최적의 검사방법을 결정할 수 있다. CMM과 화상 시스템을 결합하여 3차원 자유곡면의 인식(Recognition)과 위치결정(Localination)도 자동으로 수행 할 수 있다. 따라서 제안된 유연검사시스템은 데이터베이스에 등록되어 있는 어떠한 부품도 놓여진 위치순서에 관계없이 자동으로

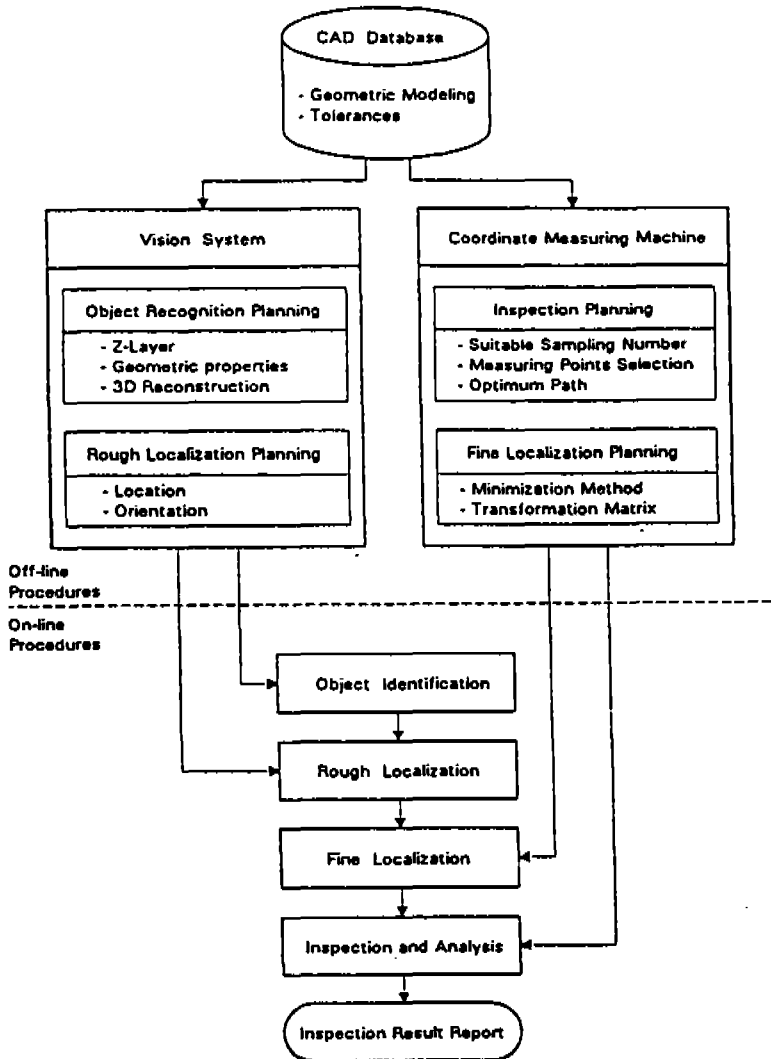


Fig.1 Overall schematic diagram for the flexible inspection system.

측정하여 결과를 분석할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 제한된 시스템의 검증을 위하여 필요한 실험이 행하여졌다.

2. 관련연구

제시된 유연검사시스템을 개발하기 위하여 CAD 데이터베이스, 목적물 인식 및 위치결정의 접합은 필수적 단계이다. 따라서 이와 관련된 연구내용이 다음과 같이 조사되었다.

2.1 CAD를 이용한 검사

고도로 유연하고 효과적인 3차원 측정시스템을 구현하기 위하여, 검사공정은 CAD 데이터베이스와 인터페이스(Interface) 되어야 하며, 오프라인(Off-line)에서 프로브 경로를 결정하는 과제는 몇몇의 연구자들이 CAD 데이터베이스를 이용하여 다루었다(2, 3, 11). 그러나, 결정된 프로브경로의 좌표와 테이블상에 위치한 공작물의 실제 좌표간의 미정렬 문제는 고려되지 않았으며, 측정된 공작물이 변경될 때마다 초기 정치(Setting) 과정은 운영자에 의하여 수동으로 이루어진다. CAD를 이용한 화상측정시스템에 대한 연구는 몇몇의 연구가에 의하여 이루어졌으며(17), 그 연구에서 주 관심은 설계 데이터로부터 자동적으로 검사와 인식과정을 발생시키는 시스템의 개발에 있었다. 그들은 CAD 데이터베이스 모델로서 경계표시법(Boundary Representation Method)을 사용하였고 이 데이터베이스로부터 필요한 정보를 추출하였으며, 이를 화상측정시스템이 적용함으로써 검사결과를 얻었다. 그러나, 제시된 방법은 Primitives로 구성되는 평면 공작물에 대해서는 충분할지 모르나 복잡한 형상을 가진 3차원 곡면에 대해서는 한계를 가진다.

2.2 목적물 인식

3차원 곡면을 가지는 물체의 인식과 위치결정은 제시된 유연검사시스템에 있어서 필수적인 과제이다. CMM 테이블상에 놓여있는 비확인 물체의 검사를 위하여는 비확인 물체의 인식후 그와 일치된 데이터베이스가 결정되어야 한다. 3차원 곡면물체의 인식을 위하여 Sato와 Honda(20)는 유도거리측정법을 제시하였다. 여기서 곡면물체를 수평단면경계의 집합체로 고려하였지만, 3차원 경계를 해석적 방정식으로 표현하기는 매우 어렵기 때문에 일반적인 3차원 곡면에 대해서는 사용될 수 없다.

Wang(23)은 실루엣을 이용한 3차원 물체 일치법을 제시하였으며, 이것은 물체의 앞, 옆, 위 실루엣으로부터 모멘트의 불변화를 계산함으로써 3차원 물체를 인식하는 방법이다. Ro와 Don(14)은 3차원 모멘트를 사용하여 물체를 인식하는 방법을 제시하였으나, 이 방법은 불규칙하게 위치한 물체에는 적용될 수 없었다. Liu와 Tsai(B)는 여러개의 카메라를 이용하여 3차원 곡면물체를 인식하는 새로운 방법을 제시하였다. 이것은 물체가 붙어있는 테이블을 회전시킴으로써 윗면과 몇개의 측면화상을 취함으로써 3차원 물체를 인식하는 것이다. 제시된 방법은 3차원 곡면인식에 사용될 수 있지만, CMM 상에 회전테이블을 설치하기가 쉽지 않고 예기치 못한 측정오차가 발생할 가능성이 상당히 크며 물체가 대립성을 가지면 정확한 회전축을 알 수 없으므로 물체의 인식이 쉽지 않은 단점이 있다.

2.3 물체의 위치결정

3차원 물체의 위치와 방법을 결정하기 위한 방법들이 몇몇 연구자로부터 제안되었다. 즉, 다면체로 모델된 물체의 인식 및 위치결정을 위한 공작물의 3차원 위치 및 표면 법선의 측정(8, 9), 좌표변환을 결정하기 위하여 3차원 물체를 선형 Primitive와 구속조건으로 표시하는 방법(4), 다면체나 복잡한 3차원 표면으로 모델링된 물체의 위치를 정하기 위한 최소화 알고리즘(19) 등이 있다. 그러나, 표면법선 측정은 표면의 거칠기에 매우 민감하고, 가공된 부품은 항상 어느 정도의 오차가 있으므로 예기치 않은 오차가 존재할 수 있다. 물체를 선형 Primitive로 나타내는 경우에, 만족할 만한 위치결정을 위하여 자유형태의 확인방법이 사용되며, 이때 물체에 포함된 Primitive의 수가 증가할수록 위치결정에 소요되는 시간은 기하급수적으로 증가한다.

다면체 조사에 의한 최소화 방법은 물체의 조사위치 결정에 대해 충분하지만, 검사와 같은 정밀한 공정에서는 오차가 존재한다. 복잡한 3차원 표면의 위치결정법은 더욱 정교한 위치검출을 하는데 충분한 것처럼 보이지만, 이 방법은 물체의 위치편차가 작다고 가정하므로 큰 편차를 가지는 정밀한 위치결정의 경우에는 많은 반복회수(iteration)를 필요로 하며, 따라서 정확한 결과를 얻지 못하거나 예상할 수 없는 프로브충격들이 발생할 수 있다. 화상안내좌표측정기는 공작물의 위치와 방향을 결정하기 위하여 이진화상처리기술을 사용하였다(21). 그러나 제시된 방법은 비대칭적 베이스를 가지는

공작물에 대해서만 적용될 수 있고, 대칭적 베이스를 가지는 공작물에는 볼체의 정확한 위치를 결정할 수가 없다.

3. 검사계획

본 연구에서 사용된 검사계획방법은 최적의 측정점의 선택 및 CMM 프로브의 경로발생을 포함한다. 일반적으로 사용되어온 방법은 등간격의 격자모양(Grid Pattern) (2)의 측정점(Measuring Point)을 사용하는 것이나, 본 연구에서는 자유곡면의 평균곡률(Mean Curvature)의 분석을 통하여 보다 효과적으로 측정점의 위치를 결정할 수 있는 방법이 사용되었다. 3차원 자유곡면에 대한 적절한 측정점의 위치가 결정된 후에는 이를 바탕으로 측정시간과 측정오차를 최소화 할 수 있는 최적의 측정경로가 결정되었다.

3.1 측정점의 위치결정

3차원 자유곡면 가공에 있어서, 공구는 일반적으로 2개의 주어진 점 사이를 직선으로 움직이며 절삭한다. 따라서 주어진 가공오차(Tolerance)를 만족시키기 위해서는 적합한 공구경로 폭(Step Size)가 결정되어야 하며, 여기에는 몇가지 방법들이 사용되고 있다(4, 7, 15). 그러나 간격크기가 잘못 결정되었거나, 가공하는 기체의 정밀도(Translational, Rotational, Straightness errors)가 떨어지는 경우에 공작물의 표면에 가공 오차가 발생할 수 있다. 이때 오차의 크기는 볼록면의 경우 상대적으로 편평한 부분보다 급격히 변하는 곡률을 가지고 있는 부분에서 더 크게 발생하게 되며, 오목면에서는 공구경로 폭의 잘못결정에 의해 gouging이 발생할 수 있다. 따라서 같은 크기의 커터를 사용하였을 경우 곡률이 급격히 변화하는 부분에서 보다 큰 오차가 발생할 가능성이 많으며, 이러한 부분이 미리 예상되어질 수 있다면 보다 효과적으로 검사할 수 있다. 물론 등간격 측정방법의 경우, 측정점을 증가시키므로써 보다 정밀한 측정결과를 얻을 수 있지만, 이러한 방법은 보다 많은 측정시간을 필요로 하며 원가 상승의 요인이 될 수 있다. 본 연구에서는 자유곡면의 평균곡률을 분석하여 측정점의 위치를 결정하는 새로운 방법을 사용하였으며, 이때 측정점의 밀도는 자유곡면의 평균곡률에 따라 변화한다. 따라서, 본 방법은 같은 숫자의 측정점이 사용되었을 경우 기존의 등간격 측정방법 보다 효과적인

방법이라고 사료된다.

3.2 측정점의 위치결정 방법

최적의 측정점의 위치를 결정하기 위하여, 첫번째 순서로써 주어진 자유곡면의 평균곡률이 분석되었다. 이때 평균곡률은 주어진 곡면위의 한점에서의 Principal Normal Curvature의 최대치와 최소치로부터 계산될 수 있다(16). 여기서 볼록면과 오목면에서의 평균곡률에 의한 가공오차 발생 가능성은 같다고 가정하였으며, 따라서 계산치의 절대값을 취하여 측정점 결정의 기준으로 하였다.

Bezier 방법을 이용한 자유곡면과 이 곡면의 평균곡률은 그림 2와 3에 각각 나타내었다. 또한 사용된 측정점 결정방법에 대한 개념도를 그림 4에 나타내었다.

먼저, 자유곡면을 다수의 구역으로 분할하여 각 구역의 평균곡률을 계산하고, 이의 크기대로 순위를 결정한다. 여기에서 자유곡면의 효과적인 검사를 위하여 순위가 결정된 구역중에서 적절한 검사대상 구역을 결정하기

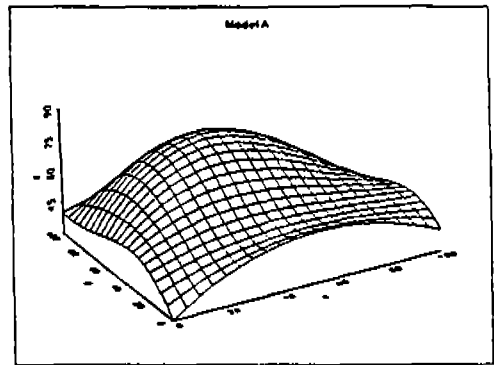


Fig. 2 A Bezier surface.

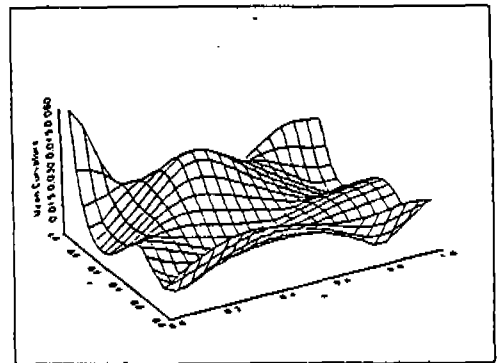


Fig. 3 Mean curvature plot.

위해 Region Selection Ratio가 사용되었으며 이를 α 라고 표시하였다. 예를 들면 $\alpha=0.5$ 인 경우, 측정점중에서 높은 순위의 측정점으로부터 50%가 검사대상으로 결정된다. 예로써 $\alpha=0.3$ 과 $\alpha=0.7$ 인 경우에 결정된 Measuring Point의 위치를 그림 5에 나타내었다. 여기에서 α 가 증가하면 측정점은 전체곡면으로 분산되며, α 가 감소하면 평균곡률이 큰 부분으로 집중되는 경향이 있다. 따라서 Region Selection Ratio α 를 적절하게 선택하면 주어진 3차원 자유곡면을 보다 효과적으로 검사할 수 있을 것으로 사료된다.

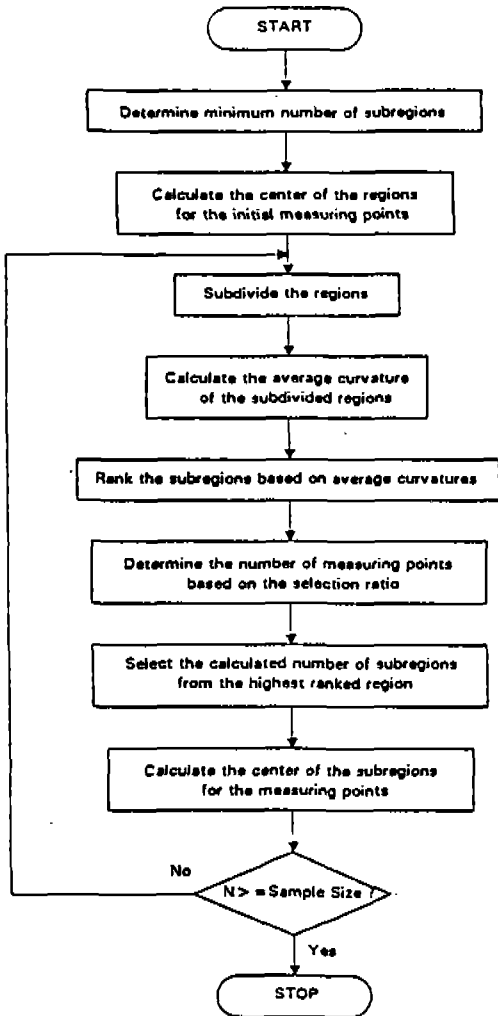
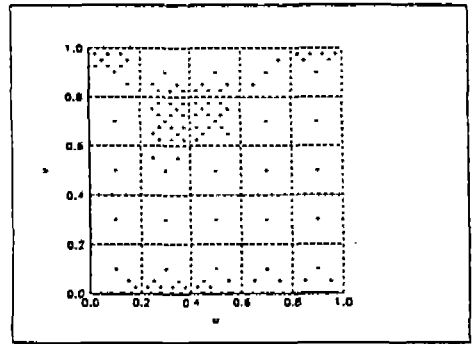
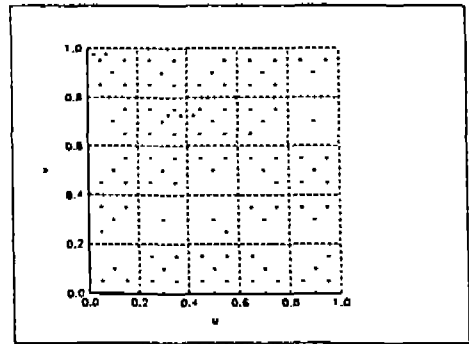


Fig. 4 Proposed measuring points selection method.



(a) $\alpha=0.3$



(b) $\alpha=0.7$

Fig.5 Measuring point locations by proposed method.

3.3 측정순서 결정

3차원 측정기를 이용하여 자유곡면을 측정할 때 프로브는 측정점에 대하여 법선벡터 방향으로 접근하여야 측정오차를 최소화 할 수 있다⁽²⁾. 따라서, 검사대상 자유곡면에 적절한 측정점을 선택한 후에 프로브 접근방향을 결정하기 위해 각각의 측정점에 대응하는 한쌍의 유도점(Outside and Inside guide point)가 법선벡터 상에서 계산되었다. 다음으로 각 외부유도점에 대한 측정순서를 결정함으로써 전체 측정시간을 최소화 할 수 있다. 접촉식 프로브를 이용한 측정방법은 비연속형태(Discrete Type)의 측정이기 때문에, 측정순서가 검사 결과에 영향을 미치지 않는, 프로브가 각 측정점 사이를 무질서하게 움직인다면 전체 곡면을 측정하는데 불필요한 시간이 많이 소요될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전체 측정시간을 최소화 하기 위하여 각 측정점에 대한 측정순서를 결정하기 위한 몇가지 방법이 시도되었다.

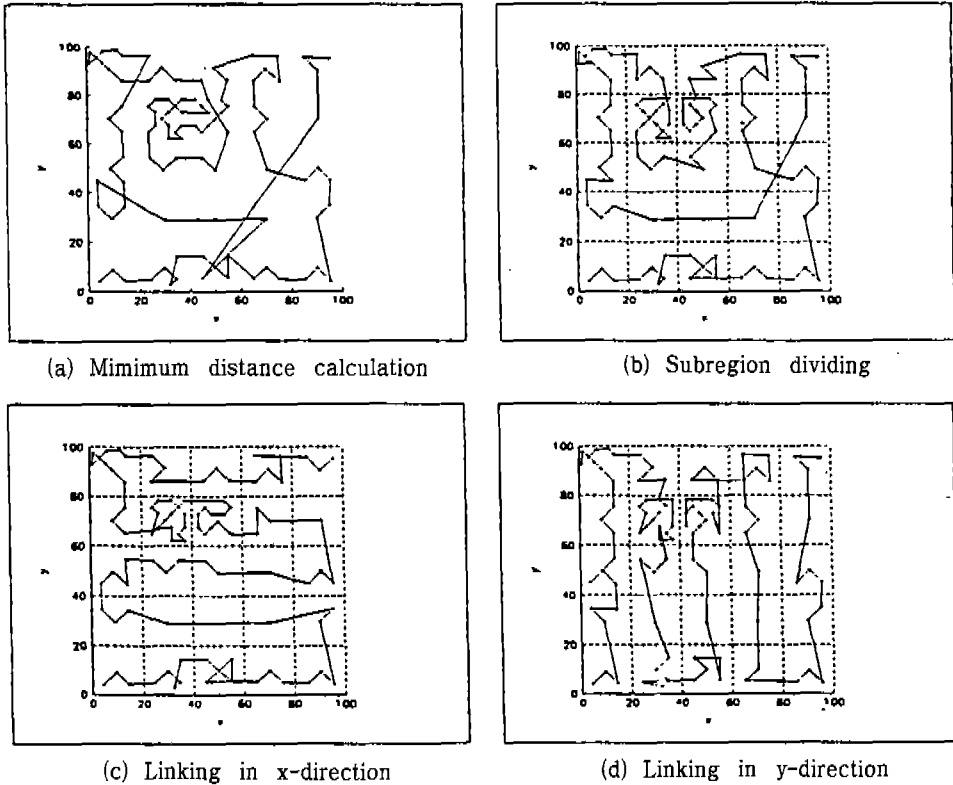


Fig. 6 Probe paths by minimum distance calculation.

a. 최소거리 계산

최초의 프로브 위치에서 가장 가까운 외부유도점을 최초의 측정점으로 선정하고 계속해서 다음의 가장 가까운 측정점을 결정해 나가는 방법이며 그림 6(a)에 결정된 프로브의 측정결로를 나타내었다.

b. 구분역할

자유곡면을 몇 개의 구역으로 분할한 다음, 최초의 측정점이 구역안에서 가장 가까운 측정점을 계속해서 찾아 나가며, 한 구역안의 측정점이 결정된 다음에는 가장 가까운 측정점이 있는 다음 구역으로 이동해 간다. 그림 6(b)에 이렇게 결정된 프로브경로를 나타내었다. 다음은 구역의 결정방향을 X 또는 Y 방향으로 제한했을 때의 결과로서 그림 6(c)와 (d)는 이 방법으로 결정된 프로브경로이다.

4. 물체인식과 위치결정

검사대상 자유곡면의 인식과 위치결정을 위한

Database는 "Z-Layer"라는 새로운 개념을 사용하여 CAD 데이터베이스로부터 만들어질 수 있다. 그리고 CMM 테이블 위의 자유곡면의 3차원 형상은 제안된 시스템을 이용하여 구성될 수 있다. 이 시스템에서는 CMM을 피검사물까지 유도하기 위하여 2개의 Vision Camera가 사용되었으며, 얻어진 데이터로부터 3차원 곡면을 재구성 하기 위하여 표면보간법(Surface Interpolation Method)가 사용되었다. 다음 순서로, 재구성된 곡면의 각 Z-Layer로부터 데이터베이스내에서 가장 부합되는 자유곡면을 결정할 수 있으며, CMM 테이블에 놓여 있는 피검사물의 위치와 회전각도도 결정될 수 있다. 최종적으로 보다 정확한 위치결정을 위하여 최소화 알고리즘이 사용되었다.

4.1 Database construction

본 연구에서는 3차원 자유곡면의 인식과 위치결정을 위하여 "Z-Layer"라고 부르는 새로운 개념의 데이터베이스 구성방법이 사용되었다. 그림 7에 보인 것처럼

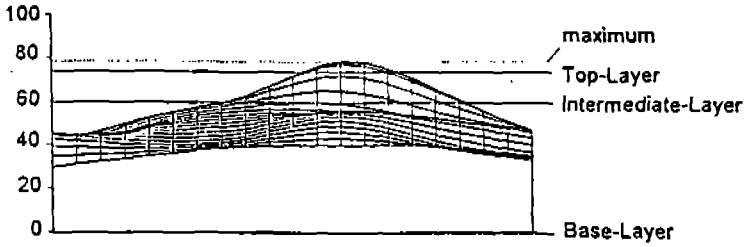


Fig. 7 Definition of the, Z-layers.

Z-Layer는 자유곡면을 XY-평면에 평행하게 절단하였을 때 나타나고 있는 몇 개의 단면으로 정의된다. 먼저, 필요로 하는 데이터베이스를 구성하기 위하여 자유곡면을 표면의 Z축 좌표의 배열로 표시하는 Z-map⁽²¹⁾으로 나타내고 이 Z-map을 몇 개의 일정한 높이로 절단하면 몇 개의 이진화상이 나타난다. 이 화상을 본 연구에서 Z-Layer라 부르며, 각 Layer의 기하학적 특성을 계산함으로써 CMM 데이불상의 피점사물을 인식하고 위치결정을 하기 위한 데이터베이스를 구성할 수 있다.

a. Z-Layer의 계산

본 연구에서는 자유곡면을 정의하기 위하여 3개의 Z-Layer가 사용되었으며 각 Layer는 다음과 같이 정의되었다.

Base-Layer :

$$L_{base} = \begin{cases} 1 & \text{if } Z > Z_{base} \text{ (max x 0.0)} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Top-Layer :

$$L_{top} = \begin{cases} 1 & \text{if } Z > Z_{top} \text{ (max x 0.9)} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Intermediate-Layer :

$$L_{med} = \begin{cases} 1 & \text{if } Z > Z_{med} \text{ (max x 0.7)} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기에서 max는 Z-map의 최대치

자유곡면과 3개의 Z-Layer를 그림 8에 나타내었다. 3개의 Layer중에서 Base Layer가 가장 중요한 정보를

가지고 있다. Base-Layer는 어떤 물체의 XY 평면에 투사된 화상이기 때문에 검사대상물체의 투사면적, 관성 모멘트(Moment of Inertia) 등과 같은 중요한 기본 특성들이 이 Base-Layer로부터 결정될 수 있다. 다음으로 중요한 의미를 가지는 것은 Eq (2)와 같이 정의된 Top-Layer이며, Top-Layer는 자유곡면 상층부의 특성을 나타내기 때문에, 이 Layer는 자유곡면을 인식하기 위한 매우 효과적인 판단 기준이 될 수 있다. 따라서, 이러한 3개의 Layer로부터 자유곡면에 대한 대부분의 중요한 정보가 얻어질 수 있으며 이를 분석함으로써 3차원 자유곡면에 대한 인식 및 위치결정을 할 수 있다.

Z-Layer의 갯수는 경우에 따라서 조절될 수 있다. 검사하여야 할 한 Set의 자유곡면의 숫자가 많거나, 유사한 형상을 가지고 있을 때에는 적절한 인식을 위하여 Z-Layer의 숫자는 증가되어야 하며, 반대의 경우에는 감소할 수 있다. 또한 Z-Layer의 배열의 크기도 자유곡면 인식의 난이도에 따라 감소되거나 증가될 수 있다. 그러나, 하나의 Set 내에 소속된 자유곡면군에 대한 Z-Layer의 숫자나 배열의 크기는 일정하여야 하며, 그렇지 않은 경우에는 자유곡면을 적절하게 인식하지 못할 수도 있다.

b. Z-Layer의 기하학적 특성

앞에서 언급한 것과 같이 각 Z-Layer는 자유곡면 각 부위의 투사된 화상으로 간주할 수 있기 때문에, 일반적인 이진화상 기술을 이용하여 각 Layer의 기하학적 특성을 계산할 수 있다. 하나의 자유곡면을 정의하기 위하여 Base-Layer에 6가지 기하학적 특성이 계산되었으며 각 Layer에 대해 계산된 특성은 다음과 같다.

Base-Layer :

- F_{B1}=Image의 면적
- F_{B2}=자유곡면의 최대 높이

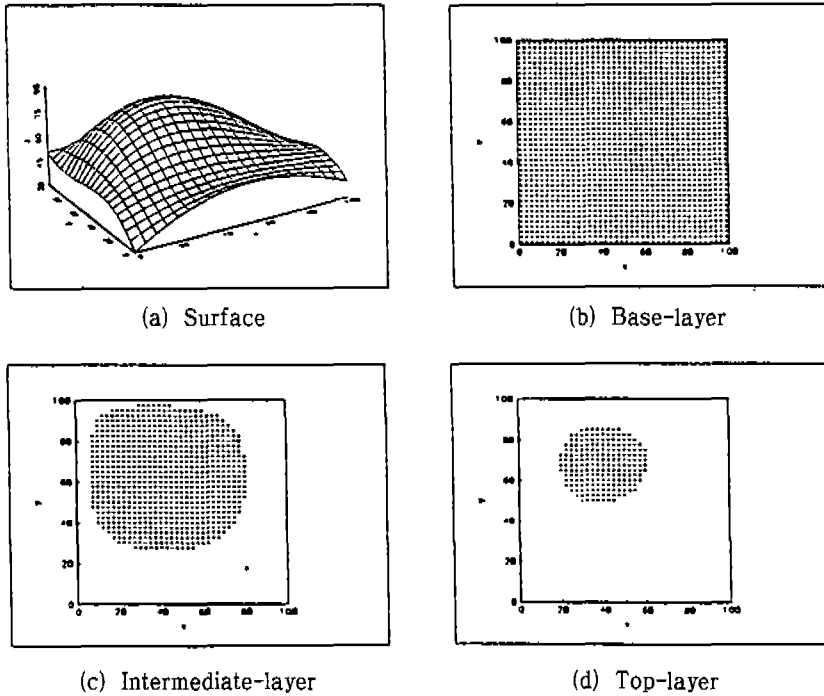


Fig.8 Z-Layers of a surface.

FB3=Centroid를 중심으로 한 Moment of Inertia

FB4=Eccentricity

FB5=공작물 좌표계내에서 Centroid의 X 좌표

FB6=공작물 좌표계내에서 Centroid의 Y 좌표

Others :

FT1, FM1=Image의 면적

FT2, FM2=Layer의 높이

FT3, FM3=Centroid를 중심으로 한 Moment of Inertia

FT4, FM4=Eccentricity

FT5, FM5=분할된 Image의 숫자

FT6, FM6=Base-Layer의 Centroid와 다른 Layer의 Centroid 사이의 거리

FT7, FM7=Base-Layer의 다른 Layer의 Centroid를 연결하는 직선의 기울기

계산되어진 값들은 배열형태로 저장될 수 있으며 하나의 자유곡면을 특징하게 정의 할 수 있다. 여기서 하나의 Layer 내에서 분할된 구역의 수가 하나보다 크면 각각의 특성들은 Sequential Algorithm (12)에 의하여 각 구역에 대하여 모두 계산할 수 있으며, 전체 배열의

크기는 증가하게 된다. 이 배열은 인식 및 위치결정을 위한 데이터베이스에 저장되며, 필요로 하는 기하학적 특성은 Appendix로부터 구할 수 있다(12, 13).

4.2 3차원 측정기를 이용한 3차원 형상 및 구성

CMM 테이블상의 자유곡면 물체를 인식하기 위해서 대상물체의 3차원 데이터를 Vision System과 CMM을 사용하여 얻었으며, 이 데이터로부터 보다 만족스러운 결과를 얻기 위하여 B-Spline 보간방법이 사용되었다. 다음에 앞에서 기술한 바와 같은 방법으로 기하학적 특성들이 계산되어 대상물체를 인식하고 위치를 결정하는데 이용되었다.

a. 제안된 유연점사시스템

본 연구에서 사용된 시스템을 그림 9에 나타내었다. 대상물체의 평면 화상을 얻기 위해 하나의 카메라가 CMM의 상부에 설치되었으며, 이 평면 화상을 분석하여 대상물체의 면적, 위치등을 결정할 수 있다. 또한 측면 화상을 얻기 위하여 또 하나의 카메라가 CMM의 측면에 설치되었으며 이로부터 대상물체의 높이를 계산

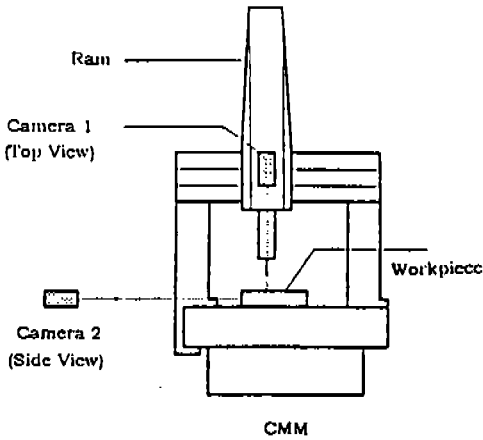


Fig.9 Proposed system.

할 수 있다.

주어진 자유곡면의 3D 데이터를 얻기 위하여 사용된 알고리즘은 다음과 같다.

Step 1 : Top-view analysis

1. Take the top-view
2. Calculate the position, area, and the size of the object from the top-view
3. Determine the optimum step size for digitization that is based on the length along the principle axis of the object
4. Transform the probe contact points array according to the position and orientation of the object

Step 2 : Side-view analysis

1. Take the side-view
2. Determine the maximum height of the object form the side-view
3. Calculate the guide point locations

Step 3 : Surface construction

1. Digitize the surface in a rectangular array from
2. Generate the surface using B-spline interpolation

최적의 스텝수를 정한 후 측정점의 배열은 위에서 본 영상의 주축의 위치와 방향에 따라 변환된다. 그러나 더욱 정밀한 결과를 얻기 위하여는 이산화

(digitizing)점의 수가 증가되어야 하고 그 수가 증가하면 이산화 시간도 증가할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 이산화 점을 감소시키기 위하여 보간법(Interpolation)을 얻어진 데이터에 적용하였다.

b. 보간법을 이용한 3차원 곡면 구성

본 연구에서는 얻어진 결과로부터 바람직한 3D 표면 데이터를 얻기 위하여 B-스플라인 보간법이 사용되었다. B-스플라인 보간 표면을 구성하기 위한 효과적 알고리즘은 Wang등⁽²²⁾에 의하여 제안되었다. 그 방법은 B-스플라인근사법에 근거를 두고 모든 데이터 점을 통과하는 표면을 만들 수 있는 새로운 제어 정점(Control Point)을 수치점으로 찾는다. 따라서, 제어 정점의 수는 데이터 점의 수와 같다. $d_{i,j}$ 로 주어지는 데이터 집합을 통과하는 표면을 얻기 위하여, 다음의 선형 방정식에서 u_i 와 v_j 에 대해서 풀어야 한다.

$$d_{i,j} = \bar{s}(u_i, v_j) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n \bar{p}_{k,l} \cdot N_k(u_i) M_l(v_j)$$

여기서 m 및 n 은 데이터 점의 크기를 나타낸다.

바람직한 3D 표면 데이터를 얻기 위하여 앞에서 논의된 방법을 사용하여 Z-층(layer)를 발생시켰다. 또한 각 층의 기하학적 성질은 최상의 부합 데이터 베이스를 선택하도록 선택되고 목적물의 위치와 방향을 결정한다.

4.3 Matching

조사된 표면에 대한 모든 기하학적 성질을 계산한 후에 주어진 데이터 베이스와 복합되는 표면을 결정하는 것은 필수적이다. 이를 위하여 베이스층은 가장 중요한 정보를 포함하므로 맨 먼저 조사된다. 그 후 다른 층의 특징은 주어진 목적물이 인식될 때까지 해석될 것이다. 기본층의 성질중에 특성 $(F_{B1})_R - (F_{B4})_R$ 은 표면을 인식하는데 사용되고, 다른 특성 $(F_{B5})_R, (F_{B6})_R$ 은 표면의 위치를 결정하는데 사용될 것이다. 표면의 첫번째 가능한 집합은 기본층에 대해 비일치 측정값(Mismatch Measure)들을 계산함으로써 결정될 수 있다⁽¹³⁾. 비일치의 측정치는 다음과 같이 정의한다.

$$d_j(F_R, F_D) = \frac{|(F_j)_R - (F_j)_D|}{\{1 + |(F_j)_R| + |(F_j)_D|\}} \quad (5)$$

여기서 F_R, F_D 은 각각 구축된 특징과 주어진 데이터 베이스를 나타낸다.

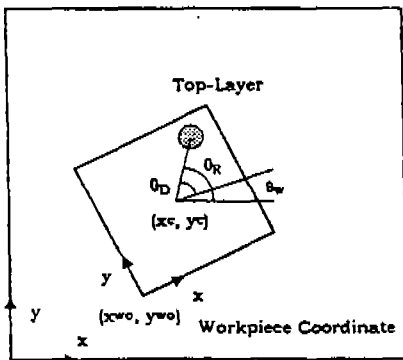
기본층에 대하여 만일 일치하지 않는 값들이 미리 정의된 오차값 이하라면 두 표면은 유사한 것으로 간주되고, $F_R = F_D$ 일 때 $d_j(F_R, F_D) = 0$ 이다. 여기서, 가능한 표면의 수가 한 개일지라도 인식절차는 선택된 표면이 올바른 것인지 그렇지 않은 것인지를 점검하기 위해 다른 층까지 계속된다. 다른 층에 대해 비일치 측정 값은 여섯개의 특징, $F_1 - F_6$ 을 계산해야 한다. 따라서, 16개 특징의 전체적인 수는 표면을 인식하는데 사용될 것이다. 만일 표면이 16개의 특징으로부터 인식될 수 없다면 집합에서 표면이 너무나 서로 유사하다거나, 그 데이터 베이스 속에 그 표면이 없다는 것이다. 만일 표면이 유사한 형상을 가지면 Z층의 수는 집합에서 모든 표면을 인식하도록 적절히 추가되어야 한다.

4.4 위치 및 방향결정

목적물을 인식한 후, 위치와 방향은 결정된다. 본 연구에서 위치처리(localization process)작업은 개략(rough) 및 미세(fine) 두 단계로 나누어진다. 개략적인 위치 과정은 목적물의 위치와 방향을 얻어진 데이터 베이스와 이미지 처리의 결과를 해석하여 결정된다. 그러나 비전시스템이나 다른 요인들의 분해능에 의한 위치 오차의 요인은 여전히 존재한다. 따라서 더 정교한 결과를 얻기 위하여 미세 처리라 불리는 과정을 더 거쳐야 한다.

a. 개략 위치결정

CMM 좌표계에서의 목적물의 위치는 기본층의 중심점(centroid), $(F_{B5})_R$, $(F_{B6})_R$ 으로부터 결정될 수 있다. CMM에서 공작물 좌표 원점의 위치는 다음식으로



CMM Coordinate

Fig. 10 Calculation of the orientation.

주어진다.

$$(x_{wo}, y_{wo})_{CMM} = \{ (F_{B5})_R - (F_{B5})_D, (F_{B6})_R - (F_{B6})_D \} \quad (6)$$

또, CMM 좌표계에서의 목적물의 방향이 결정되어야 한다. 방향을 계산하기 위한 제시된 방법은 그림 10에서 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 기본층과 최상층의 중심점을 연결하는 선의 기울기는 주어진 데이터 베이스에 대한 공작물의 좌표계에서 주어지고 구축된 데이터 베이스에 대한 CMM 좌표계에서 계산된다. 따라서 CMM 좌표계에서 목적물의 방향은 단순히 다음과 같이 얻어진다.

$$(\theta_w)_{CMM} = (F_{T7})_R - (F_{T7})_D \quad (7)$$

여기서 최상층의 분리된 지역의 수가 한개 이상이라면, 기본층 중심점으로부터 가장 긴 거리를 가지는 지역은 더욱 정교한 결과를 가진다.

b. 미세 위치결정

목적물의 위치와 방향은 Z층의 해석에 의하여 결정될 수 있다 하더라도 위치오차는 여전히 존재할 수 있다. 이미지 해석에 근거하여 위치는 빛의 조건, 이미지 시스템의 분해능과 스폿 격자의 밀도에 의하여 영향을 받을 수 있다. 또, 목적물의 방향은 두개의 좌표계에서 최상층의 기울기의 차이에 의하여 결정되므로, 개략적인 위치방은 정확한 결과를 얻을 수 없다. 따라서, 미세 위치에 대해 표면상의 몇개의 점은 CMM에 의하여 이산화되고 수치반복법은 거리를 최소화하는데 적용된다. CMM테이블 상의 목적물이 정확한 위치에 없으면, 표면상의 모든점들의 좌표는 변할 것이다. 따라서 거리의 합을 최소화하는 변환 행렬을 찾음으로써 공작물의 좌표계와 측정계간의 좌표변환은 결정된다. 변환행렬을 얻기 위하여 Gunnarsson⁽¹⁰⁾ 및 Sahoo⁽¹⁹⁾ 등은 각각 다른 접근법을 사용하였다. Gunnarsson등은 CAD 데이터에서 표면 묘사를 변환하였고 Sahoo등은 측정된 점의 역변환을 사용하였다. 본 연구에서 변환된 표면 묘사는 쉽기 때문에 표면은 변환된다. 최소법에 대한 목적 함수는 측정된 점과 주어진 표면간의 거리를 최소화 함으로써 변환 행렬에서 변수를 결정하는 것이다. 일반적으로 3D 변환 행렬은 6개의 변환 변수를 포함한다. 따라서 본 연구에서 사용되는 목적함수는

$$F(\theta, \phi, \psi, t_x, t_y, t_z) = \sum_{j=1}^n |(P_{mj}) - (P_{sj}) [T_L]|^2 \quad (8)$$

여기서 (P_{mj}) 는 j 번째 측정점을, (P_{sj}) 는 표면상의 일치하는 가장 가까운 점을 나타낸다. (T_L) 은 6개의 변수를 포함하는 4×4 변환 행렬이다. 방정식 (8)에 주어진 목적함수를 최소화 하기 위하여 6개의 변환 변수관점에서 F의 편미분이 '0'이 되어야 한다. 따라서 다음의 방정식이 동시에 해결되어야 한다.

$$f_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0, \quad t_i = \theta, \phi, \psi, t_x, t_y, t_z \quad (9)$$

위 방정식은 여러가지의 수치법을 적용하여 해결할 수 있다. 본 연구에서는 뉴턴-랩슨법(Newton-Rapson Method)과 경사법(Steepest Decent method)을 결합한 하이브리드법을 사용하여 문제를 해결하였다. 근사위치법의 결과는 수치문제를 해결하기 위한 초기값으로 사용한다. 이런 초기값은 최종해에 근접하기 때문에 문제를 해결하는데 있어서 발산의 가능성은 크게 감소한다.

5. 실험 및 결과

제안된 유연 검사 시스템의 유용성을 검증하기 위하여 다음의 실험을 수행하였으며 결과를 해석하였다.

5.1 공작물의 준비

본 실험에서 공작물 모델에 대한 4개의 기하학적인 데이터 베이스를 생성하였다. Bezier와 B스플라인 방법은 3차원자유곡면의 생성에 사용되기 때문에 모델 A와 B로 표시된 두 모델은 Bezier의 표면 설계법에 의하여 생성되고, 모델 C 및 D로 표시된 것은 B스플라인 방법에 의하여 발생된다. 제시된 시스템에서 목적물 확인 알고리즘의 효용성을 보이기 위하여 모든 공작물은 100

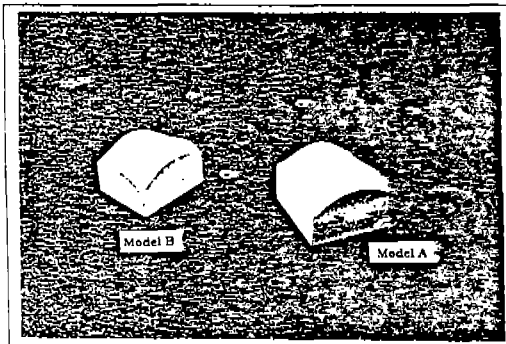


Fig.11 Machined sculptured surfaces.

$\times 80\text{mm}$ 의 같은 크기를 가진다. 기하학적 데이터 베이스를 만든 후 일치하는 절삭 데이터 베이스가 발생된다. 자유곡면의 절삭을 위하여 KIWA (EXCEL-510) CNC 수직 머시닝 센터가 사용되었으며, 절삭된 표면은 그림 11과 같다.

5.2 시스템 설치

실험을 위하여 두 대의 이미지 카메라가 CMM상에 설치되었다. 한 대의 카메라는 CMM의 램(ram)상에 설치되고 이것은 이진 화상처리 기법을 적용하여 표면의 x, y 방향의 길이 및 위치, 방향을 결정하는 데 사용된다. 다른 한 대의 카메라는 CMM의 전면에 설치되고 표면의 최고 높이를 결정하는 데 사용된다. Brown 및 Sharpe (Xcel) 제품의 설치된 좌표측정 기기가 사용되었으며, Allen-Bradly의 화상 카메라는 CMM의 램상에 설치되었다. 몇 개의 컴퓨터 프로그램이 화상처리를 위하여 C언어로 개발되었으며, 화상처리를 위하여 512×512 픽셀격자의 화상을 취하여 128×128 의 픽셀 격자로 압축하였다. 압축된 픽셀 격자로부터 요구되는 정보는 개발된 프로그램을 사용하여 계산되었다. 실험을 위하여 설치된 시스템의 사진이 그림 12에 나타내었다.

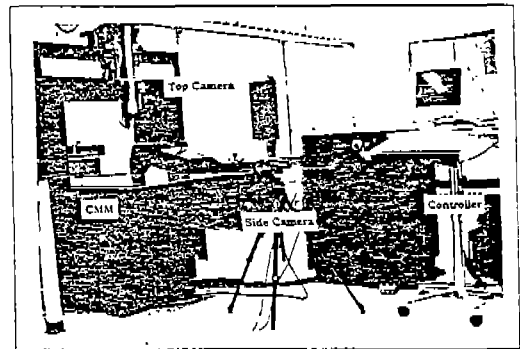
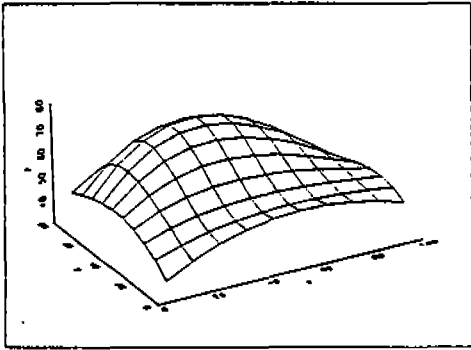


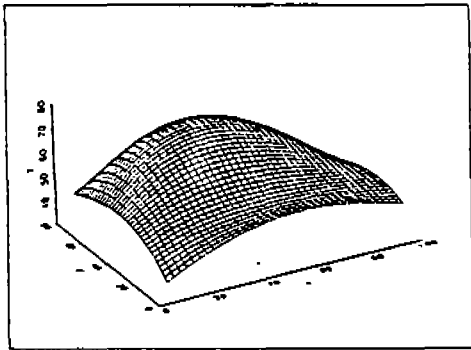
Fig.12 System setup for the proposed method.

5.3 인식과 위치결정

이진화상 기술을 위에서 본 화상에 적용함으로써 목적물의 대략적인 위치와 방향이 결정된다. 제시된 방법은 자동 검사에 적용된다. 표면의 위치, 방향, x 및 y의 방향을 결정한 후, CMM프로브(probe)는, u, v 평면상에서 동일한 간격으로 위치한 10×10 격자점을 측정한다. 측정된 결과는 그림 13(a)에, B스플라인 보간 표면은 그림 13(b)에 도시하였다. 기본층의 성질은 이



(a) Measured data



(b) Surface by B-spline interpolation

Fig. 13 Construction using second method.

진화상 처리기법을 CMM상에 설치된 카메라에 포착된 화상에 직접 적용함으로써 얻었다. 구축된 표면의 특징은 주어진 데이터 베이스와 비교되고 여기서 비일치 측정값과 오차 범위는 10%로 정하였다.

5.4 오차 해석

표면을 조사하기 위하여 미세 위치결정이 적용되었다. 개략 위치결정 과정의 결과는 미세 위치결정을 위한 초기 값으로 사용된다. 올바른 검사 결과를 얻기 위하여 종래의 방법과 제시된 방법을 사용하여 표면을 측정하였다. 측정점의 수는 다른 방법에서와 같이 100개로 정하였으며, 동일한 간격의 측정점을 이용한 오차는 그림 14에서 도시하였다⁽¹⁾. 그림상에서 보면 측정오차는 일반적으로 큰 평균 곡면을 가지는 지역에서 더 크게 되지만, 어떤 구역은 약간 다른 경향을 보인다. 이는 표면의 곡면만이 측정점의 위치를 결정하는 것으로 고려되었기 때문이며, 작은 곡면지역에서의 큰 오차는 평행오차, 회전오차 및 평방오차등의 기계오차에 기인한 것으

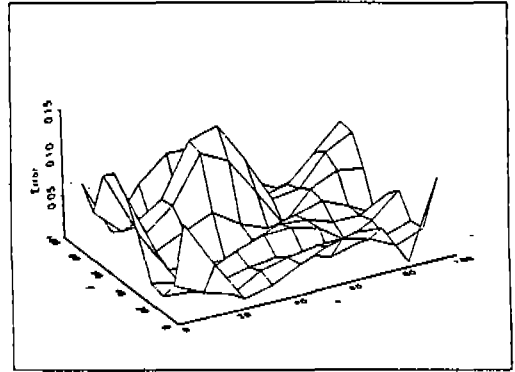


Fig. 14 Measured error plot.

로 사료된다.

6. 결 론

본 연구의 목적은 자유곡면에 대해서 CMM과 화상 시스템을 결합함으로써 새롭고 유연한 검사 시스템을 개발하는 것이다. 제시된 유연 검사 시스템을 이루기 위하여 두개의 연구 영역이 논의 되었다. 즉, 새로운 검사 계획법과 새로운 물체 인식 및 위치결정법이다. 제시된 검사 계획법은 표면의 곡면해석에 근거를 둔 새로운 측정점 선택법을 포함하고, 주어진 표면에 대한 측정 시간을 최소화하는 다양하고 새로운 프로브의 경로 결정법을 포함한다. 미확인 곡면에 대한 부품인식과 위치결정 과정은 "Z층"이라 불리는 새로운 개념을 도입함으로써 쉽게 수행된다. 또한 "Z층"개념을 사용하여 x 및 y방향에서 대칭적 기반을 가지는 표면의 방향은 쉽게 결정될 수 있다. 일련의 실험은 제시된 방법의 유용성을 나타내기 위하여 수행되었으며, 결과는 자유곡면에 대한 유연 검사시스템은 제시된 방법을 적용함으로써 성공적으로 달성될 수 있음을 나타내었다.

참고문헌

1. Cho, M. W., Flexible Inspection System Using CAD Database and Vision Guided Coordinate Measuring Machine, Ph. D. Thesis, University of Illinois at Chicago, IL, 1992.
2. Duffie, N., Bollinger, J., Piper, R.,

- kroneberg M., "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Surface Patch Databases", *Annals of the CIRP*, Vol. 33/1/1984, pp.347~350.
3. Duffie, N. A., Kann, J. A. and Feng, S. C., "Integration of CAD and Inspection for Mold Production and Rework", *Transactions of the NAMRC/SME XV*, 1987, pp.641~648.
 4. Faugeras, O. D. and Hebert, M., "The Representation, Recognition and Locating of 3-D Objects", *The Internal Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, Fall 1986, pp.27~52.
 5. Faux, I. D. and Pratt, M. J., *Computational Geometry for Design and Manufacture*, John Wiley and Sons, New York, N. Y., 1979.
 6. Ferguson, J. C., "Multivariate Curve Interpolation", *Journal ACM*, Vol. 11, No. 2, 1964, PP.221~228.
 7. Ferrelra, P., Puls, F., Chang T. C., and Lir, C. R., "A CAD/CAM System for Complex Surfaces", *Proceedings of Computer-Aided/Intelligent Process Planning*, ASME Winter Annual Meeting, 1985, pp.189~199.
 8. Grimson, W. E. L and Lozano-Perez, T., "Model-Based Recognition and Localization from Sparse Range or Tactile Datd", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 3, Fall 1984, pp.3~35.
 9. Grimson, W. E. L and Lozano-Perez, T., "Localizing Overlapping Parts by Searching the Interpretation Tree", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-9, No. 4, July 1987, pp.469~482.
 10. Gunnarsson, K. T. and Prinz, F. B., "CAD Model-Based Localization of Parts in Manufacturing", *Computer*, August 1987, pp.66~74.
 11. Hopp, T. H. and Hocken, R. J., "CAD-Directed Inspection", *Annals of the CIRP*, Vol. 33/1/1984, pp.357~361.
 12. Horn, B. KP., *Robot Vision*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1986.
 13. Liu, C. and Tsai, W., "3D Curved Object Recognition from Multiple 2D Camera Views", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 50, 1990, pp.177~187.
 14. Lo, C. and Don, H., "3-D Moment Forms : Their Construction and Application to Object Identification and Positioning", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 10, October 1989, pp.1053~1064.
 15. Loney, G. C. and Ozsoy, T. M., "NC Machining of Free Form Surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 17, No. 23/1985, pp.69~76.
 16. Mortenson, M. E., *Geometric Modeling*, John Wiley & Sons, New York, N. Y., 1985.
 17. Part, H. D. and Mitchell, O. R., "CAD Based Planning and Execution of Inspection", *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 1988, pp.858~863.
 18. Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A and Vettering, W. T., *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, New York, N. Y., 1988.
 19. Sahoo, K. C. and Menq, C., "Localization of 3-D Objects Having Complex Sculptured Surfaces Using Tactile Sensing and Surface Description", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, February 1991, pp.85~92.
 20. Sato, Y. and Honda, I., "Pseudodistance Measures for Recognition of Curved Objects", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-5, No. 4, July 1983, pp.362~373.
 21. Takeuchi, Y., Shimizu, H. and Mukai, I.,

Automatic Measurement of 3-Dimensional Coordinate Measuring Machine by Means of CAD and Image Data", Annals of the CIRP, Vol. 39/1/1990, pp. 565~568.

22. Wang, H. P., Hewgill, D. E. and Vickers, G. W., "An Efficient Algorithm for Generating B-Spline Interpolation Curves and Surfaces from B-Spline Approximations",

Communications in Applied Numerical Methods, Vol. 6, 1990, pp. 395~400.

23. Wang, Y. F., Magee, M. J. and Aggarwal, J. K., "Matching Three-Dimensional Objects Using Silhouettes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 4, July 1984, pp. 513~523.

APPENDIX : GEOMETRIC PROPERTIES CALCULATION

a. Area

$$A_{img} = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} b_{ij} \tag{a.1}$$

where b_{ij} is the pixel value of the binary image at the point (x_i, y_j) .
 N_r, N_c are the number of rows and columns of the array.

b. Centroid

$$x_c = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad y_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad \text{where, } m_{pq} = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} b_{ij} (x_i)^p (y_j)^q \tag{a.2}$$

c. Moment of Inertia around the Centroid

$$M_c = \frac{M_{20} + M_{02}}{M_{00}} \quad \text{where, } M_{pq} = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} b_{ij} (x_i - x_c)^p (y_j - y_c)^q \tag{a.3}$$

d. Eccentricity

$$E_c = \frac{(M_{02} - M_{20})^2 + 4M_{11}^2}{M_{00}^2} \tag{a.4}$$

e. Distance Between the Centroids

$$d = [(x_{Bc} - x_{Lc})^2 + (y_{Bc} - y_{Lc})^2]^{\frac{1}{2}} \tag{a.5}$$

where $(x_{Bc}, y_{Bc}), (x_{Lc}, y_{Lc})$ are the centroids of the base and other layers respectively.

f. Inclination

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{y_{Bc} - y_{Lc}}{x_{Bc} - x_{Lc}} \tag{a.6}$$