

거리영상 개선을 위한 정칙화 기반 표면 평활화기술¹⁾

기 현 중, 신 정 호, 백 준 기
중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과
시각 및 지능 시스템 연구실

Regularized Surface Smoothing for Enhancement of Range Data

Hyunjong Ki, Jeongho Shin, and Joonki Paik
Image Processing and Intelligent Systems Laboratory
Department of Image Engineering
Graduate School of Advanced Imaging Science, Multimedia, and Film, Chung-Ang University
E-mail : kikingka@wm.cau.ac.kr

Abstract

This paper proposes an adaptive regularized noise smoothing algorithm for range image using the area decreasing flow method, which can preserve meaningful edges during the smoothing process. Although the area decreasing flow method can easily smooth Gaussian noise, it has two problems; i) it is not easy to remove impulsive noise from observed range data, and ii) it is also difficult to remove noise near edge when the adaptive regularization is used. In the paper, therefore, the second smoothness constraint is additionally incorporated into the existing regularization algorithm, which minimizes the difference between the median filtered data and the estimated data. As a result, the proposed algorithm can effectively remove the noise of dense range data with edge preserving.

I. 서론

3차원 모델링 기술의 응용분야가 확대됨에 따라 3차원 영상처리의 중요성은 점점 부각되고 있는 현실이다. 3차원 물체의 표면을 모델링하기 위한 정밀한 기술로써 거리센서를 사용하지만, 거리 영상 획득과정에서 발생하는 잡음, 양자화 오차, 추정 오차 등이 항상 존재한다. 거리 영상에서의 잡음이나 오차는 기존의 2차원 영

상에서 사용하는 단순한 필터링 개념의 처리 방식으로는 효과적인 제거가 불가능하기 때문에 최근 정칙화기반으로 표면적을 감소시키기 위한 알고리즘을 사용하여 잡음을 효과적으로 억제하는 방법이 소개된 바 있지만, 거리영상의 획득시 포함될 수 있는 임펄스 잡음(impulse noise)을 고려하지 않았다 [1]. 일반적으로 거리영상의 잡음은 거리센서의 특성상 가우스잡음과 임펄스 잡음이 혼합되어 나타난다 [2]. 임펄스잡음의 효과적인 제거는 비선형필터인 중간값필터(median filter)가 효과적으로 사용될 수 있으나, 가우스잡음에 대한 잡음 제거 성능은 효과적이지 못하다. 또한 에지정보를 보존하기 위해 에지 크기에 따라 적용적인 방법으로 잡음을 제거하는 경우 물체와 배경 사이의 경계등에 강한 에지가 발생되는 데, 그 영역에서의 잡음을 효과적으로 제거하기 어렵다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 두가지의 제약조건을 동시에 사용하는 정칙화 기반의 방법으로써 거리영상 획득시 발생하는 잡음을 효과적으로 억제하는 방법을 구현하고 있다. 우선 가우스 잡음제거를 위해서 3차원 물체의 표면적을 감소시키는 제약조건을 에지정보에 따라 적용적으로 적용하고, 동시에 임펄스잡음제거를 위한 중간값필터의 결과를 제약조건으로 추가하여 거리영상에서의 임펄스 잡음을 효과적으로 억제하는, 동시에 에지정보도 보존할 수 있다.

II. 시점불변 표면 평활화 모델

3차원 영상의 표면 평활화문제는 잡음에 의해 열화

1) 본 연구는 교육부의 BK21 사업과, 과학기술부의 국가지정연구실 사업지원으로 이루어졌습니다.

된 거리 영상으로부터 원영상을 추정하는 과정으로 생각할 수 있다. 직교좌표계에서 관측된 3차원 영상을 $z_{i,j}$ 로 본다면, 3차원 영상의 에너지 함수는 데이터 정합조건 E 와 사전 평활도 (*a priori smoothness*) 제약 조건인 h 의 함수로 정의할 수 있다. 3차원 데이터의 정합조건, E 는 식(1)과 같이 정의할 수 있으며, ϕ 은 거리센서가 투사된 방향과 표면의 직교방향과의 사이각으로 그 값이 커짐에 따라 오차가 생길 수 있기 때문에, $\cos\phi$ 은 보는 시점에 관계없이 3차원 데이터의 오차를 줄일 수 있는 요소이다.

$$E = \sum_{ij} (z_{i,j} - c_{i,j})^2 \cos\phi, \quad (1)$$

$$= \sum_{ij} (z_{i,j} - c_{i,j})^2 \frac{1}{1 + z_x^2 + z_y^2}.$$

여기서 c_{ij} 는 관측된 거리영상이고, z_x, z_y 는 z_{ij} 상에서 각 방향에 대한 일차미분값을 나타낸다. 여기에 사전평활화 제약조건 h 를 추가하면 다음과 같은 3차원영상의 에너지함수인 f 를 정의할 수 있다.

$$f = \sum_{ij} (z_{i,j} - c_{i,j})^2 \frac{1}{1 + z_x^2 + z_y^2} + \lambda h. \quad (2)$$

본 논문에서는 표면 평활화를 위한 식(2)의 해를 구하기 위해서 에너지함수 f 를 최소화하는 그라디언트(*gradient*)방법을 사용한다.

III. 표면적 감소율 제약 조건

직관적으로 볼 때 표면 평활화를 거친 거리영상은 잡음에 의해 왜곡된 거리영상에 비해 표면적이 작다는 사실에 근거해서 곡률반경을 이용하여 표면의 미소면적을 구하고 이들의 전체적인 표면적을 최소화하는 제약조건 h 를 사용하여 표면평활화가 가능하다 [1]. Perceptron과 같이 구좌표계에 기반한 거리센서에 의해 획득된 r_{ij} 을 구함으로써 다음과 같이 물체의 표면을 정의할 수 있다 [2].

$$X(\alpha, \beta) = (r \sin\alpha, r \cos\alpha \sin\beta, -r \cos\alpha \cos\beta). \quad (3)$$

여기서 α, β 는 센서의 측정파라미터로부터 얻을 수 있다. 표면 면적의 계산은 X_α, X_β 라는 기저를 이용하여 미분기하학에서 사용하는 E, F, G 라는 일차기본형(*first fundamental form*)를 통해서 식(4)와 같이 표면적의 식을 유도할 수 있다 [3].

$$A_s = h_{area} = \int \int_D \sqrt{EG - F^2} d\alpha d\beta, \quad (4)$$

$$\begin{cases} E = X_\alpha \cdot X_\beta = r^2 + r_\alpha^2 \\ F = X_\alpha \cdot X_\beta = r_\alpha r_\beta \\ G = X_\beta \cdot X_\beta = r^2 \cos^2\alpha + r_\beta^2, \end{cases}$$

$$X_\alpha = \frac{\partial X}{\partial \alpha}, X_\beta = \frac{\partial X}{\partial \beta}, r_\alpha = \frac{\partial r}{\partial \alpha}, r_\beta = \frac{\partial r}{\partial \beta}. \quad (5)$$

결국 h_{area} 는 표면적을 줄이는 제약조건, A_s 로 나타낼 수 있다. 그러나 h 가 제곱근형태로 이루어져있어 쉽게 최소화하기 어렵기 때문에 제곱을 취함으로써 h 를 식(6)과 같이 정의할 수 있다. 타당성은 Cauchy-Schwarz 부등식에 의해 쉽게 증명될 수 있다.

$$h_{area} = \int \int_D (EG - F^2) d\alpha d\beta. \quad (6)$$

결과적으로, 최종적인 표면적감소를 제약조건은 이산함수의 영역에서 식(4)와 (5)에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$h_{area} = \lambda_A \sum_{ij} (r_{ij}^4 \cos^2\alpha + r_{ij}^2 r_\beta^2 + r_\alpha^2 r_{ij}^2 \cos^2\alpha). \quad (7)$$

IV. 중간값 필터 제약 조건

서론에서 언급한 것과 같이 거리영상의 잡음은 가우스잡음 이외에 거리센서의 특성상 임펄스 잡음이 동시에 존재한다. 또한 표면적 감소율제약조건을 에지의 크기에 따라 적용적으로 적용하는 경우 에지가 큰 영역에서는 정칙화 매개변수 λ 가 작아지기 때문에 잡음 제거에 효과적이기 않다.

이러한 문제를 해결하고자 본 절에서는 임펄스 잡음 제거와 동시에 에지가 큰 영역에서의 효과적인 잡음 제거를 위한 중간값 필터 제약조건을 다음과 같이 정의한다.

$$h_{median} = \lambda_M \sum_{ij} (r_{ij} - M)^2, \quad (8)$$

여기에서 M 은 해당 위치의 중간값 필터링된 결과를 나타낸다.

V. 정칙화 기반 표면 평활화 알고리즘

III절과 IV절에서 정의한 두가지 제약조건을 적용한 에너지함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f = E + \lambda_A h_{area} + \lambda_M h_{median}$$

$$= \sum_{ij} (r_{ij} - c_{ij})^2 / \cos^2\phi + \lambda_A \sum_{ij} (r_{ij}^4 \cos^2\alpha + r_{ij}^2 r_\beta^2 + r_\alpha^2 r_{ij}^2 \cos^2\alpha) \quad (9)$$

$$+ \lambda_M \sum_{ij} (r_{ij} - M)^2$$

식(9)에서 에너지 함수 f 를 최소화시키는 r_{ij} 를 찾는 여러 가지의 최적화 방법은 있지만, 본 논문에서는 수

렴속도 조절이 용이하고 구현이 간단한 그레디언트 방법을 적용하였다.

즉, n번째 반복결과 해 r_{ij}^n 이 다음과 같이 갱신된다.

$$r_{ij}^{n+1} = r_{ij}^n - w \frac{\partial f_{ij}}{\partial r_{ij}}, \quad (10)$$

여기서 w 는 반복의 스텝크기이고, 편미분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{ij}}{\partial r_{ij}} = & 2(r_{ij} - c_{ij})/\sigma_{ij}^2 + \lambda_A \{4r_{ij}^3 \cos^2 \alpha + [2r_{ij}(r_{i+1,j} - r_{ij})^2 \\ & - 2r_{ij}^2(r_{i+1,j} - r_{ij}) + 2r_{i-1,j}^2(r_{ij} - r_{i-1,j})](\frac{1}{d\beta})^2 \\ & + [2r_{ij}(r_{i,j+1} - r_{ij})^2 - 2r_{ij}^2(r_{i,j+1} - r_{ij}) \\ & + 2r_{i,j-1}^2(r_{ij} - r_{i,j-1})](\frac{c \cos \alpha}{d\alpha})^2\} + 2\lambda_M(r_{ij} - M), \quad (11) \end{aligned}$$

단, 여기서 $r_\alpha = \frac{r_{i,j+1} - r_{ij}}{d\alpha}$, $r_\beta = \frac{r_{i+1,j} - r_{ij}}{d\beta}$ 로 근사화하여 식을 전개했다. 최종적으로 구현된 알고리즘이 아래와 같이 요약되었다.

최적화 알고리즘 :

- 단계 1) 초기값을 선택한다. ; $r^0, n \leftarrow 0$
- 단계 2) $\nabla f(r)|_{r=r^n}$ 의 값을 구한다.
- 단계 3) 초기값으로부터 반복적으로 r^n 을 구한다 ;
 $r^{n+1} = r^n + w \{-\nabla f(r^n)\}$
- 단계 4) 만약 $|r^{n+1} - r^n| \leq \delta$ 이면 알고리즘을 중단하고 그렇지 않으면 $n \leftarrow n + 1$, 단계 2로 되돌아간다. 위의 알고리즘을 실행할 때 $\delta = 0.0001$ 을 사용하였다.

VI. 에지 보존을 위한 적응적 정칙화 매개변수 λ_A 결정

표면 평활화는 바람직하지 않은 잡음을 억제하는 데에 효과적인 반면 에지, 모서리, 경계영역 등과 같이 영상의 중요한 특징 정보를 동시에 제거하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 에지영역에서의 중요한 정보를 보존하기 위해서 면적감소 제약조건 λ_A 를 영상의 에지 특성에 따라 적용하려고 한다. 영상의 에지크기값을 구하는 방법은 에지 향상기(edge enhancer)를 사용하여 다음과 같이 구한다 [4].

$$e_s(i, j) = \sqrt{z_x^2 + z_y^2}, \quad (12)$$

여기서 z_x, z_y 는 z_{ij} 상에서 각 방향에 대한 일차미분값이다. 식(12)에서 구한 에지정보를 이용하여 다음과 같이 λ 를 적응적으로 결정해줄 수 있다.

$$\lambda_A(i, j) = \frac{\rho}{1 + ke_s^2(i, j)}, \quad \text{단 } 0 < k < 1, \quad (13)$$

여기서 k 와 ρ 는 에지크기에 따른 민감도를 반영하는 매개변수이다.

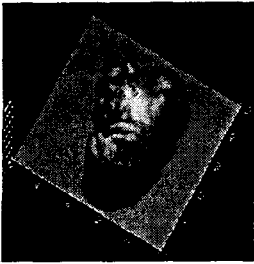
VII. 실험결과

본 논문에서 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 여러 가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험에서는 100x100 가재 영상에 가우스 잡음과 임펄스 잡음을 임의로 첨가하여 잡음이 섞인 거리영상을 생성하였다. 실험 결과로써 면적감소 정칙화 제약조건만을 적용한 결과와 중간값 필터 제약 조건을 함께 적용한 결과를 기존필터들을 적용한 결과와 비교 정리하였다.

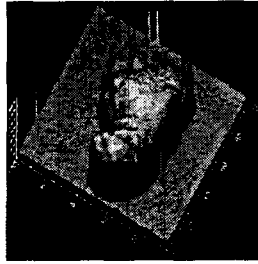
그림1에서 (a)는 100x100의 가재의 원영상이고, (b)는 가우스 잡음(30dB)과 임펄스 잡음을 첨가했을 때의 영상이다. (c)는 원영상(a)를 5x5사이즈의 평균(mean) 필터를 거친 결과이고, (d)는 $\sigma=1$ 로 한 가우스(gaussian)필터를 거친 결과이다. (c)와 (d) 모두 임펄스잡음은 어느 정도 제거하지만 가재 등점질의 주름같은 에지정보를 손실하고 있음을 확인할 수 있다.

다음은 기존의 면적감소제약조건을 적응적, 비적용적으로 적용한 결과를 (e)와 (f)에 순서대로 보여준다. 영상을 보면 가우스 노이즈는 효과적으로 제거되었지만, 임펄스잡음의 특성상 적용적인 방법을 적용할 경우 잡음 자체를 에지정보로 파악되기 때문에 임펄스노이즈는 효과적으로 제거되지 못함을 알 수 있다. 비적용적인 방법은 어느 정도 임펄스 잡음을 제거하지만 앞서 (c)와 (d)에서 보듯이 중요정보가 많이 손실되었음을 알 수 있다. 그리고, 본 논문에서 제안한 중간값 필터의 제약조건을 비적용적, 적용적으로 추가했을 때 나타나는 결과를 (g)와 (h)에 나타내었다. 단, 여기서 중간값필터의 결과(M)는 5x5 중간값필터를 10번 반복시킨 결과를 사용했다. 둘 다 임펄스 잡음을 완전히 제거했지만, 비적용적인 경우 여전히 중요정보가 손실됨을 알 수 있다. 그러나 적응적인 경우 가우스노이즈와 임펄스노이즈를 동시에 효과적으로 제거하면서 동시에 에지정보도 효과적으로 보존할 수 있음을 확인할 수 있다. 첫 번째 실험에서는 $w=5 \times 10^{-10}$ 를 사용하였고, 적응적 표면감소 적용시 $\rho=0.02$, $k=0.5$ 로 주었으며 중간값필터에 대한 λ_M 는 2.0×10^7 을 사용하였다.

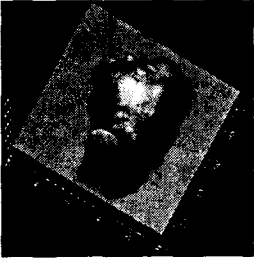
두 번째 실험으로 그림2에서 (a)와 (b)는 512x512크기의 가우스잡음(35dB)과 임펄스잡음에 의해 열화된 석고영상을 각각 기존의 면적감소 제약조건만을 사용한 결과와 본 논문에서 제안한 중간값 제약조건을 추가한 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 물체와 배경의 경계가 가파른 영상에서 적응적으로 기존의 방법을 적용할 때 큰 에지영역에서는 잡음을 효과적으로 제거할 수 없지만, 제안한 방법을 적용한 경우에는 잡음을 효과적으로 제거할 수 있다.



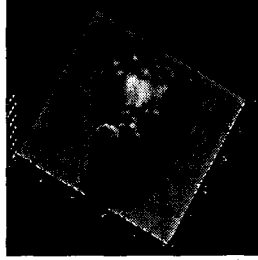
(a) 원영상(100×100)



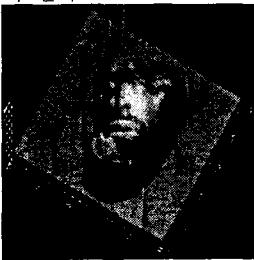
(b) 가우스잡음(30dB)와 임펄스잡음이 첨가된 영상



(c) 5×5 평균(mean)필터링의 결과



(d) 가우스(gaussian)필터링의 결과



(e) 면적감소 제약조건만을 적용적으로 적용한 결과



(f) 면적감소 제약조건만을 비적용적으로 적용한 결과



(g) 제안한 방법을 적용적으로 사용한 결과



(h) 제안한 방법을 비적용적으로 사용한 결과

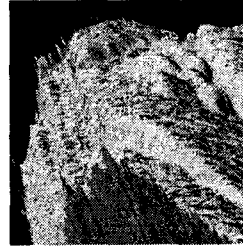
그림1. 가우스잡음과 임펄스 잡음이 포함된 거리영상의 결과



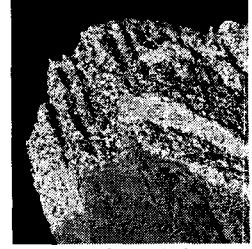
(a) 면적감소제약조건을 적용적으로 적용한 결과



(b) 제안한 방법을 적용적으로 적용한 결과



(c) (a)영상의 경계를 확대한 영상



(d) (b)영상의 경계를 확대한 영상

그림2. 경계영역의 잡음 제거 결과

VIII. 결론

본 논문에서는 표면적 감소 제약조건과 중간값필터 조건을 동시에 만족시키는 정칙화 해를 구함으로써 잡음을 포함하는 거리 영상의 표면의 평활화를 수행하였다. 실험결과를 통해 볼 때 제안된 알고리즘은 거리영상에 포함된 가우스 잡음과 임펄스 잡음을 동시에 억제시킬 수 있었으며, 적응적인 방법을 사용하여 경계 영역의 잡음도 효과적으로 제거할 수 있었다.

일반적으로 거리영상에서의 잡음이나 오차는 3차원 영역 분할이나 객체의 인식 및 추적 등의 단계에서 성능 저하를 초래할 수 있기 때문에 본 논문에서 제안한 표면평활화 기술은 3차원 영상처리에 있어서 전처리기술로 효과적으로 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] Y. Sun, J. K. Paik, J. R. Price, and M. A. Abidi, "Dense range image smoothing using adaptive regularization," *Proc. 2000 Int. Conf. Image Processing*, Vancouver, Canada, September, 2000.
- [2] R. Pito, "Characterization, calibration, and use of the Perceptron laser range finder in a controlled environment," *Technical Report MS-CIS-95-05*, Univ. of Pennsylvania GRASP Laboratory, Philadelphia, PA, January 1995.
- [3] M. DoCarmo, *Differential geometry of curves and surfaces*, Prentice Hall, 1976.
- [4] J. Canny, "A Computational approach to edge detection", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* vol. 8, no. 1., pp. 679-698, 1986.
- [5] J. H. Yi and D. M. Chelberg, "Discontinuity - preserving and viewpoint invariant reconstruction of visible surface using a first order regularization," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 17, no. 6., pp. 624-629, 1995.