

# 역공학에서 웨이브렛 변환을 이용한 점 데이터의 선택과 할당

고테조\*, 김희술\*

## Selection and Allocation of Point Data with Wavelet Transform in Reverse Engineering

Tae Jo Ko\*, Hee Sool Kim\*

### ABSTRACT

Reverse engineering is reproducing products by directly extracting geometric information from physical objects such as clay model, wooden mock-up, etc. The fundamental work in the reverse engineering is to acquire the geometric data for modeling the objects. This research proposes a novel method for data acquisition aiming at unmanned, fast, and precise measurement. This is come true by the sensor fusion with CCD camera using structured light beam and touch trigger sensor. The vision system provides global information of the objects located on any place of the table. Then, the touch probe moves to the pre-determined position from the vision data. In this case, the number of data and position allocation for touch sensor is critical in terms of the productivity since the number of vision data is very huge. So, we applied wavelet transform to reduce the number of data and to allocate the position of the touch probe. The simulated and experimental results show this method is good enough for data reduction.

**Key Words** : Reverse engineering(역공학), Sensor fusion(센서융합), Vision(비전), Touch probe(터치 프로브), Wavelet transform(웨이브렛 변환)

### 1. 서론

역공학(reverse engineering)은 실물모형으로부터 기하학적 형상정보를 추출하여 실물을 재생산하는 것으로서, 실물모형이나 clay model, 또는 Mock-up 으로부터 공학적인 설계 데이터인 CAD모형을 만드는 과정이다.<sup>1)~3)</sup> 즉, Fig. 1과 같이 실물모형으로부터 3차원 측정기와 같은 좌표측정기를 이용하여 점 데이터를 획득하고, 획득된 점 데이터를 이용하여 공학적인 설계 데이터인 CAD데이터를 얻고서,

이를 이용하여 NC가공이나 Rapid prototyping 등을 이용하여 최종적으로 역제품을 생산하는 과정이다.

이과정은 크게 형상정보로부터 점 데이터를 획득하는 과정(디지털라이징)과 디지털라이징된 점을 모델링하는 과정으로 나눌 수가 있다. 이중에서 디지털라이징 과정은 역공학을 수행하는데 있어서 가장 시간과 노력이 많이 들어가는 부분이며, 이를 신속하고 정확하게 무인 자동으로 수행하여 점 데이터를 받아 들이는 것은 역공학의 생산성 향상에 있어서 중요한 부분이다. 물체의 형상정보를 획득하기

\* 영남대학교 기계공학부

위해서는 Fig. 2와 같이 셋업계획<sup>1)</sup>, 작동계획<sup>2)</sup>, 집속링 전략<sup>3,12)</sup>, 경로계획<sup>13-15)</sup> 등 다양한 기술이 필요하다.

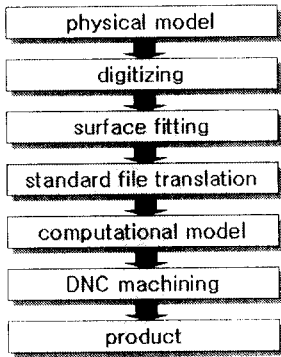


Fig. 1 Process of reverse engineering

디지털이징 계획이 수립이 되면 측정을 하게 되는데, Table 1과 같이 측정 방식에 따라 크게 접촉식과 비접촉식으로 측정하게 된다. 접촉식은 주로 터치 프로브를 이용하여 측정 물체에 직접 접촉하여 점 데이터를 측정하며, 비접촉식은 레이저 스캐너, 빛의 간섭을 이용하는 모아레 측정법, 2대의 카메라를 이용하는 입체 화상법 그리고 구조광을 이용한 측정법 등 다양한 측정법들을 이용한다.<sup>16-20)</sup>

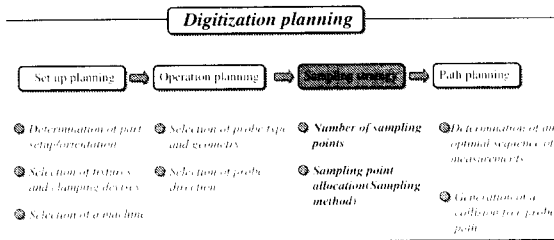


Fig. 2 Digitizing planning for data acquisition

접촉식과 비접촉식은 서로 상반된 특징을 갖는데, 접촉식은 측정 속도가 느린 반면 측정 정밀도가 비접촉식에 비해 높고, 비접촉식은 측정 속도가 빠르지만 측정 정밀도가 접촉식보다 낮다. 따라서 이들 센서 각각의 장점을 이용하는 센서융합을 하게 되면 효율적인 측정을 할 수가 있다. 즉, 3차원

Table 1 Characteristics of digitizing systems

Sensor type	Digitizing speed	Accuracy	Spatial range
Touch probe	slow	1 $\mu\text{m}$	single point
Laser scanner	>2,500pts/sec	10 $\mu\text{m}$	small
Vision system	>10,000pts/sec	100-200 $\mu\text{m}$	large

측정기 상의 임의의 위치에 공작물이 놓여졌다고 할 때, 먼저 비전 시스템으로 거친 점데이터를 측정하여 물체의 전체좌표를 파악한다. 그리고 이 좌표를 이용하여 3차원 측정기의 터치프로브를 구동하게 되면 임의의 위치에 존재하고 있는 물체라도 작업자의 개입없이 무인 자동으로 정확한 점 데이터를 신속하게 얻을 수 있게 된다.<sup>12)-22)</sup>

이 경우 비전 시스템으로 측정된 물체의 데이터 수는 너무 많아서 3차원 측정기의 터치프로브를 운용할 수가 없다. 따라서 거대한 점 데이터중에서 물체를 가장 잘 나타내는 점의 위치와 모형을 모델링하기에 가장 효율적인 점의 개수를 결정하여 접촉식 센서로 최종 점 데이터를 얻는 것은 역공학에 있어서 센서융합을 실현하기 위한 전제조건이다. 이를 위하여 본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 점 데이터의 개수결정과 점 데이터의 할당분배를 다루고자 한다.

## 2. 센서융합 측정시스템

접촉식과 비접촉식 센서를 융합하기 위하여 구성된 측정시스템은 Fig. 3과 같다.

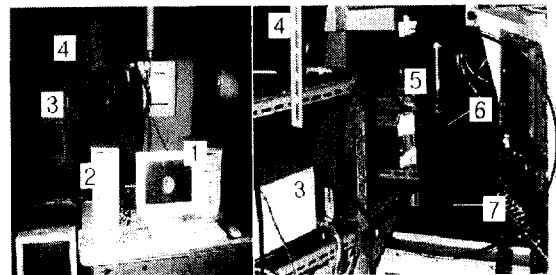


Fig. 3 Measurement system for sensor fusion

Fig. 3에서 [1]은 CCD 카메라(2)로부터 영상을 획득하기 위해 TV 수신카드를 장착한 PC이며, 영상은 24비트 비트맵 파일로 저장된다. [7]은 CNC

공작기계와 DNC 케이블로 서로 연결되어 공작기계 주축에 장착된 터치 프로브의 위치를 제어하며, 또한 카운트 보드가 장착되어 있어 터치 프로브의 탐침봉의 접촉 변위량을 읽어 접촉점의 위치를 측정하는 PC이다. ㉓은 프로젝터(㉔)에서 슬릿빔(slit beam)을 발생시키기 위해서 프로젝터와 연결된 PC이다. ㉕는 흑백 CCD 카메라이며, ㉖은 터치 프로브, ㉗은 민속 탐모형이다.

CCD 카메라로부터 획득된 영상에서 실물 모형의 3D 정보를 얻기 위해서는 먼저 카메라 보정을 실시해야 하는데, 본 연구에서는 CNC 공작기계 주축에 장착된 터치 프로브 탐침봉의 센터 위치를 보정면으로 이용하여 두 면에 대하여 카메라 보정을 실시한다. 이는 센서융합을 위해 CCD의 좌표계와 터치 프로브의 좌표계를 일치시킴과 동시에 보정면에 그리드를 만드는 작업을 없애기 위함이다. 알고 있는 두 평면위치에 대한 카메라 보정이 완료되면 각 면에 대한 보정 행렬을 이용하여 각 면에 투사되는 프로젝터의 슬릿빔을 보정한다. 캘리브레이션 과정들은 참고문헌 [21]에 잘 기술되어 있다.

이와 같이 카메라와 프로젝터 보정을 완료한 후 측정 물체를 CNC 공작기계 테이블 위에 올려놓고 측정을 실시하여 실물 모형의 거친 점 데이터를 측정한다. 그 다음 측정된 거친 점 데이터의 정보를 이용하여 터치 프로브가 장착된 공작기계를 구동시켜 자동적으로 실물 모형의 최종 3D 점 데이터를 Fig. 3의 터치 프로브(㉖)와 PC(㉔)로부터 얻는다. 이 과정에서 비전 데이터를 전부 사용할 수가 없기 때문에 본 연구에서는 점 데이터의 할당과 선택에 대해 기술한다.

### 3. 웨이블릿 변환

#### 3.1 연속 웨이블릿 변환

푸리에 변환이 주파수 영역에 대해서만 분해능을 갖는 것에 비해, 주파수와 함께 시간에 대한 분해능을 동시에 표현하려는 방법 중의 하나가 웨이블릿 변환이다. 웨이블릿 변환에서는 스케일링(scaling)과 이동(translation)이 가능한 웨이블릿을 모든 데이터를 따라 이동시키면서 각각의 점에 대해 스펙트럼을 구하고, 반복하여 스케일을 변경하여 이 과정을 계속하여 그 결과를 모두 구한 것이다.[23] 이러한 이유 때문에 이 결과를 시간-스케일 표현이라고 한다.

연속 웨이블릿 변환은 식 (1)과 같다.

$$\chi(s, \tau) = \int f(t) \Psi_{s, \tau}^*(t) dt \quad (1)$$

여기서 \*는 complex conjugate를 나타낸다. 식 (1)의 의미는 함수  $f(t)$ 를 웨이블릿이라고 하는 기저함수  $\Psi_{s, \tau}(t)$ 의 집합으로 분해하는 것이다. 변수  $s$ 와  $\tau$ 는 각각 스케일과 이동을 나타내는 것으로, 웨이블릿 변환후에 나타나는 새로운 차원이다. 웨이블릿은 모 웨이블릿(mother wavelet)인 단일  $\Psi(t)$ 로부터 식 (2)와 같이 만들어진다.

$$\Psi_{s, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2)$$

여기서  $s^{-1/2}$ 는 서로 다른 스케일 사이의 에너지 평균화를 위해 필요한 인자이다. 모 웨이블릿은 admissibility조건과 regularity조건을 만족해야 하는 함수로서[24], Fig. 4와 같이 Haar, Daubechi, Coiflet, Symmlet등의 모 웨이블릿이 사용된다.

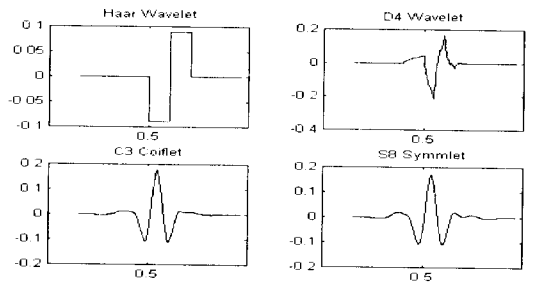


Fig. 4 Different mother wavelets

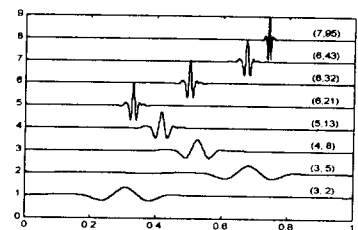


Fig. 5 Some S8 Symmlets at various scales and locations

Fig. 5는 모 웨이브렛을 이용하여 스케일을 변경하고 시간영역을 이동시킬 때의 각각의 웨이브렛을 나타낸 것이다.

이 그림에서 스케일이 큰 것은 원거리를 보는 것같이 저주파 신호를 보는 것이고, 스케일이 작은 것은 상세한 것을 보는 것으로서 사진기에서의 zoom-in 역할을 하게된다.

한편, 연속 웨이브렛에 대한 역변환은 식 (3)과 같다.

$$f(t) = \int \int \chi(s, \tau) \Psi_{s, \tau}(t) d\tau ds \quad (3)$$

### 3.2 이산 웨이브렛 변환

식 (1)을 해석적으로 계산하는 것은 거의 불가능하다. 또한 식 (1)을 이용하여 웨이브렛 변환을 한다 하더라도 거기에는 필요없는 잉여 웨이브렛 계수가 너무 많이 존재하게 된다. 따라서 보다 실용적으로 변환을 하기 위하여 식 (4)와 같은 이산 웨이브렛을 사용한다.

$$\Psi_{j, k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \Psi\left(\frac{t - k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad (4)$$

여기서  $j$ 와  $k$ 는 정수이고,  $s_0 > 1$ 은 고정 팽창 폭이다. 일반적으로  $s_0 = 2$ ,  $\tau_0 = 1$ 로 하게 되는데, 이렇게 하면 Fig. 6과 같이 2진 샘플링이 된다. 이는 스케일이 증가할수록 2진으로 다운 샘플링됨을 의미한다.

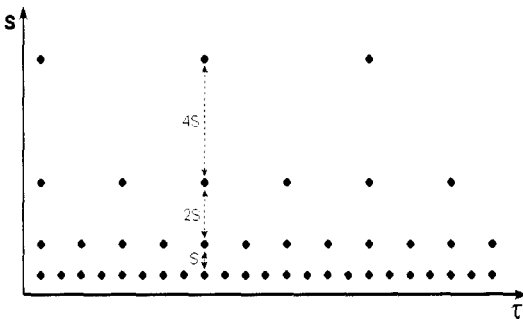


Fig. 6 Localization of the discrete wavelets in the time-scale space on a dyadic grid

그런데 식 (5)와 같이 함수  $f(t)$ 를 푸리에 변환할 때, 시간을 짧게 하면 스펙트럼 폭은 늘어나고, 스펙트럼을 고주파 쪽으로 이동시키는 역할을 한다. 결국 시간영역의 모 웨이브렛을 스케일링하여 스펙트럼을 구하면 Fig. 7과 같이 된다.

$$F\{f(at)\} = \frac{1}{|a|} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (5)$$

이는 일정 Q 필터뱅크와 같은 성질을 가지게 된다.

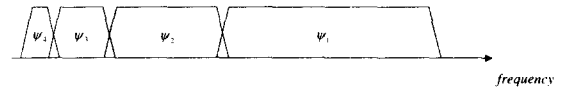


Fig. 7 Touching wavelet spectra resulting from scaling of the mother wavelet in the time domain

결국 이산 웨이브렛을 구하는 것은 Fig. 8과 같이 신호를 연속적으로 필터뱅크에 통과시킨 값이 된다. 즉, 신호를 저주파 및 고주파 통과필터를 통과시켰을 때, 고주파 통과필터를 거친 신호를 다운 샘플링한 것이 웨이브렛 계수가 된다. 저주파 통과필터를 거친 신호는 다운 샘플링을 한 후, 다시 고주파 및 저주파 통과필터를 거치게 되고 이 과정이 계속되면 최종적으로 저주파 통과필터를 거친 신호 한 개만 남는다. 따라서 이 값과 함께 고주파 통과필터를 거친 값들을 전부 합치면 원래 신호의 개수와 동일한 개수가 된다.

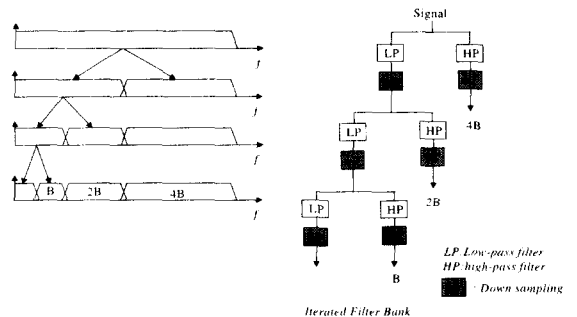


Fig. 8 The process of multi-resolution analysis for discrete wavelet transform

이상과 같이 이산 웨이브렛 변환은 필터뱅크에 신호를 통과시킴으로써 해석적 계산없이 간단히 구할 수가 있다. 따라서 이 과정을 다단계 분해능 해석(MRA: Multi-resolution analysis)이라고 한다. 이렇게 하여 이산 웨이브렛 계수가 구해지면 식 (6)과 같이 직교 웨이브렛 기저함수에 계수로 가중된 값을 합하여 임의의 신호를 재생함으로써 역 웨이브렛 변환을 할 수가 있다.

$$f(t) = \sum_{j,k} \gamma_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

#### 4. 문턱값 결정과 새로운 디지털이징 점 결정

센서융합을 하기 위하여 비전 시스템으로부터  $n$ 개의 데이터를 받고, 이를 이산 웨이브렛 하면  $n$ 개의 웨이브렛 계수가 생긴다. 이 계수는 전체 신호의 세기에 많은 영향을 주는 것부터 그렇지 않은 것이 있다. 따라서 적합한 문턱값을 적용함으로써 원래 신호가 가지고 있는 특성을 잃지 않고 동시에 효과적으로 터치센서의 접촉위치를 결정해주는 것은 중요하다.

안정적인 신호의 재구축을 위한 필요 충분조건은 식(7)과 같이 웨이브렛 계수의 에너지가 두 양의 한계사이에 존재해야 한다. <sup>[25]</sup>

$$A\|f\|^2 \leq \sum_{j,k} |\langle f, \Psi_{j,k} \rangle|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (7)$$

여기서  $\|f\|^2$ 는  $f(t)$ 의 에너지이며,  $A, B$ 는  $f(t)$ 에 독립적이고,  $A > 0, B < \infty$ 이다. 한편, 웨이브렛의 직교성질 때문에 신호와 웨이브렛 계수사이의 식 (8)과 같은 성질을 갖는다.

$$\sum_n |f(n)|^2 = \sum_{j,k} |\gamma_{j,k}|^2 \quad (8)$$

따라서  $\hat{\gamma}_n, n=1, 2, \dots, 2^N$ 이  $\gamma_{j,k}$ 를 내림차순으로 분류한 것이라고 하면, 선택되어지는 웨이브렛 계수의 수  $M$ 은 에너지 문턱값  $\delta$ 를 사용하여 식 (9)와 같이 결정할 수가 있다.

$$M = \min \left( \frac{\sum_{n=1}^m \hat{\gamma}_n^2}{\sum_{n=1}^{2^N} \hat{\gamma}_n^2} \right) \geq 1 - \delta \quad (9)$$

여기서  $\delta$ 는 통상 데시벨(db)로 표시되며, 따라서 이 방법은 신호 전체 에너지에 대해 최소한  $1 - \delta$  비율만큼 웨이브렛을 선택하는 것이다.

한편 이렇게 하여 선택할 웨이브렛 계수를 결정하게 되면, 이 값이 실제 디지털이징을 할 때는 어느 점에 해당하는지를 결정하여야 한다. 새로운 디지털이징 점의 할당은 식 (10)과 같이 된다.

$$2^{N-j-1} + 2^{N-j} \cdot k \quad (10)$$

여기서  $j$ 와  $k$ 는 특정 웨이브렛  $\Psi_{j,k}$ 의 스케일과 이동을 나타내는 값이다. 따라서 식 (10)은 결국 이산 웨이브렛 변환시에 다른 샘플링을 한 것을 역으로 환산함으로써 새로운 디지털이징 점을 계산하는 것이고, 이 점이 터치프로브가 움직일 점이 된다.

### 5. 디지털이징 결과

#### 5.1 시뮬레이션

Fig. 9는 도플러 신호에 대한 웨이브렛 변환과 디지털이징 점의 선택에 관한 예제이다.

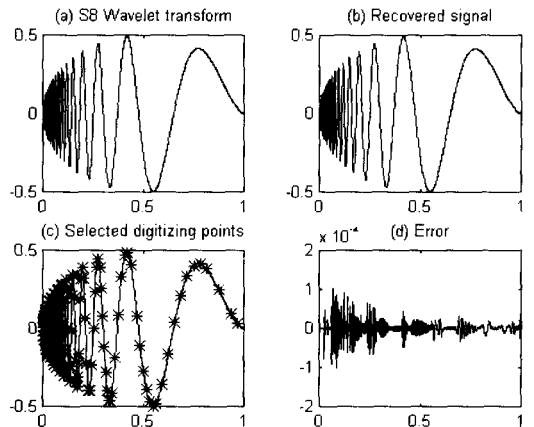


Fig. 9 Simulation results of Doppler signal

이 신호는 2148개의 원신호로 되어 있으며, 에너지 문턱값을 -85db로 했을 때 369개의 웨이브렛 계수를 선택하게 된다. 즉, 데이터 감소율이 82%에 이른다. 이 값과 식 (6)을 이용하여 신호를 재생하면 Fig. 9(b)와 같이 되고, 원신호(Fig. 9(a))에서 이 값을 빼면 오차인 Fig. 9(d)가 된다. 그림에서 보는 바와 같이 오차는 매우 작다.

한편 선택된 웨이브렛 계수로 식 (10)을 이용하여 새로운 디지털이징 점을 찾은 것이 Fig. 9(c)이다\*. 그림에서 보는 바와 같이 주파수가 매우 빠르고 주파 영역에 대부분의 점들이 존재하고, 저주파 영역으로 갈수록 점들이 적게 존재한다. 이는 비전 시스템으로 받은 데이터에 대해 웨이브렛 변환을 하고, 이 값을 기준으로 계수를 선정한 후 새로운 디지털이징 점을 구하면 물체가 가지고 있는 특성을 잘 표현할 수 있음을 의미한다.

한편 Fig. 10은 2차원 자유곡면 데이터(Fig. 10(a))에 대한 결과이다. 데이터 수는 총 4096개이고, 문턱값은 -85db이다. 이렇게 하면 총 1638개의 웨이브렛 계수가 선택이 되고, 데이터 감소율은 60%에 이르게 된다. 이때 웨이브렛 변환을 한 것은 Fig. 10(b)와 같은데, 2차원 웨이브렛에서는  $x$ 와  $y$  방향으로 웨이브렛 변환이 일어나기 때문에 공간상으로 값이 존재한다. Fig. 10(c)는 선택된 계수로 신호를 재생한 결과이고, Fig. 10(d)는 새로이 선정된 디지털이징 점이다.

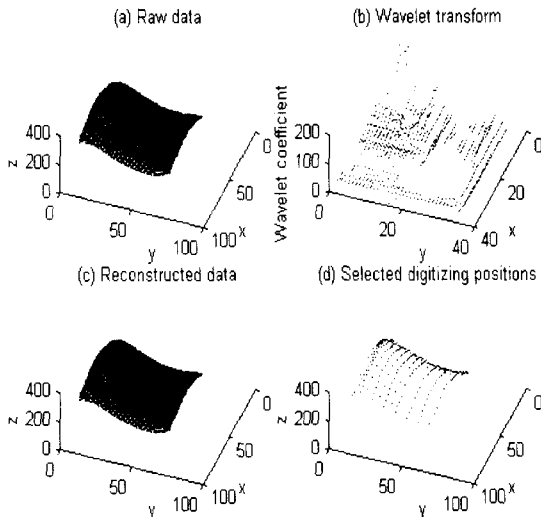


Fig. 10 Simulation results of 2-D signal

그러나 이 경우는 데이터 감소율이 Fig. 9의 경우보다도 작고, 이는 에너지 문턱값을 조정함에 의해 감소율을 조정할 수가 있다. 즉 에너지 문턱값을 -45db로 하면 557개의 점을 선택하고, 데이터 감소율이 86.5%로 된다. 이상의 시뮬레이션 결과로부터 웨이브렛 변환기법은 새로운 디지털이징 점을 잘 결정해줄 수 있음을 알았다.

## 5.2 실험

2장에서 설명한 센서융합 디지털이징 시스템으로부터 먼저 병의 단면 데이터를 비전으로 받은 것이 Fig. 11(a)이다. 이 단면의 데이터는 총 1024개의 점으로 구성되어 있으며, 이를 Symmlet 모 웨이브렛 함수를 이용하여 웨이브렛 변환을 하면 Fig. 11(b)와 같이 계수값들을 구할 수가 있다. 이 데이터에 대해 -85db의 문턱값을 설정하면 107개의 계수를 얻을 수가 있으며, 이 계수는 Fig. 11(d)와 같은 위치를 나타낸다. 이 값을 이용하여 2장의 센서융합 시스템의 터치센서 프로브를 구동하게 된다. 이렇게 하면, 임의위치에 놓여진 물체정보를 비전 정보로 구해내고, 또한 터치 프로브의 구동위치를 결정해냄으로써 무인으로 신속하고 정확한 디지털이징 점을 추출해낼 수가 있다.

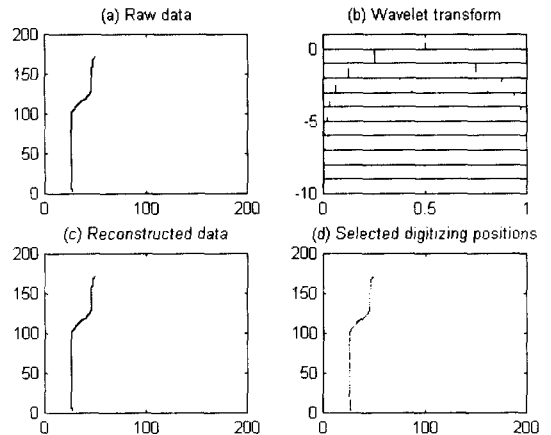


Fig. 11 Experimental results of 1-D signal

이 값을 이용하여 재생을 한 신호는 Fig. 11(c)와 같이 되는데, 원래 신호를 잘 나타내고 있음을 알 수가 있다. 이때의 신호감소율은 90%에 해당된다. Fig. 11(d)의 점들을 자세히 보면, 곡률이 급한

부분에는 점들이 많이 존재하고, 그렇지 아니한 부분에는 상대적으로 데이터의 밀도가 적다. 이 특성은 이미 Fig. 9의 결과에서 잘 설명이 되었다.

한편 Fig. 12(a)는 비전 시스템을 이용하여 얼굴 모형을 2차원 신호로 획득한 것이다. 이 데이터는 총 4096개의 점으로 구성되어 있으며, 이를 Symmlet 모 웨이블릿 함수를 이용하여 웨이블릿 변환을 하면 Fig. 12(b)와 같이 계수값들을 구할 수가 있다. 시뮬레이션 결과인 Fig. 10(b)와 마찬가지로 계수값들은 공간상에 존재하게 된다. 이 데이터에 대해 -45db의 문턱값을 설정하면 879개의 계수를 얻을 수가 있으며, 이 계수는 Fig. 12(d)와 같은 공간상의 위치를 나타낸다. 이 값을 이용하여 재생성을 한 신호는 Fig. 12(c)와 같이 되는데, 원래 신호를 잘 나타내고 있고, 신호감소율은 79%에 해당된다. 물론 이 경우에도 데이터의 감소율은 문턱값을 조정함에 의해서 조절을 할 수 있는데, 최적의 문턱값을 어떻게 잡아야 하는지에 관한 연구는 추가로 필요하다.

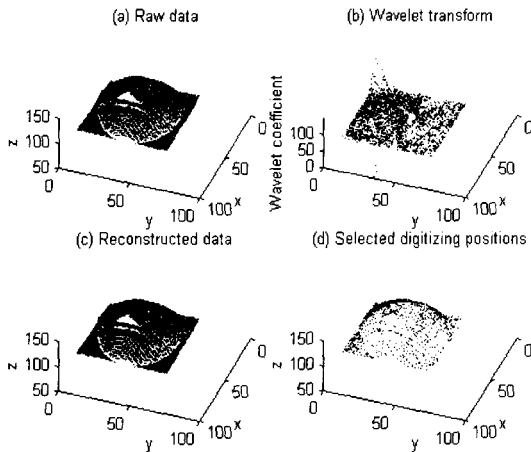


Fig. 12 Experimental results of 2-D signal

## 6. 결론

본 연구는 역공학에 있어서 가장 기본인 물체정보로부터 형상정보를 무인으로 정확하고 신속하게 획득하는 방법에 관한 것이다. 이를 위해서 비접촉 방법인 비전 시스템과 접촉방법인 터치센서를 이용하여 융합을 하도록 하였다. 이를 위해서 우선 CCD영상과 터치프로브의 좌표를 일치화 시켜야

하며, 이는 CCD 카메라의 캘리브레이션을 터치 프로브를 이용하여 수행함으로써 가능했다.

한편 미지의 위치에 놓여진 아무런 공간상의 위치정보를 알지 못하는 측정물체에 대해서 구조광인 슬릿 빔을 이용하여 물체의 영상을 획득하는데, 이 데이터를 이용하여 터치프로브를 구동하게 되면 무수히 많은 점 데이터를 측정해야 하는 어려움이 있다. 이 점 데이터중에서 가장 물체의 기하정보를 잘 나타낼 수 있는 데이터와 그 수를 결정하는 것이 중요한 이슈가 된다. 이를 위해 본 연구에서는 웨이블릿 변환을 이용하여 중요도가 높은 계수에 에너지 개념으로 선정을 하고, 선정된 계수를 이용하여 역으로 공간상의 위치를 재할당하는 방법을 제시했다. 그 결과 본 연구에서 제시하는 방법을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한 결과 잘 작동함을 알 수가 있었다.

그러나 본 연구에서 제안하는 방법은 데이터의 개수에 있어서 제약을 준다. 즉, 웨이블릿 변환은 2진 다운 샘플링 구조로 되어 있기 때문에 데이터 개수는 2의 멱급수로 존재해야 한다. 따라서 데이터의 개수가 임의의 2의 멱급수에 미치지 못하면 dummy로 일정 숫자를 추가해야 하는 번거로움을 가져다준다. 따라서 이런 문제에 대한 추가적인 보완이 이루어지면 무인으로 물체의 형상을 신속하고 정확하게 측정하는 시스템이 가능할 것이다.

## 참고문헌

1. T. Varady, R. R. Martin, J. Cox, "Reverse engineering of geometric models-an introduction," *Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
2. A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Swieszkowski, Z. Lechniak, "Reverse engineering of free-form surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 128-132, 1998.
3. L. C. Chen, G. C. I. Lin, "A vision-aided reverse engineering approach to reconstructing free-form surfaces," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, pp. 323-336, 1997.
4. S. W. Kim, Y. B. Choi, J. T. Oh, "Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase-shifting grating projection moire

- topography," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 389-401, 1999.
5. C. K. Song, S. W. Kim, "Reverse engineering: autonomous digitization of free-formed surfaces on a CNC coordinate measuring machine," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 7, pp. 1041-1051, 1997.
  6. S. Kweon, D. J. Medeiros, "Part orientations for CMM inspection using dimensioned visibility maps," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 9, pp. 741-749, 1998.
  7. J. Jackman, D. K. Park, "Probe orientation of coordinate measuring machine systems using design models," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 14, pp. 229-236, 1998.
  8. S. D. Phillips, B. Borchardt, W. T. Estler, J. Buttress, "The estimation of measurement uncertainty of small circular features measured by coordinate measuring machines," *Precision Engineering*, Vol. 22, pp. 87-97, 1998.
  9. A. Weckenmann, H. Eitzert, M. Garmer, H. Weber, "Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology," *Precision Engineering*, Vol. 17, pp. 244-252, 1995.
  10. Y. F. Zhang, A. Y. C. Nee, J. Y. H. Fuh, K. S. Neo, H. K. Lot, "A neural network approach to determining optimal inspection sampling size for CMM," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 161-169, 1996.
  11. T. C. Woo, R. Liang, C. C. Hsieh, N. K. Lee, "Efficient sampling for surface measurement," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 5, 1995.
  12. G. Lee, J. Mou, Y. Shen, "Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine," *Int. J. Mach. Tools. Manufact.* Vol. 37, No. 7, pp. 917-934, 1997.
  13. H. T. Yau, C. H. Menq, "Automated CMM path planning for dimensional inspection of dies and molds having complex surfaces," *Int. J. Mach. Tools. Manufact.* Vol. 35, No. 6, pp. 861-876, 1995.
  14. K. C. Fan, M. C. Leu, "Intelligent planning of CAD-directed inspection for coordinated measuring machines," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 11, pp. 43-51, 1998.
  15. L. Qu, G. Xu, G. Wang, "Optimization of the measuring path on a coordinate measuring machine using genetic algorithm," *Measurement*, Vol. 23, pp. 159-170, 1998.
  16. Q. J. Peng, M. Loftus, "A new approach to reverse engineering based on vision information," *Int. J. Mach. Tools. Manufact.* Vol. 38, pp. 881-899, 1998.
  17. M. Viceconti, C. Zannoni, L. Pierotti, "TRI2SOLID: an application of reverse engineering methods to the creation of CAD models of bone segments," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 56, pp. 211-220, 1998.
  18. C. Menq, F. L. Chen, "Curve and surface approximation from CMM measurement data," *Computers ind. Engng*, Vol. 30, NO. 2, pp. 211-225, 1996.
  19. L. C. Chen, G. C. I. Lin, "A vision-aided reverse engineering approach to reconstructing free-form surfaces," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, pp. 323-336, 1997.
  20. S. W. Kim, Y. B. Choi, J. T. Oh, "Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase-shifting grating projection moire' topography," *Int. J. Mach. Tools. Manufact.* Vol. 39, pp. 389-401, 1999.
  21. 이현직, 고태조, 김희술, "센서융합을 통한 효과적인 디지털이징에 의한 역공학," 한국정밀공학회 추계학술대회, 서울(고려대학교), 1999. 11. 20. pp.419-422.
  22. M. W. Cho, M. K. Kim, K. Kim, "Flexible inspection system based on a vision guided coordinate measuring machine," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1433-1448, 1995.
  23. C. K. Chui, *An introduction to wavelets*, Academic Press, Boston, 1992.
  24. Y. Sheng, "Wavelet transform" In: *The transforms and applications handbook*. Ed. by A. D. Poularikas, pp. 747-827, CRC Press, 1996.
  25. I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets*, 2nd ed. Philadelphia: SIAM, 1992.