

Fringe Projection Profilometry를 개선한 효율적인 3D 측정 기법

김호중^{1*} · 조태훈²

An Efficient 3D Measurement Method that Improves the Fringe Projection Profilometry

Ho-Joong Kim^{1*} · Tai-Hoon Cho²

^{1*}Department of Computer Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

²School of Computer Science and Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

요 약

기술이 발전하면서 카메라를 통해 3D 측정을 하는 방법은 계속 발전되어왔고 최근에는 여러 주기의 fringe pattern을 이용한 측정 방법을 쓰고 있다. 본 논문에서는 여러 주기의 fringe pattern을 이용한 3D 측정 방법에 대한 기존 방법의 문제점을 제시하고, 이에 대한 해결 방안으로 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법을 제안한다. 이를 이용하면 새로운 물체에 대해서 매번 여러 주기의 fringe pattern을 조사하지 않고 물체의 절대위상을 얻을 수 있다. 따라서 제안하는 방법을 이용하면, 측정단계에서 취득하는 영상의 개수가 적기 때문에 보다 빠른 속도로 3D 측정을 할 수 있다. 실험을 통하여 제안하는 방법의 유용성을 보였다.

ABSTRACT

As technologies evolve, diverse 3D measurement techniques using cameras and pattern projectors have been developed continuously. In 3D measurement, high accuracy, fast speed, and easy implementation are very important factors. Recently, 3D measurement using multi-frequency fringe patterns for absolute phase computation has been widely used in the fringe projection profilometry. This paper proposes an improved method to compute the object's absolute phase using the reference plane's absolute phase and phase difference between the object and the reference plane. This method finds the object's absolute phase by adding the difference between the reference plane's wrapped phase and the object's wrapped phase to the reference plane's absolute phase already obtained in the calibration stage. Through this method, there is no need to obtain multi-frequency fringe patterns about new object for the absolute phase computation. Instead, we only need the object's phase difference relative to the reference planes's phase in the measurement stage.

키워드 : 고속 처리, 절대 위상, 정확성, Fringe projection, 3D 측정

Key word : Absolute phase, Fringe projection, Fast speed, High accuracy, 3D measurement

Received 14 June 2016, Revised 20 June 2016, Accepted 04 July 2016

* Corresponding Author Ho-Joong Kim(E-mail:hjhjhjof@gmail.com, Tel:+82-41-560-1114)

Department of Computer Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.10.1973>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

물체의 3D 측정을 위한 효과적인 방법으로 여러 가지 방법이 존재하고 개선되어 왔다. 그 중에서도 Fringe Projection Profilometry (FPP)는 빠른 처리 속도, 정확성, 쉽게 할 수 있는 점, 여러 물체가 섞여 있어도 처리가 가능한 점 등의 이점이 있어 실제로 3D 측정에 많이 쓰이고 있는 방법이다. FPP는 특정한 함수에 의해 만들어진 프린지 패턴(fringe pattern)을 물체에 뿌려 얻은 위상 정보를 통해 물체의 높이를 측정하는 방법이다. 이 방법을 더욱 효과적으로 사용하기 위한 방법이 논문[1]에 소개되고 있는데, 간단히 살펴보자면 네 가지로 볼 수 있다. 네 가지로는 디지털 프로젝션의 감마 보정, 시스템 요소의 임의적 구성, 프린지 패턴의 위상 언래핑(phase unwrapping), least-squares inverse 접근에 의한 시스템 캘리브레이션이 있다.

이 네 가지 방법에 의해 3D 측정이 잘 되었지만, 새로운 물체의 높이를 측정하려고 할 때마다 여러 번의 프린지 패턴을 뿌려 영상을 얻어야 하는 문제점이 있다. 이는 어느 물체의 높이 측정을 실시간으로 처리하는데 있어서 번거로운 작업이 아닐 수 없다. 이를 해결하기 위해서 본 논문은 프린지 패턴을 매번 뿌리는 작업을 대체할 방법에 착안하였다. 따라서 본 논문에서는 논문[1]에서 소개된 방법을 간단하게 설명한 뒤에, 이 방법의 문제점과 해결방안을 제시하고 여러 데이터에 대해 실험한 결과를 소개하고자 한다.

II. 선행 연구

앞서 말했듯이 이번 장에서는 논문[1]에서의 3D 측정 방법을 간략하게 소개하고, 이 방법의 취약한 점을 제시하고자 한다.

2.1. 임의의 시스템 구성

FPP를 이용한 3D 측정 방법은 보통 시스템의 구조를 정해진 위치와 각도에 위치시켜야 하고 여러 파라미터를 미리 구해놓아야 한다는 단점이 있다. 이 대신에 시스템을 일반적인 구성으로 함으로써 물리적인 조정이나 여러 파라미터를 구할 필요가 없어지게 하였고, 시스템 구성의 위치와 각도를 임의로 설치할 수 있

게 하였다. 게다가 관찰할 물체의 측정 범위를 넓힐 수 있고 크기나 모양을 다양하게 측정할 수 있다.

2.1.1. 3D 모양 결정 알고리즘

높이를 구하기 위해서 사용하는 수식은 다음과 같다.

$$z = \frac{1 + C_1\phi + (C_2 + C_3\phi)i + (C_4 + C_5\phi)j + (C_6 + C_7\phi)i^2 + (C_8 + C_9\phi)j^2 + (C_{10} + C_{11}\phi)ij}{D_0 + D_1\phi + (D_2 + D_3\phi)i + (D_4 + D_5\phi)j + (D_6 + D_7\phi)i^2 + (D_8 + D_9\phi)j^2 + (D_{10} + D_{11}\phi)ij} \quad (1)$$

이 공식은 논문[2]에서 소개되고 있는 공식을 확장시킨 것으로서 $C_1 \sim C_{11}$, $D_0 \sim D_{11}$ 은 기하학, 시스템 파라미터와 관련된 계수로써 3D 측정 전에 결정되어 있어야 할 계수이다. 계수를 구하는 방법에 대해서는 이후에 설명하고자 한다. 기존의 FPP는 일정한 구성을 꼭 해야만 했지만 위의 공식을 따르면 임의적이고 일반적인 구성으로도 쉽게 계산해낼 수 있는 장점이 있다. 게다가 이 공식은 기준면의 위상과의 차이를 구할 필요가 없는 장점도 가지고 있다.

2.2. 여러 주기의 프린지 패턴에 의한 Phase unwrapping

FPP기반 기술은 전 영역에 대한 랩 위상(wrapped phase) 분포를 구하기 위해서 위상 천이(phase shifting) 개념을 사용한다. 그리고 이 랩 위상을 반드시 언랩(unwrap)을 해주어야 실제 위상 분포를 얻을 수 있다. 이 언랩의 작업을 얼마나 정확하고 빠르게 하느냐가 중요한 고려 사항이 되고 있는데, 이를 위해서 여러 주기를 이용한 프린지 프로젝션(Fringe projection)방법을 이용한다. 이는 주기가 다른 여러 개의 프린지 패턴을 여러 번 뿌려 영상을 얻은 후, 제일 작은 주기의 패턴 영상을 큰 주기의 패턴 영상을 이용하여 계층적으로 언랩하는 방법이다.(논문[3-5]) 이 방법을 사용하면 복잡한 모양의 분리된 여러 물체에 대해서도 언랩 위상(unwrapped phase)을 얻을 수 있는 장점이 있다. 큰 주기의 프린지 패턴을 이용하여 작은 주기의 프린지 패턴을 언랩하는 수식은 식 (2)와 같다. 이때 i 는 i 번째 프린지 패턴을 의미하고, uw 과 w 는 각각 언랩 위상, 랩 위상을 의미한다. n 은 주기가 다른 프린지 패턴의 개수를 의미한다. f 는 i 번째의 주기를 나타내는데 $f_n > f_{n-1} > \dots > f_1=1$;을 만족한다.

$$\phi_i^{uw} = \phi_i^w + INT\left(\frac{\phi_{i-1}^{uw}(f_i/f_{i-1}) - \phi_i^w}{2\pi}\right) \cdot 2\pi, \quad (2)$$

$$i = 2, 3, \dots, n$$

또, INT는 소수의 반올림을 취하는 연산자를 의미한다. 마지막으로 ϕ^w 는 위상 천이 알고리즘에 따라 얻어진 램 위상 값을 의미하고 $\phi_1^{uw} = \phi_1^w$ 을 만족한다. 이 방법은 속도 측면에서 우수하고 여러 물체에 대해 추가적인 처리과정 없이 측정할 수 있는 장점이 있다.

2.3. Least-squares inverse 방법에 의한 시스템 캘리브레이션

앞서 말했듯이 3D 측정을 위해서는 식 (1)의 $C_1 \sim C_{11}$, $D_0 \sim D_{11}$ 을 미리 구해놓아야 한다. 이를 위해서 least-squares inverse 방법을 이용하여 구하는데, 기준면과 높이를 알고 있는 게이지 블록에서 샘플 포인트를 잡아 구하게 된다.

$$S = \sum_{k=1}^m (F_C - F_D z_k^g)^2, \quad (3)$$

$$F_C = 1 + C_1 \phi_k + (C_2 + C_3 \phi_k) i_k + (C_4 + C_5 \phi_k) j_k + (C_6 + C_7 \phi_k) i_k^2 + (C_8 + C_9 \phi_k) j_k^2 + (C_{10} + C_{11} \phi_k) i_k j_k \quad (4)$$

$$F_D = D_0 + D_1 \phi_k + (D_2 + D_3 \phi_k) i_k + (D_4 + D_5 \phi_k) j_k + (D_6 + D_7 \phi_k) i_k^2 + (D_8 + D_9 \phi_k) j_k^2 + (D_{10} + D_{11} \phi_k) i_k j_k \quad (5)$$

이때, S 가 최소가 되게 하는 계수들을 찾으려면 되는데 z_k^g 는 기준면과 게이지 블록의 높이를 의미하고, k 는 각 면의 유효한 포인트들의 개수이며 m 은 샘플 포인트의 총 개수를 의미한다. 이렇게 least-squares inverse 방법을 사용하여 계수를 구하면 이를 이용하여 3D 측정을 할 수 있게 된다.

III. 제안 방법

앞서 설명했던 방법들을 간략하게 정리해 보면 기준면과 높이를 미리 알고 있는 게이지 블록에 여러 주기의 프린지 패턴을 뿌려 영상을 얻은 후, 큰 주기의 프린지 패턴 영상을 이용해 제일 작은 주기의 프린지 패턴 영상을 언랩한다. 이렇게 하면 실제 위상 분포인 절대 위상을 얻을 수 있게 되고 이 정보를 통해 $C_1 \sim C_{11}$, $D_0 \sim$

D_{11} 의 계수를 구하게 된다. 이 계수가 곧 물체의 3D 측정을 위한 값들이고, 이를 이용해 물체의 절대위상을 구하면 높이를 측정할 수 있는 것이다. 하지만, 새로운 물체의 높이를 측정할 때마다 주기가 다른 여러 프린지 패턴을 매번 뿌려 절대위상을 얻어야 하는 문제가 있는데 이점은 측정 속도 측면에서 보았을 때 매우 효과적이지 않은 것을 직관적으로 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위의 문제점에 대한 해결방안으로 3D 측정을 할 때 여러 주기의 프린지 패턴을 뿌릴 필요가 없는 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법을 제안한다.

3.1. 절대 위상

절대 위상이란 위치에 따라 고유한 위상 값을 갖는 것을 의미한다. 이를 구하기 위해서 여러 방법을 쓸 수 있는데, 본 논문에서는 비교를 위해 두 가지 방법을 사용하였다. 영상의 중심에 중심선을 뿌려 얻은 영상을 이용하여 구하는 방법과 영상 전체에 프린지 패턴이 한 주기보다 적게 들어가게 하여 얻은 영상을 이용해 언랩하는 방법이 있다.

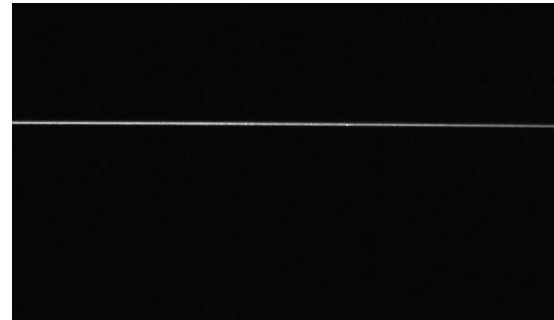


Fig. 1 Center line image

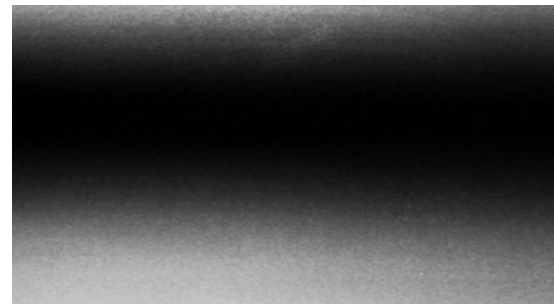


Fig. 2 Largest period image

그림 1에는 중심선을 뿌린 영상의 예시가 나와 있고, 그림 2에는 두 번째 방법이었던 큰 주기를 뿌린 영상의 예시가 나와 있다. 이런 영상을 이용해서 절대 위상을 구할 수 있는데, 첫 번째 방법은 중심선에 해당하는 위상 값들의 평균을 구하여 언랩 위상에서 빼주는 방법이고, 두 번째 방법은 작은 주기 영상들의 언래핑 자체를 그림 2의 영상을 이용하는 방법이다. 그림 3에는 이렇게 만들어진 절대 위상이 나와 있다.

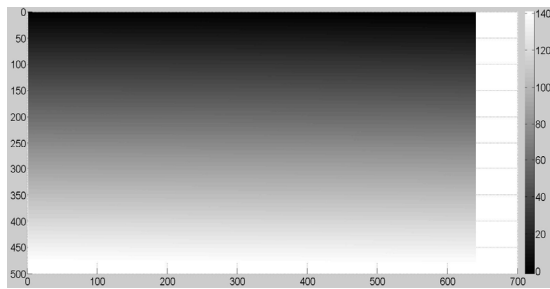


Fig. 3 Absolute phase

3.2. 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법

앞서 말했듯이, 기존의 방법은 3D측정을 위한 계수를 구할 때 새로운 물체를 측정할 때, 모든 경우에 대해 절대 위상을 구해야 하는 한계가 있었다. 제안하는 이 방법은 기준 면의 절대 위상만을 구해 놓은 상태에서, 새로운 영상에 대한 랩 위상과 기준면의 랩 위상의 차이 값에 이 절대 위상을 덮는 방식을 사용한다.

$$\phi_{obj}^{abs} = \phi_{ref}^{abs} + (\phi_{ref}^w - \phi_{obj}^w), \quad (6)$$

이때, ϕ_{obj}^{abs} 는 물체의 절대 위상을 의미하고 ϕ_{ref}^{abs} 는 구해놓은 기준면의 절대 위상을 의미한다. ϕ_{ref}^w 는 기준면의 랩 위상을 의미하고 ϕ_{obj}^w 는 물체의 랩 위상을 의미한다. 이 방법을 사용하면 새로운 물체에 대해서 가장 작은 주기의 프린지 패턴 영상만 획득하면 되기 때문에 더욱 빠른 측정 속도를 보일 수 있다. 단, 측정하고자 하는 물체에 가장 작은 주기의 프린지 패턴을 뿌렸을 때 패턴의 굴절되는 정도가 2π 를 넘어간다면 논문[6,7]에 따라서 두 번째 크기의 주기 영상을 이용하여 가장 작은 주기 영상을 언랩 해주어야 한다. 이렇게 하면 2π 의 모호성을 제거할 수 있게 된다. 그림 4는 물체에 대한 랩 위상과 기

준면의 랩 위상의 차이를 나타내고, 그림 5는 기준 면의 절대 위상에 그림 4를 덮은 결과를 나타낸다.

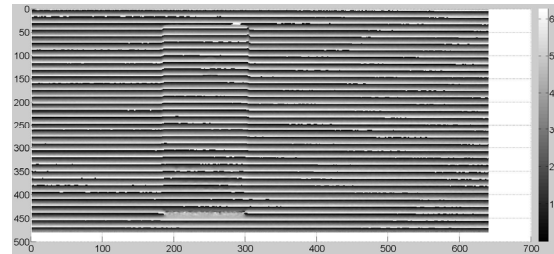


Fig. 4 Subtraction with object's wrapped phase and reference's wrapped phase

이것은 결국 물체에 대한 절대 위상을 의미한다. 그림 4를 보면 물체가 있는 곳에서 패턴이 굴절되는 것을 확인할 수 있다. 물체 밑에 다른 색으로 심하게 된 부분은 실제로 영상에서 그림자 부분을 나타낸다. 이 부분은 물체에 대한 정보가 없다고 판정하여 값에 대한 고려를 하지 않는다. 그림 5를 보면 그림 3과 비슷하게 절대 위상이 잘 나온 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 3.1에서 말한 방법대로, 물체에 중심선을 사용하거나 큰 주기를 이용하여 절대 위상을 구한 값과 아주 흡사한 값을 갖는다. 이 의미는 측정할 물체에 대해서 중심선을 사용하거나 큰 주기를 이용할 필요가 없다는 것을 나타낸다. 따라서 제안한 방법이 사용 가능하고 속도 면에서 개선되었다고 볼 수 있다.

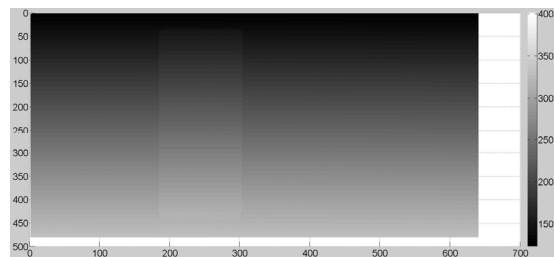


Fig. 5 Object's absolute phase(using reference plane's absolute phase)

IV. 실험 결과

본 논문에서는 여러 가지 경우에 대해서 실험을 하고 결과를 비교 하였다. 중심선을 이용하여 절대 위상을

구하는 방법(A)과 큰 주기를 이용하여 절대 위상을 구하는 방법(B)을 실험 했고, 이 두 방법에 대해서 각각 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법을 적용한 것(C)과 기존의 방법대로 각각의 절대 위상을 따로 구한 방법(D)을 실험하였다. 실험을 위해서 Windows 10(64bit), Microsoft Visual Studio 2010의 환경에서 프로그램을 개발하였다. 실험에 사용된 카메라는 PointGrey社의 'Firefly MV FMVU-03MTM'을 사용하였고 해상도는 640×480이다. 렌즈는 computar社의 'M1214-MP2'를 사용하였다. 프로젝터는 Optoma社의 'pk320'를 사용하였고 해상도는 1024×768로 설정하였다. 시스템 구성은 그림 6에 나와 있는 것처럼 되어 있다.

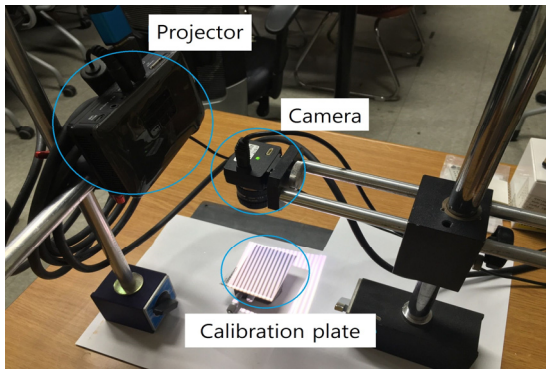


Fig. 6 System components

본 논문에서는 두 가지 데이터 세트에 대해서 각각 실험을 하였는데, 두 데이터 모두 주기가 12(가장 작은 주기) 48, 192, 768(가장 큰 주기) 네 개를 사용 하였다. 또, 각각의 랩 위상에는 σ 값이 1인 가우시안 스무드 (gaussian smooth) 처리를 해주었고, 물체를 측정할 결과에는 3×3 미디언 필터(median filter)를 두 번 해주었다. 각 표에서 h_true 는 실제의 높이를 의미하고 h_avg 는 각 높이의 영상에서 얻은 위상을 통해 높이를 다시 측정해 본 결과를 나타낸다. s.d.는 표준편차이며, rmse는 Root Mean Square Error를 나타낸다. max-min은 최댓값과 최솟값의 차이를 의미한다. 또, 모든 실험 결과의 각 수치들의 단위는 mm로 표시하였다.

첫 번째 데이터는 기준면($0\mu m$)으로부터 $500\mu m$ 씩 등 간격으로 올려 $4000\mu m$ 까지 얻은 영상 9개를 이용하여 $C_1 \sim C_{11}$, $D_0 \sim D_{11}$ 의 계수를 구하기 위해 사용하였

다. 등 간격으로 높이를 올리기 위해서 Sigma Koki社의 z-stage에 FOTOWAND社의 그레이 카드(Gray card)를 올려놓고 사용하였다. 이 Gray card가 캘리브레이션 면(Calibration plane)인 기준면이 되고, 같은 종류의 그레이 카드를 이 기준면 위에 올려놓고 물체로 잡아 높이 측정을 실험 하였다. 계수를 구할 때는 각 높이의 영상에서 샘플 포인트를 잡아야 하는데, 본 실험에서는 영상에서 상하좌우 10픽셀의 여백을 제외하고 등 간격으로 가로 31개, 세로 23개의 샘플 포인트를 추출하여 계수를 구하였다. 표 1~표 4의 결과들은 계수를 구하기 위해 사용된 $0 \sim 4000\mu m$ 의 위상에 대하여 높이를 측정하고, 상하좌우 10픽셀의 여백을 제외한 전체 영역에 대하여 계산한 결과이다.

표 1 과 표 2 는 중심선을 이용하여 절대 위상을 구한 뒤 높이를 측정하고 결과를 보여주고 있다. 이 둘의 결과는 약간의 차이가 있지만 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 차이가 있는 이유로는 각각의 높이에 대해서 중심선을 사용할 때 위상의 평균을 구하기 위해서 밝기 임계값(본 논문의 실험에서는 30으로 설정)이 들어가게 되는데, 여기로부터 위상의 평균값에 오차가 생길 수 있기 때문이다.

Table. 1 Method (A) + Method (C)

h_true	h_avg	s.d.	rmse	max-min
0.0	-0.0041	0.0197	0.0202	0.1690
0.5	0.5159	0.0196	0.0253	0.1740
1.0	0.9838	0.0262	0.0308	0.1955
1.5	1.4955	0.0269	0.0272	0.1965
2.0	2.0018	0.0202	0.0203	0.1599
2.5	2.5078	0.0185	0.0201	0.1537
3.0	3.0059	0.0182	0.0192	0.1489
3.5	3.4970	0.0178	0.0181	0.1464
4.0	3.9937	0.0182	0.0192	0.1432

Table. 2 Method (A) + Method (D)

h_true	h_avg	s.d.	rmse	max-min
0.0	0.0294	0.0200	0.0356	0.1725
0.5	0.4921	0.0198	0.0213	0.1758
1.0	0.9540	0.0264	0.0530	0.1967
1.5	1.4793	0.0268	0.0339	0.1968
2.0	2.0222	0.0203	0.0300	0.1592
2.5	2.4960	0.0183	0.0188	0.1629
3.0	3.0417	0.0184	0.0456	0.1542
3.5	3.5239	0.0175	0.0296	0.1481
4.0	3.9610	0.0181	0.0430	0.1484

Table. 3 Method (B) + Method (C)

h_true	h_avg	s.d.	rmse	max-min
0.0	-0.0039	0.0197	0.0201	0.1685
0.5	0.5160	0.0196	0.0253	0.1736
1.0	0.9838	0.0262	0.0308	0.1952
1.5	1.4955	0.0269	0.0272	0.1963
2.0	2.0017	0.0202	0.0203	0.1599
2.5	2.5078	0.0185	0.0201	0.1536
3.0	3.0059	0.0182	0.0192	0.1490
3.5	3.4969	0.0178	0.0181	0.1465
4.0	3.9937	0.0181	0.0192	0.1433

Table. 4 Method (B) + Method (D)

h_true	h_avg	s.d.	rmse	max-min
0.0	-0.0039	0.0197	0.0201	0.1685
0.5	0.5160	0.0196	0.0253	0.1736
1.0	0.9838	0.0262	0.0308	0.1952
1.5	1.4955	0.0269	0.0272	0.1963
2.0	2.0017	0.0202	0.0203	0.1599
2.5	2.5078	0.0185	0.0201	0.1536
3.0	3.0059	0.0182	0.0192	0.1490
3.5	3.4969	0.0178	0.0181	0.1465
4.0	3.9937	0.0181	0.0192	0.1433

표 3과 표 4를 비교 해보면 결과가 동일한 것을 확인할 수 있다. 또, 표 1의 결과가 표 2에 비해서 근소하게나마 더 좋은 것을 확인할 수 있는데, 이는 본 논문에서 제안한 방법이 정확성을 떨어트리지 않으면서 측정 속도는 올릴 수 있음을 보여준다.

표 5의 결과는 앞서 말했듯이 기준면과 같은 종류인 그레이 카드를 기준면 위에 올려놓은 것을 물체로 하여 얻은 영상에 대한 측정 결과이다. 표 5에는 h_true의 값이 빠져 있는데, 이는 캘리퍼(Caliper tool)로 그레이 카드의 높이를 측정하는 부분에 따라 높이가 다르기 때문에, 어느 한 값을 실제 높이로 정하기에는 애매하여 제외 하였다. 이 결과도 마찬가지로 상하좌우 10픽셀을 제외하여 얻은 결과이다.

Table. 5 Result of first data's object measurements

Method	h_avg	s.d.	max-min
(A) + (C)	3.1415	0.0198	0.1635
(A) + (D)	3.1093	0.0200	0.1617
(B) + (C)	3.1409	0.0183	0.1363
(B) + (D)	3.1409	0.0183	0.1363

두 번째 데이터는 논문[1]에서와 같이 한 영상 내에 높이를 알고 있는 게이지 블록을 설치해 두고 얻은 데이터이다. 게이지 블록은 Mitutoyo 社の 게이지 블록 (Gauge block) set, grade 0을 사용하였다. 이 데이터는 한 영상만을 이용하여, 높이 측정을 위한 계수를 구할 수 있는 장점이 있다. 계수를 구하기 위한 샘플 포인트는 좌, 우 기준면과 각 블록에 대해서 등 간격으로 가로 5개, 세로 10개씩을 추출 하였다. 이 데이터에 대한 예로는 그림 7과 같고, 계수를 구한 후에 각 높이에 대한 측정값을 한 결과는 표 6과 같다.

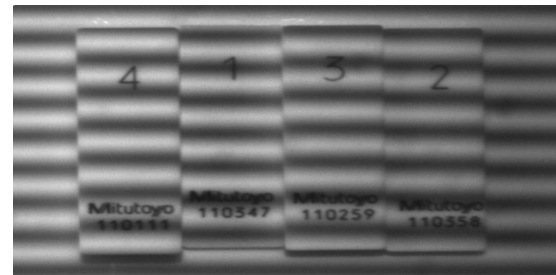


Fig. 7 Second data example

Table. 6 Result of second data

h_true	h_avg	s.d.	rmse	max-min
0.0	0.0001	0.0380	0.0380	0.3001
4.0	3.9967	0.0459	0.0460	0.7051
1.0	1.0127	0.0565	0.0579	0.7848
3.0	2.9991	0.0515	0.0515	0.6053
2.0	2.0017	0.0557	0.0557	0.8082
0.0	-0.0044	0.0503	0.0505	0.4520

이 결과는 위에서 샘플 포인트를 구하기 위해 잡았던 관심 영역에 대해서 계산한 결과이다. 첫 번째 0.0은 영상에서 왼쪽 기준면의 관심 영역에 대한 것이고, 마지막 0.0은 영상에서 오른쪽 기준면의 관심 영역에 대한 결과이다. 두 번째 데이터에 대해서도 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법을 적용한 (C)의 결과와 기존의 방법인 (D)의 결과를 비교해보면 완벽하게 동일한 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 한 영상에 게이지 블록을 두고 한 번에 구하는 것에 대해서도 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법이 정확성을 떨어트리지 않으면서 측정 속도를 올릴 수 있는 사실을 보였다. 표 7은 게이지 블록을 물체로 하여 얻은

영상에 대한 측정 결과를 나타낸다. 이 결과들은 각 블록마다 관심 영역을 설정하여, 그 영역 내에서만 값을 계산하게끔 한 결과이다.

Table. 7 Result of second data's object measurements

h_true	h_avg	s.d.	rmse	max-min
1.3	1.3480	0.0713	0.0859	0.6258
1.5	1.5187	0.0685	0.0710	0.6882
2.5	2.5414	0.0576	0.0709	0.5657
3.5	3.5325	0.0521	0.0615	0.6331

V. 결 론

본 논문에서는 3D 측정을 위한 방법 중에서 여러 주기의 프린지 패턴을 이용하여 높이를 측정하는 방법을 간략히 소개했다. 그리고 이 방법의 문제점에 대해 제시하고 해결 방안으로 기준면의 절대위상과 물체의 위상차를 이용한 물체의 절대위상을 구하는 방법을 제안하였다. 또, 실험을 통해 동일한 측정 결과를 보이면서 측정 속도 차원에서는 더 좋다는 것을 보였다. 따라서 제안한 방법을 통해 효과적인 3D 측정을 할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 실제로 높이 측정한 것을 영상으로 확인해 보면 가장 작은 주기의 패턴을 뿌린 것처럼 자글자글한 현상을 볼 수 있는데, 이 점을 보완한다면 정확도를 더욱 높일 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] Z. Wang, D. A. Nguyen and J. C. Barnes, "Some practical considerations in fringe projection profilometry," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 218-225, Feb. 2010.
- [2] H. Du, Z. Wang, "Three-dimensional shape measurement with arbitrarily arranged fringe projection profilometry system," *Optics Letters*, vol. 32, no. 16, pp. 2438-2440, Aug. 2007.
- [3] W. Osten, W. Nadeborn, and P. Andra, "General hierarchical approach in absolute phase measurement," in *Proceeding of the SPIE 2860*, Denver: CO, pp. 2-13, July 1996.
- [4] C. Reich, R. Ritter and J. Thesing, "3D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection," *Optical Engineering*, vol. 39, pp. 224-231, Jan. 2000.
- [5] K. L., "Spatiotemporal approach for real-time absolute shape measurement by use of projected fringes," *Applied Optics*, vol. 43, no. 15, pp. 3018-3027, May 2004.
- [6] H. Zhao, W. Chen, Y. Tan, "Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes," *Applied Optics*, vol. 33, no. 20, pp. 4497-4500, July 1994.
- [7] J. Li, L. G. Hassebrook, and C. Guan, "Optimized two-frequency phase-measuring-profilometry light-sensor temporal-noise sensitivity," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 20, no. 1, pp.106-115, Jan. 2003.



김호중(Ho-Joong Kim)

2015. 2 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 졸업
 2015. 9 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학과 재학
 ※관심분야 : 영상처리, 컴퓨터비전



조태훈(Tai-Hoon Cho)

1991. 5 : Virginia Tech 전기공학과 공학박사
 1992. 3 ~ 1998.2 : LG산전연구소 수석연구원
 1998. 3 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 교수
 ※관심분야 : 영상처리, 컴퓨터비전