

# 곡면 윈도우를 이용한 Shape From Focus(SFF)방법의 개선

윤정일, 최태선  
 광주과학기술원 기전공학과  
 광주광역시 광산구 쌍암동 572 번지  
 sigipus@sipl.kjist.ac.kr, tschoi@pia.kjist.ac.kr

## Advanced Shape From Focus(SFF) Method By Using Curved Window

Joung-Il Yun, Tae-Sun Choi  
 Dept. of Mechatronics, Kwangju Institute of Science and Technology  
 572 Sangam-dong, Kwangsan-ku, Kwangju 506-712, Korea

### 요약

물체의 3차원적인 정보를 복원하는 일은 그 정보의 일련된 이용에 있어서 중요한 문제이다. 이를 위해 여러 가지 방법들이 연구되고 있으며 그 중 Shape from Focus(SFF)방법은 영상의 초점이 맞는 렌즈의 위치를 찾아내어 렌즈 공식에 의해 초점이 맞는 부분의 거리 정보를 구할 수 있다. 기존의 이 방법은 초점이 맞았는지의 정도를 계산하기 위한 Focus Measure 값을 카메라의 광학축에 수직인 평면으로 가정하여 그 값이 최대가 되는 위치를 찾아내었다. 이를 개선하기 위해서 Focused Image Surface(FIS)개념이 연구되었고 그로 인해 더욱 나아진 결과를 얻었다[1]. 물체의 FIS는 카메라 렌즈에 의해 초점이 맞춰진 물체의 점들의 집합으로 이루어진 공간상의 면이다. 기하광학에 의해 물체의 모양과 FIS 사이에는 일대일 대응 관계가 있고 FIS의 형태를 구하는 것이 결국은 물체의 모양을 복원하는 것이다. FIS 개념을 처음 적용할 때는 물체의 모양이 부분적으로 영상 탐지기(image detector)와 같은 평면으로 가정하여 3차원 공간상에서 가능한 모든 방향의 평면에 대한 Focus Measure를 구하여 그 값이 최대가 되는 렌즈의 위치를 구하였다. 그러나 이러한 방법은 Focus Measure의 값이 정사각형의 윈도우에서 계산되기 때문에 곡면으로 이루어진 실제 물체에서는 오차를 가지게 된다. 본 논문에서는 이와는 달리 평면이 아닌 곡면에 대한 Focus Measure의 값이 최대가 되는 렌즈의 위치를 구하여 이전의 방법을 보다 정확한 복원이 가능함을 보인다.

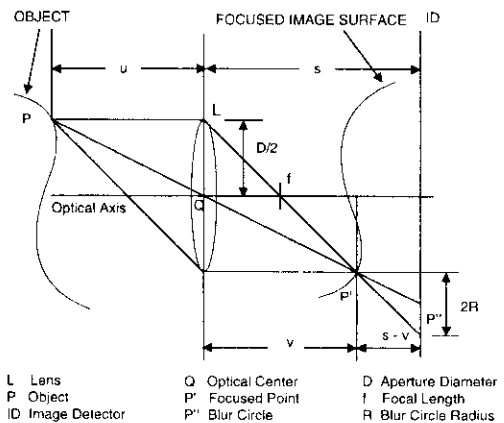
### 1. 서론

시각 시스템은 3차원 공간상에 존재하는 물체의 모양, 색깔, 거리 및 그 밖의 다른 특징들을 인식하는 과정에 도움을 준다. 인간은 이러한 시각 시스템의 처리 과정을 통하여 외부로부터 주된 정보들을 얻을

수 있으며 이 정보를 통하여 일련하는 동작들을 행한다. 컴퓨터 비전의 주된 목적은 인간이 가지고 있는 이러한 시각 시스템에 상당하는 시각적 지각 능력을 기계에게 부여 함으로서 그로 인하여 얻어지는 정보를 처리하는데 있다. 특히 물체의 형상을 복원하는 방법에는 서로 다른 View Point를 가지는 2개 이상의 영상에서 사물의 Matching Point간의 Disparity를 측정 함으로서 그 형태와 거리를 기하학적으로 구할 수 있는 Stereo 방법이나 빛의 조사에 의해 생기는 그림자를 이용하여 물체의 형상을 복원하는 Shading 방법 외에도 Depth of Field가 작을 때 카메라의 렌즈와 물체까지의 거리차에 의해 사물의 모양이 부분적으로 초점이 맞는 정도를 구함으로써 그 형상을 복원할 수 있는 Focus 방법이 있다. Focus를 이용한 이러한 측정 방법을 SFF라 한다.

### 2. Shape from Focus(SFF) 방법

#### 2.1. Focused Image Surface(FIS)

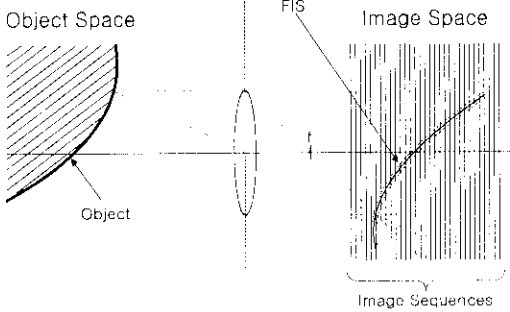


<그림 1> 볼록 렌즈를 통한 영상 형성

SFF 방법은 광학 시스템에 의하여 얻어진 영상에서 정보를 얻는 방법이다. 광학 시스템에서는 물체의 거리와 그 물체의 영상이 맺히는 거리 관계를 나타내는 렌즈 공식이 성립한다. <그림 1>에서 만일  $p$  가 카메라로부터  $u$  의 거리에 위치한 광원이면  $p$  의 초점이 맞는 영상(focused image)  $p'$  는 렌즈에서 부터  $v$  만 큼의 위치에서 구하여진다. 초점이 맞는 영상의 광도는 물체의 광도에 비례하고, 물체의 거리는 초점이 맞는 영상의 위치와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1)$$

여기서  $f$  는 초점거리,  $u$  는 렌즈 평면에서 물체까지의 거리,  $v$  는 초점이 맞는 영상까지의 거리이다. 즉 렌즈 공식으로부터 초점이 맞는 영상의 광도와 위치가 주어지면 물체의 광도와 위치는 유일하게 결정된다. 만일 위의 렌즈 공식대로 초점이 맞는 영상의 위치와 광도를 정확하게 알 수 있다면 물체의 3 차원적인 정보를 정확하게 알 수 있을 것이다. 그러나 광학 시스템의 특성과 영상 탐지기인 센서의 특성으로 인해 초점이 맞는 영상의 정확한 위치를 알아내기란 쉽지가 않다.



<그림 2> Focused Image Surface(FIS)

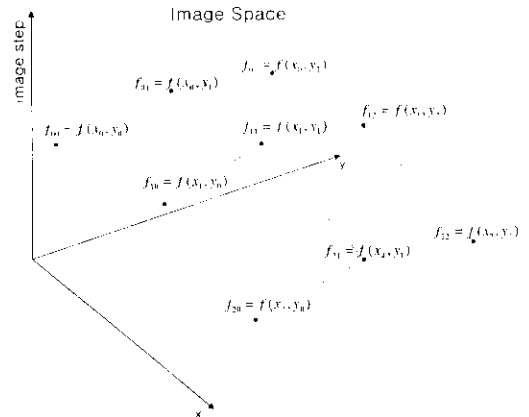
영상 탐지기에 의해 얻어진 영상은 초점이 맞는 영상과는 매우 다르다. 일반적으로 컴퓨터 비전에서는 영상 탐지기의 형태가 평면이다. 따라서 <그림 2>와 같이 곡면의 물체는 영상의 일부만이 초점이 맞게 되고 나머지는 흐려지게 된다. 렌즈의 위치를 한 방향으로 이동시키면서 물체의 형태에 따라 부분적으로 초점이 맞게 되나 맞지않게 나타나는 영상의 공간 안에서 초점이 맞는 부분들로 구성된 실제의 모양과 같은 형태를 가지는 FIS 가 존재한다. 이 초점이 맞는 부분들로 이루어진 FIS 를 구하기 위한 문제는 초점이 맞았는지 맞지 않았는지의 정도를 구하는 Focus Measure 를 어떠한 형태로 적용하는가 하는 문제로 귀결된다.

### 2.2. Focus Measure

일반적으로 초점이 맞지 않는 흐려진 영상의 특성을 주파수 영역에서의 저역 통과 필터(low-pass filter) 처리할 행한 것과 같은 것으로 생각할 때에 초점이 맞는 정도를 측정하는 Focus Measure 에 대한 여러 가지

방법들이 제안되었다 [2][3]. [2][3]에서는 FIS 를 고려하지 않고 동일한 영상상태의 정해진 윈도우 안의 각 점들의 초점 정도를 구하여 그 합으로서 Focus Measure 를 삼았다. 이를 개선하기 위하여 [1]에서 제안한 FIS.SFF 는 하나의 영상이 아닌 이웃하는 영상들까지 포함한 영상 공간 내에서 FIS 를 찾는 방법이다. [1]에서 언급한 것과 같이 직선의 FIS 는 직선으로, 평면의 FIS 는 평면으로 대응한다. [1]에서는 물체의 모양이 부분적으로 평면에 근사 되면 대응하는 FIS 도 부분적으로 평면에 근사 된다는 것으로 Focus Measure 의 합을 FIS 에 근사한 평면으로 취하였다. 그러나 실제적으로 대부분의 물체는 곡면을 포함하고 심한 경우에는 거친고 울퉁불퉁한 모양을 한 경우도 있으며 이를 단순한 평면으로 치리하면 그 만큼의 오차를 내포하게 된다. 따라서 다음과 같이 Focus Measure 를 구하여 실제 물체와 비슷한 형태로 구부러진 곡면 윈도우(curved window)를 사용하여 곡면인 FIS 를 구하는 방법을 제안한다.

### 3. 곡면 윈도우를 이용한 탐색 알고리즘



<그림 3> 곡면 윈도우를 만들기 위한 영상 공간 내의 9 개의 점들

곡면 윈도우를 만들기 위해 <그림 3>과 같은 공간상의 9 개의 점들을 생각해보자. 이 9 개의 점들을 지나는 곡면을 만들기 위해서 Lagrange Polynomial 을 사용할 수 있다. Lagrange Polynomial 을 사용한 방법의 알고리즘은 다음과 같다.

/\* x coordinate \*/

for  $x = x_0$  to  $x_2$  do

$$P_{i0} = \{(x - x_1) * (x - x_2)\} / \{(x_0 - x_1) * (x_0 - x_2)\};$$

$$P_{i1} = \{(x - x_0) * (x - x_2)\} / \{(x_1 - x_0) * (x_1 - x_2)\};$$

$$P_{i2} = \{(x - x_0) * (x - x_1)\} / \{(x_2 - x_0) * (x_2 - x_1)\};$$

/\* y coordinate \*/

for  $y = y_0$  to  $y_2$  do

$$P_{j0} = \{(y - y_1) * (y - y_2)\} / \{(y_0 - y_1) * (y_0 - y_2)\};$$

$$P_{j1} = \{(y - y_0) * (y - y_2)\} / \{(y_1 - y_0) * (y_1 - y_2)\};$$

$$P_{j2} = \{(y - y_0) * (y - y_1)\} / \{(y_2 - y_0) * (y_2 - y_1)\};$$

```


$$Q_0 = P_{s0} * f_{00} + P_{s1} * f_{10} + P_{s2} * f_{20};$$


$$Q_1 = P_{s0} * f_{01} + P_{s1} * f_{11} + P_{s2} * f_{21};$$

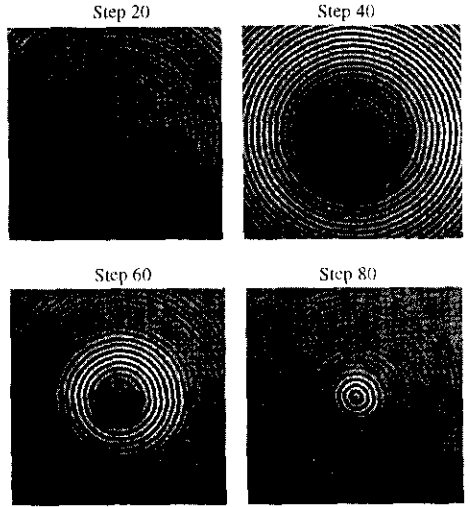

$$Q_2 = P_{s0} * f_{02} + P_{s1} * f_{12} + P_{s2} * f_{22};$$

/* piecewise curved window by Lagrange polynomial */

$$f(x, y) = w = P_{s0} * Q_0 + P_{s1} * Q_1 + P_{s2} * Q_2;$$

end /* y loop
end /* x loop
    
```

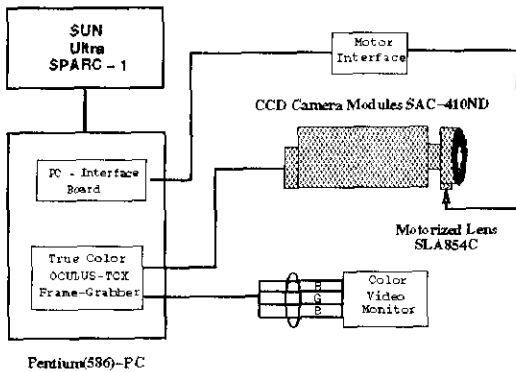
11에서는 영상의  $(x_1, y_1)$  의 초점이 맞는 위치를 구하기 위해서 단순히 각각의 영상에서  $(x_1, y_1)$  을 중심으로 하는 일정한 크기의 원도우울 정하여 Focus Measure 가 최대가 되는 위치를 구한 기존의 방법을 초기 지표로 잡고 초기 지표와 그 앞뒤에서  $(x_1, y_1)$  을 중심으로 영상 공간상에서 가능한 모든 방향으로 평면 원도우울의 경사를 변화시켜 평면 원도우울 위의 각 점들에서의 Laplacian 값의 합이 최대가 되는 영상의 지표를 구하여 그에 해당하는 거리를 구하였다. 곡면 원도우울 이용하는 방법은 FIS 에서와 마찬가지로 기존의 방법으로 구한 점좌표  $(x_j, y_k)$  좌표에 해당하는  $f_{jk}$  의 초기 위치로 하고 각각의  $f_{jk}$  의 값을 조금씩 변화시켜 만들어진 곡면 원도우울 위의 각 점들에서의 Laplacian 값들의 합이 최대가 되는 곳의 영상의 지표를 구한다. 이것이 영상의  $(x_1, y_1)$  좌표에서 초점이 맞는 지표가 되며 이 영상의 지표에 해당하는 거리를 구하여 물체의 형태를 복원한다.



<그림 5> 각 렌즈스텝에서의 시플레이션 콘 영상

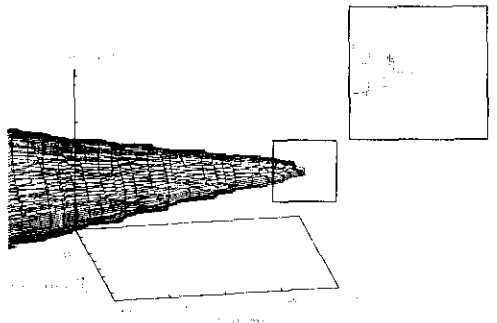
시플레이션 콘 영상은 수치적으로 렌즈광식에 잘 맞도록 만들어진 영상으로 새로 제안된 곡면 원도우울 이용한 탐색 방법을 적용하는 것이 타당성기를 확인하기 위해 사용되었다.

#### 4. 실험 결과

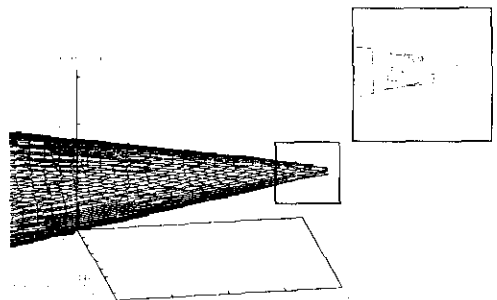


<그림 4> K-JIST Active Camera System(KACS)

실험은 계산상으로 만들어낸 콘 모양의 물체에 대해서 렌즈 스텝이 변화함에 따라 만들어진 96 개의 시플레이션 영상과 <그림 4>의 K-JIST Active Camera System(KACS)을 사용하여 렌즈 스텝을 일정한 간격으로 변화시켜 얻어낸 실제의 콘 물체 영상에 대하여 실험을 행하였다. KACS 는 CCD 카메라를 통하여 들어오는 영상 신호를 영상 보드를 통하여 얻어 메모리에 저장시키며 CCD 카메라의 렌즈 위치를 PC 를 이용하여 제어할 수 있도록 구성되어있다. 이를 이용하여 실제 콘 물체의 영상 96 개를 각 렌즈 스텝에 따라 구하였다.



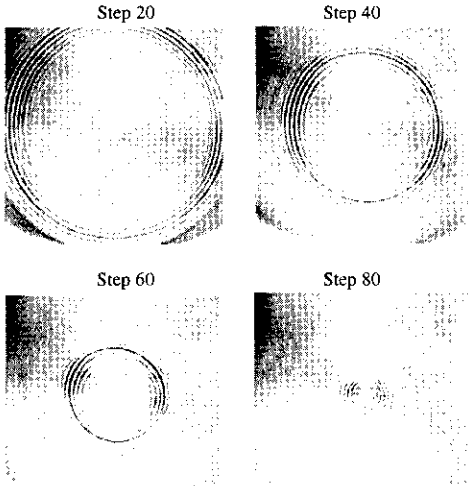
(a) 기존의 평면 원도우울 사용한 결과



(b) 제안된 곡면 원도우울 사용한 결과

<그림 6> 시플레이션 콘 물체 복원 결과

시뮬레이션 콘 영상에 기존의 FIS,SFF 방법에서처럼 단순히 평면을 사용하는 것보다 곡면 윈도우를 사용하여 복원한 결과의 피크가 더욱 뾰족하며 원래의 콘 모양에 더욱 가깝다는 것을 <그림 6>에서 확인할 수 있다.

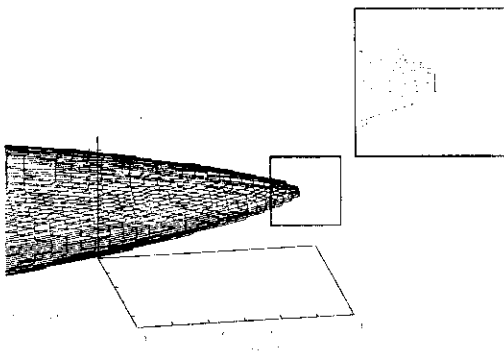


<그림 7> 각 렌즈스테이지에서의 실제 콘 영상

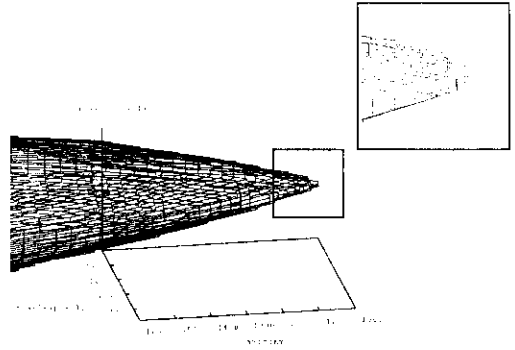
실제 콘 물체의 모양은 표면이 매끈하고 피크 부분이 뾰족한 모양을 하고 있다. 실제 콘 물체에 대하여 실험할 때에는 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- ① 실험 물체 표면의 에지(edge) 정보는 충분한가.
- ② 카메라 렌즈의 Depth of Field는 충분히 작은가[5].
- ③ 렌즈의 스텝 간격은 어느 정도 설정해야 하는가.

조점 정도의 측정이 영상의 에지 부분에서 나타나는 경계치의 미분값 측정에 의해 얻어지기 때문에 물체 표면에 에지가 충분하지 않으면 정확한 결과를 구할 수 없다. 이 때문에 실제 콘 물체의 표면에 좀처럼 링 모양의 띠 무늬가 나타나도록 콘 물체를 제작하였다. 일반적인 물체를 실험할 경우에는 표면에 충분한 에지가 나타나도록 해주는 부수적인 장치가 필요하다.



(a) 기존의 평면 윈도우를 사용한 결과



(b) 제한된 곡면 윈도우를 사용한 결과

<그림 8> 실제 콘 물체 복원 결과

<그림 8>은 실제 콘 영상에 대하여 적용한 결과의 피크부분을 강조하여 나타낸 것이다. 단순한 평면 윈도우를 적용한 기존의 FIS,SFF 방법의 결과를 보면 피크 부분이 곡면 윈도우를 적용한 결과보다 약간 뭉그러진 모양을 하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 곡면 윈도우를 적용한 것이 실제 콘 모양에 더욱 가깝다는 것을 나타내고 있다.

## 5. 결론

기존의 SFF 방법에서 물체의 모양을 부분적으로 평면으로 근사화 시키 평면에 대하여 Focus Measure를 적용시킨 것보다 실제 물체의 모양에 가까운 형태의 곡면 윈도우를 사용하여 Focus Measure를 적용하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] M. Subbarao, T. Choi, "Accurate Recovery of Three-Dimensional Shape from Image Focus," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 17, No. 3, pp. 266-274, March 1995.
- [2] M. Subbarao, T. Choi and A. Nikzad, "Focusing Techniques," Optical Engineering 32(11), pp. 2824-2936, Nov. 1993
- [3] A. Pentland, "A New Sense for Depth of Field," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 9, no. 4, pp. 523-531, 1987
- [4] S. Nayar, "Shape from Focus System for Rough Surfaces," Proc. IEEE Computer Soc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, Champaign, Ill., PP. 302-308, June 1992.
- [5] E. Krotky, "Focusing", International Journal of Computer Vision, Vol. 1, pp. 223-237, 1987.
- [6] B. K. P. Horn, Robot Vision, McGraw-Hill Book Company, 1986