

칼만 와류(渦流) 영상을 이용한 속도장 추정

김형권¹ · 김진우^{2*}

Velocity Field Estimation using Karman Vortex Images

Hyeong-kwon Kim¹ · Jin-woo Kim^{2*}

¹Department of Computer Engineering, Kyung-Sung University, Pusan, 48434 Korea

^{2*}Department of Information and Communication Engineering, Kyung-Sung University, Pusan, 48434 Korea

요 약

수치 해석은 유동 경로를 공식화할 필요가 없다는 장점으로 경로 설계와 같은 시뮬레이션 분석에 유용하다. 그러나 유체의 완전한 물리적 매개 변수와 경계 조건을 알고 있어야 한다. 그중 하나라도 알 수 없는 경우, 계산이 불가능해 지거나, 수렴되더라도 결과의 신뢰성이 낮아진다. 따라서 유동 정보를 보다 정확하게 획득하는 방법이 요구된다. 본 논문은 수로 내의 염료의 이동에 수반되는 영상 명도의 변화를 기반으로 영상 정보 및 속도장의 구속식을 이용하여 염료의 속도장을 추정하는 기법을 제시한다. 구속식은 속도장 추정 시에 발생하는 오류를 최소화하기 위해서 안정화 항을 추가했다. 본 논문은 카르만 와류의 생성 이미지와 실제 영상을 대상으로 제안 수법의 효율성을 보인다.

ABSTRACT

Numerical analysis has the advantage that no actual flow pathways need to be formulated, making this technique especially useful for simulation analysis such as pathway design. However, it does require that the complete physical parameters of the fluid and the complete boundary conditions be known. If any of them are unknown, either the calculation will become impossible, or even if the calculation does converge, the reliability of the result will be low. Therefore, a means of more accurate acquisition of flow information is required. In this paper, we present techniques for estimating flow field from a constraint equation for image information and velocity field, based on the image intensity changes accompanying the motion of dye in waterway. In the equation, we entered a stabilizing term to suppress estimation error. We show the effectiveness of our method through experiments with generated and real images of a Karman vortex.

키워드 : 와류, 속도장, 시공간 영상, 유체모델, 영상처리

Keywords : Vortex, Velocity field, Spatio-temporal image, Fluid model, Image processing

Received 20 August 2018, Revised 30 August 2018, Accepted 10 September 2018

* Corresponding Author Jin-Woo Kim(E-mail:jjinwoo@ks.ac.kr, Tel:+82-51-663-5153)

Department of Information and Communication Engineering, Kyungsung University, Pusan, 48434 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.10.1327>

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. 서 론

유동 계측에 관한 연구는 수리학 분야에서는 수치 해석 및 계측장비에 의한 유동 측정을 기반으로 하여, 많은 연구자들에 의해 유동 정보의 취득 기술이 다양하게 개선되었다[1,2]. 그러나 이러한 기술은 특정 분야에서 독립적으로 진행되었으며, 통합의 시도는 거의 이루어지지 못하였다. 수치 해석은 실제 유동 경로를 공식화할 필요가 없다는 장점이 있어서 경로 설계와 같은 시뮬레이션 분석에 특히 유용하다. 그러나 유체의 완전한 물리적 매개 변수와 완전한 경계 조건을 알고 있어야 한다. 그중 하나라도 알 수 없는 경우에는 계산이 불가능해 지거나 계산이 수렴되더라도 결과의 신뢰성이 낮아진다. 예를 들어 세라믹 분야에서는 특히 유체의 입구 주변에 유동과 관련하여 완전한 경계 조건을 확인하기가 어렵기 때문에 수치 해석을 사용하는 것이 다소 문제가 된다. 반면에 센서를 이용한 측정은 수치 해석보다 더 높은 안정성으로 유동 정보를 직접 취득할 수 있게 한다. 그러나 측정 범위와 분해능이 센서의 용량에 따라 달라지며, 공간 배열이 때로는 불규칙적이다. 더욱이 이 기법은 유체에 센서를 삽입할 것을 요구하여 유동을 방해한다. 이것은 복잡한 유동의 경우 심각한 문제가 될 수 있다. 수치해석과 센서 측정이 독립적으로 사용될 때 위의 한계를 감안하여 우리는 품질과 신뢰성 측면에서 유동 측정을 효과적으로 개선하기 위해서 이 두 가지 기술의 통합을 시도해 왔다.

본 논문에서는 유체의 유동을 추정하기 위해서 유체의 물리적 파라미터, 몇 가지 경계 조건, 그리고 유체 유동의 이미지 시퀀스로 부터 접근한다. 이 같은 접근방법에서 경계 조건에 대한 정보의 부족은 이미지 정보에 의해 보완되며, 경계 조건에 대한 부분적 지식만으로도 유동이 추정될 수 있다. 이것은 많은 유동 측정 용도에 수치 분석을 사용하는 것보다 더 유리하며, 센서 측정방법보다 더 정확하고 신뢰성을 높게 한다.

위에 언급했듯이 본 논문에서는 이미지 정보를 사용하여 유동을 추정한다. 이것은 두 가지의 주요 이점이 있다. 첫 번째는 데이터를 신속하게 얻을 수 있으며, 저비용으로 측정가능하다. 두 번째는 센서의 삽입이 불가능한 고온 또는 고압 유체와 같은 조건에서도 유동 정보를 포착할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

컴퓨터 비전 분야에서 이미지 시퀀스로부터 광학적

유동을 추정할 수 있는 기법으로는 크게 상호상관법, 국부 위상법, 그리고 Gradient법의 세 가지 주용 접근 방법이 제안되고 있다. 상호상관법[3,4,5]에서는 대상 창에서 물체 모양이 보존되는 것으로 가정한다. 그러나 고체 또는 탄성 물체에 비하여 유체의 형상은 복잡한 방식으로 왜곡된다. 따라서 상관법을 사용해서는 유동 추정의 정확성이 충분히 보장되지 않는다. 국부 위상법[6,7,8,9]에서는 영상 시퀀스의 국부 주파수 표현에서의 위상 정보가 사용되며, 이것은 속도가 조율된 필터 군에 의해서 생성된다. 영상의 국부 부피에서 속도가 일정한 것으로 가정되므로 이 방법은 유체 유동보다 카메라의 움직임 을 추정하는데 더 적합할 수 있다. Gradient법에서는 기본 가정이 특정 프레임과 이전 또는 이후의 프레임 간의 픽셀 강도가 보존된다. 그러나 대부분의 상황에서 명암 값의 변화만으로는 속도장을 완전히 계산하기에는 충분한 정보를 제공하지 못한다. 따라서 속도장 특징이나 평가 함수에 추가된 근본적인 조건과 같은 어떤 형태의 보완적 조건이 필요하다. 평가 함수를 최소화함으로써 속도장을 예측할 수 있다. 보완적 조건이 적절하게 작성되면 Gradient기법은 높은 수준의 성능을 제공하게 된다. 컴퓨터 비전에서 대표적인 Gradient기법은 Horn and Schunck에 의해 제안된 방법이며, 규칙화를 위해서 평활함을 기본 조건으로 이용하고 있다[10]. 이 조건은 속도가 공간에서 부드럽게 변한다는 것을 시사한다. 그러나 이것은 특정 대상에 반드시 물리적으로 적용할 수 있는 일반적인 조건은 아니다. 다수의 연구자들은 평활함의 조건이 특정 상황에 적합하지 않다고 지적하고, 폐쇄 모서리와 관련하여 유동 추정을 조사했다. 마찬가지로 평활함의 제약 조건은 탄성체 및 유체의 경우 물리적 특성과 일치하지 않는다. 따라서 탄성 대상의 시각화를 위한 물리학 기반의 방법이 제안되었다[11,12,13].

본 논문에서는 유체의 유동영상을 촬영한 실영상 계열에 유체와 경로에 대한 지식과 속도장의 안정화 항을 사용하여 유동을 보간함으로써 시공간적 해상도와 추정의 신뢰성을 나타낸다.

II. 속도장추정수법

2.1. 시공간 영상계열

어떤 화소가 공간 내를 이동하는 궤적 상의 각 화소를

시간 축에 여러 겹으로 겹쳐지면 그림 1과 같이 화소의 이동 경로를 알 수 있다.

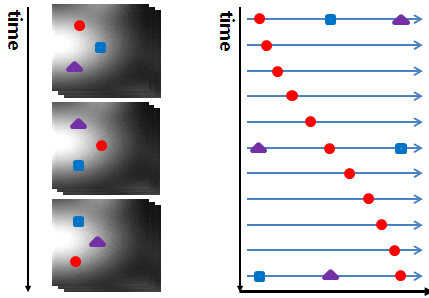


Fig. 1 Image sequence

화소의 각 점에 있어서 속도가 시간적으로 일정하다고 가정하면, 각 점에서의 화소의 이동은 모든 시간에 있어서 같은 기울기를 가진 직선으로 근사할 수 있다.

본 논문은 구속식으로 Gradient법의 구속식을 시공간에 확장한 것을 도입한다. $P(x,y,t)$ 를 영상 내의 점 (x,y) 의 시각 t 에 의한 명도, $u(x,y)$, $v(x,y)$ 를 각각 영상 내의 점 (x,y) 에 의한 속도벡터의 x 성분과 y 성분으로 하여 식(1)에 제시한 평가함수를 정의한다.

$$E(x,y) = \int (P_x u(x,y) + P_y v(x,y) + P_t)^2 dt \quad (1)$$

실제 유체영상은 시간경과에 따른 그 속도가 변화하지만 본 논문에서는 각 점을 통과하는 순간에 농도는 보존되어 있다고 가정한다.

식(1)은 u , v 에 대하여 선형방정식으로 되어 있기 때문에 최소2승법을 이용하여 최소화하여 속도장을 복원한다.

2.2. 속도장의 안정화

유체영상에 있어서 노이즈가 많이 포함되어 있기 때문에 안정된 속도장을 구하기 위해 식(1)에 속도장의 안정화항 E_s 를 추가한다.

$$E(x,y) = \int ((P_x u + P_y v + P_t)^2 + \lambda E_s) dt \quad (2)$$

$$E_s(x,y) = (u^2 + v^2)$$

식(2)의 제2항은 영상구속이 강한 경우에는 속도를 거의 보존하게 되며, 영상구속이 약한 경우에는 속도를 거의 0으로 하는 구속 항이다. 이 항을 구속식에 도입하는 것으로부터 노이즈에 의한 왜곡된 속도장의 추정을 막을 수 있다. 식(2)에 있어서 λ 는 안정화 항과 영상 정보구속과의 무게 인자이다.

속도장의 공간적 스무딩 구속을 사용하지 않고 안정화 항인 E_s 를 이용한 것은 다음의 이유이다.

- (1) 스무딩 구속을 이용하는 경우에는 소용돌이 등 속도변화가 큰 영역의 오차가 커지게 된다.
- (2) 스무딩 구속을 이용한 경우, 유체영역이외에서도 속도장이 추정되는 가변성이다. 더욱이 유벽 부근의 속도장 추정에 있어서 유체영역이외의 영향을 받을 가능성이 크다.
- (3) 안정화 항 E_s 는 속도 크기가 0인 구속이다. 그러나 영상 정보가 겹치지 않는다고 가정한다면, 영상의 명도 불변 구속조건을 만족하는 값들 중에 가장 미세한 속도를 추정하여 고정밀도를 기대할 수 있다.

2.3. 속도의 시간변화를 고려한 광류추정

유체의 경우에 각 속도는 시간적으로 일정하지 않다. 각 시각에 의한 각 점의 속도는 직선으로 근사할 수 있지만, 직선의 경사는 유지되는 것이 바람직하다. 본 논문은 각 영상 간의 시간 간격을 보정하는 것으로 각 점에 의한 속도, 즉 구속 직선의 기울기를 가급적 일정하도록 보정하였다. 시간 간격의 보정계수 $\alpha(t)$ 를 도입한 평가함수를 식(3)에 나타낸다.

$$E(x,y) = \int \{(P_x u + P_y v + P_t \alpha(t))^2 + \lambda E_s\} dt \quad (3)$$

여기서 $\alpha(t)$ 는 각 시각에 의한 각 영상 간의 시간 간격을 보정하는 계수이다. 구체적으로 유체속도가 빠른 경우는 영상의 시간 간격을 넓게, 느린 경우에는 좁게 잡아 보정을 실현한다. 식(3)을 최소 2승법을 이용하여 시간적으로 보정한 속도장을 추정한다. 식(3)의 시간 간격 보정항인 $\alpha(t)$ 는 식(4)에 의해 추정한다.

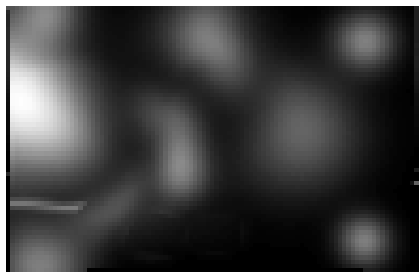
$$E_\alpha(t) = \int \{(P_x u + P_y v + P_t \alpha(t))^2 + \lambda E_s\} ds \quad (4)$$

$$ds = dx dy$$

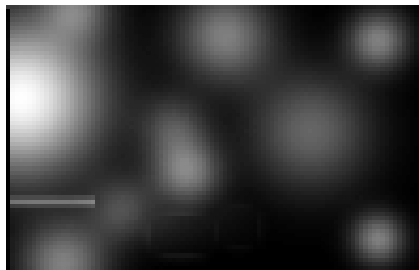
III. 시뮬레이션

3.1. 유체 수치 데이터에 의한 생성 영상

본 수법은 수치 데이터에 의해 생성영상 데이터를 이용하여 검토한다. 대상으로 하는 속도장은 관내 흐름의 축 방향 단면의 2차원 속도장으로 한다. 유체가 관내를 수평방향으로 흐르고 있는 경우 영상 시퀀스를 생성하여 실험을 진행하였다. 생성영상은 256레벨 계조로 24장을 생성했다. 시뮬레이션에 사용된 2개의 샘플 생성영상과 참값에 의해 생성된 속도장을 각각 그림 2와 그림 3에 나타낸다.



(a) First Frame



(b) Second Frame

Fig. 2 Generated Frames

3.1.1. 생성 영상에 의한 속도장 추정

그림 2에서 생성된 영상계열로부터 속도장을 추정한다. Horn and Schunck기법과 제안수법으로 추정한 속도장을 각각 그림 4(a), (b)에 나타낸다.

그림 4(a)는 소용돌이가 큰 경우에 형태가 흐트러짐과 동시에 경계부근과 변위가 큰 장소에서 속도장의 오차가 발생되고 있다. 이에 반해, 제안 수법은 경계부근과 변위가 큰 경우에도 참값에 근사한 속도장을 추정하고 있다. 또한 소용돌이 후미의 곡류(meander)한 흐름도 잘 추정되었다. 속도장의 복원 결과, 본 제안 기법이

Horn and Schunck기법의 복원 결과보다 73.92% 개선되었다. 표 1에 오차 및 수정률을 나타낸다.

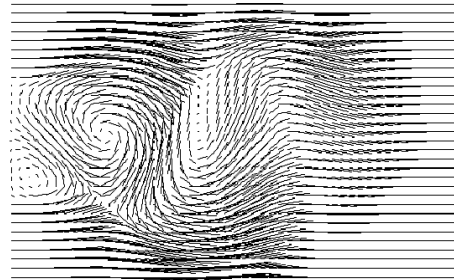
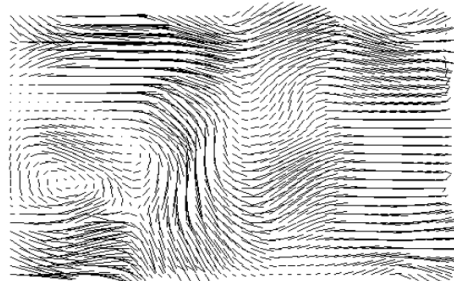
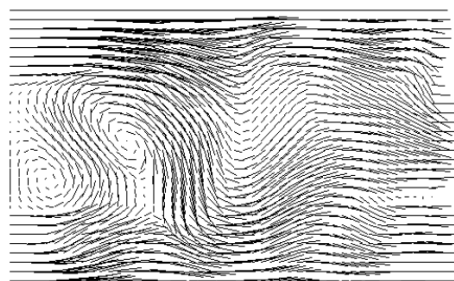


Fig. 3 Generated flow



(a)



(b)

Fig. 4 Velocity Field by (a)Horn and Schunck and (b)proposed method

Table. 1 Computed mean square error and adjusting rate of Fig. 4

Methods	Mean Square Error	Adjusting Rate(%)
Horn and Schunck	5.444	-
Proposed	1.420	73.92

3.1.2. 실영상의 적용

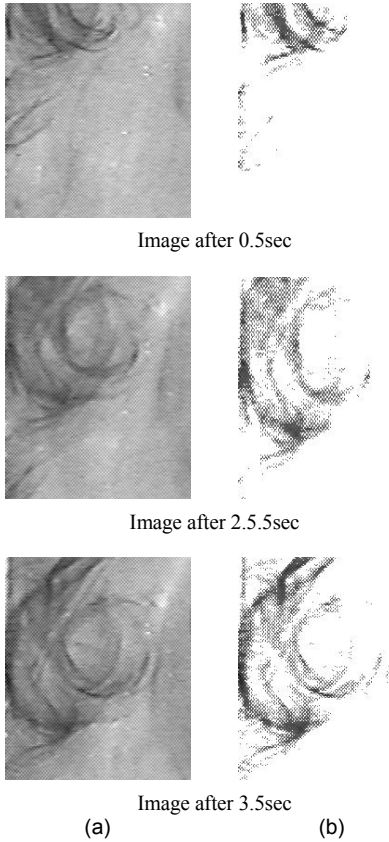


Fig. 5 Examples of (a)Real and (b)Preprocessing images

실영상 데이터는 karman와류의 영상정보를 얻기 위해서 상류부터 색소를 흘려보내고, 수로 옆면에 라이트를 설치하여 비디오카메라로 촬영하였다.

본 연구에 사용된 영상은 총8장이며, 크기는 200×250이다. 관심 영역의 영상 데이터는 karman와류가 발생한 일부분을 촬영하였지만 표면류 흐름 이외에 내부류도 포함되어 있다. 표면에 흐르는 색소의 명도는 110 이하 부근을 잘라내어 전처리 과정을 진행하였다. 그림 5(a), (b)에 원영상과 전처리 후의 샘플 영상들을 각각 나타낸다.

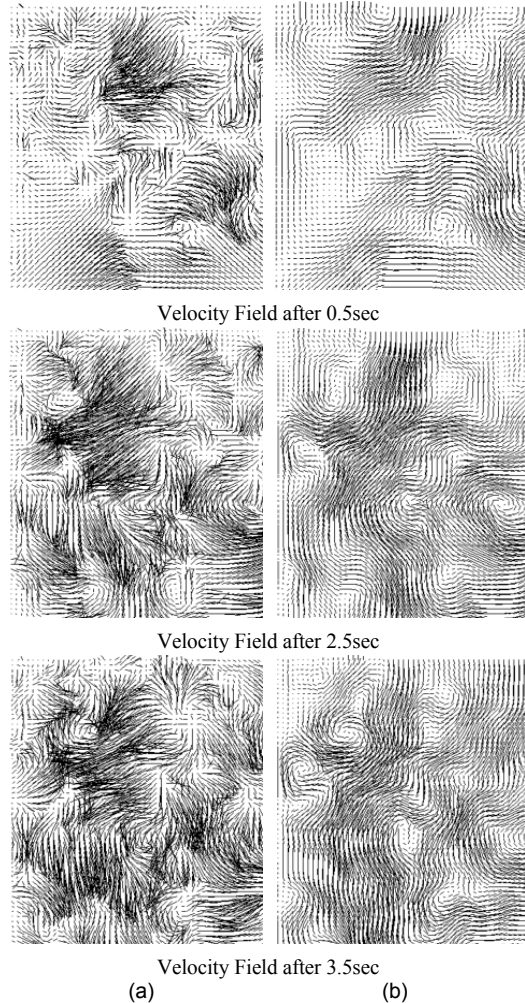


Fig. 6 Velocity Field of (a)Horn Schunck and (b)Proposed methods

3.2. 추정결과

본 논문에서는 전처리 후의 그림 5(b)를 입력 영상으로 하여 속도장을 추정하였다. Horn and Schunck기법과 제안기법을 적용하여 얻은 추정 속도장의 결과로부터 좌측상단 부분을 잘라내어 각각 그림 6(a), (b)에 나타낸다. 그림 6의 추정 속도장의 결과에서 확인이 가능하듯이 Horn and Schunck기법보다 제안기법에서 와류의 발생 영역이 정확하게 표현되고 있다. 또한, 추정된 속도장에 따라서 초기영상의 각 화소를 이동시키는 것으로 생성된 영상을 그림 7에 나타낸다.

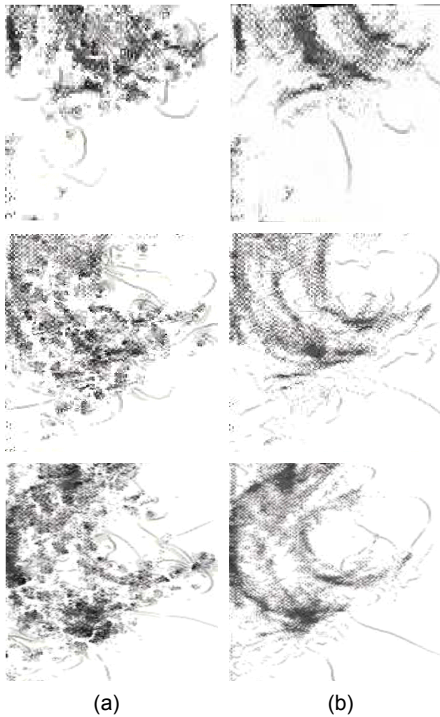


Fig. 7 Estimation images of (a)Horn Schunck and (b)Proposed methods

Horn and Schunck의 기법과 제안한 기법에 의해 생성된 영상인 그림 7(a), (b)와 전처리 후의 입력 영상인 그림 5(b)와의 유사도는 식(5)에 의해 측정하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다. 평균 유사율은 Horn and Schunck의 기법은 95.38%지만, 제안 기법은 98.36%로 약 2.98% 개선되었다. 그 결과 제안 기법에 의해서 획득한 생성 영상이 실영상에 근사함을 나타낸다.

$$Correlation = \quad (5)$$

$$\frac{\sum_x \sum_y [\rho_2(x,y) - \bar{\rho}] [\hat{\rho}_2(x,y) - \hat{\bar{\rho}}_2]}{\sqrt{\sum_x \sum_y [\rho_2(x,y) - \bar{\rho}]^2} \sqrt{\sum_x \sum_y [\hat{\rho}_2(x,y) - \hat{\bar{\rho}}_2]^2}}$$

여기서, $\bar{\rho} = [\sum_x \sum_y \rho_2(x,y)] / M \times N$, $\hat{\bar{\rho}}_2 = [\sum_x \sum_y \hat{\rho}_2(x,y)] / M \times N$. $\rho_2(x,y)$ 과 $\hat{\rho}_2(x,y)$ 는 각각 입력 영상과 생성된 영상.

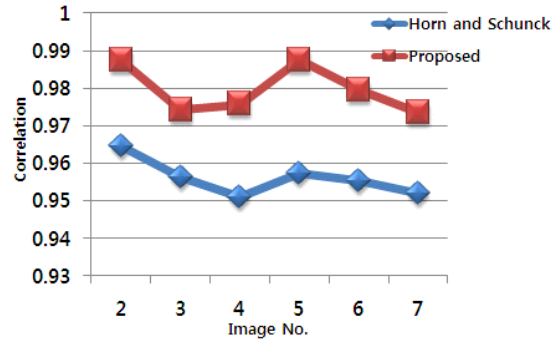


Fig. 8 Comparison of correlations between Input image and estimated image

IV. 결 론

본 논문에서는 컴퓨터 비전의 관점에서 와류의 정보를 지닌 유체 영상계열로부터 속도장을 추정하는 기법을 제안하였다. 제안 기법에서는 속도장의 안정화 향을 고려한 영상 간의 시간 시퀀스를 조절하여, 보다 신뢰성 있는 속도장을 얻는 것을 목적으로 하였다.

Horn and Schunck의 추정 속도장은 전체적으로 물리적 연속성을 갖지 못하였으며, 반면에 제안기법에 의한 속도장은 전체적으로 연속성을 가진 속도장이 추정되어 와류의 발생 영역을 정확하게 확인할 수 있었다. 또한, 생성 영상에 있어서 평균 유사율은 Horn and Schunck의 기법과 제안 기법은 각각 95.38%, 98.36%로 제안 수법이 대략 2.98% 개선된 것을 알 수 있었다. 이후 연구로 실영상으로 부터 자동적으로 시간 시퀀스를 계산하여 속도장 추정이 가능하게끔 검토할 예정이다.

REFERENCES

- [1] H. J. Kim, and J. H. Park, "Robust Dynamic Projection Mapping onto Deforming Flexible Moving Surface-like Objects," *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, vol. 7, no. 6, pp. 897-906, Jun. 2017.
- [2] D. W. Kim, "Moving Object Extraction Using Spatio-Temporal Difference," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 6, no. 8, pp. 1319-1324, Dec. 2002.

- [3] K. K. Yu, S. J. Kim, and D. S. Kim, "Measurement of Two-Dimensional Velocity Distribution of Spatio-Temporal Image Velocimeter using Cross-Correlation Analysis," *J. Korea Water Resources Association*, vol. 47, no. 6, pp. 537-546, Jun. 2014.
- [4] W. M. Muhammad, A. K. Bushra, "Cross Correlation Velocity Measurement of Multiphase Flow," *International Journal of Science and Research*, vol. 4, no. 2, pp. 802-807, Feb. 2015.
- [5] C. Christian, and C. J. Kahler, "Cross-correlation or tracking-comparison and discussion," *16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon: Portugal, pp. 9-12, Jul. 2012.
- [6] D. J. Fleet, and A. D. Jepson, "Computation of component image velocity from local phase information," *International Journal of Computer Vision*, vol. 5, no. 1, pp. 77-104, Aug. 1990.
- [7] Z. Zhang, F. Li, M. Liu and P. K. Yadav. (2016, August). Image Matching Based on Local Phase Quantization Applied for Measuring the Tensile Properties of High Elongation Materials. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* [Online]. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5182106>
- [8] B. Mostofian, C. M. Cai, M. D. Smith, L. Petridis, X. Cheng, C. E. Wyman and J. C. Smith, "Local Phase Separation of Co-solvents Enhances Pretreatment of Biomass for Bioenergy Applications," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 138, no. 34, pp. 10869-10878, Aug. 2016.
- [9] T. Gautama, and M. A. Van Hulle, "A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering," *Neural Networks, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 5, pp. 1127-1136, Sep. 2002.
- [10] B. K. Horn and B. G. Schunck, "Determining optical flow," *Artificial Intelligence*, vol. 17, pp. 185-203, 1981.
- [11] A. Pentland, and B. Horowitz, "Recovery of nonrigid motion and structure," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 7, pp. 730-742, 1991.
- [12] Y. Wang, X. Yan, J. Zheng, and M. Jiang. (2015, April). Sparse Approximation for Nonrigid Structure from Motion. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering* [Online]. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/435385>.
- [13] W. Gong, X. Zhang, J. Gonzalez, A. Sobral, T. Bouwmans, C. Tu, and E. Zahzah, "Human Pose Estimation from Monocular Images: A Comprehensive Survey," *Sensors*, vol. 16, no. 12, pp. 1-39, Dec. 2016.



김형권(Hyeong-Kwon Kim)

2009년 동명대학교 정보통신공학과 학사
 2015년 경성대학교 정보통신공학과 석사
 2017년 경성대학교 컴퓨터공학과 박사수료
 2018년 4월~현재 (일)동경의과치과대학 객원연구원
 ※관심분야 : 의료영상처리, 패턴인식, 영상처리, 의료임베디드시스템



김진우(Jin-Woo Kim)

1992년 명지대학교 전기공학과 학사
 1996년 (일)Fuku이대학 전자공학과 석사
 1999년 (일)Fuku이대학 전자공학과 박사
 2000년~2003년 2월 국립한밭대학교 컴퓨터정보통신공학부 계약교수
 2003년 3월~현재 경성대학교 정보통신공학과 교수
 ※관심분야 : 패턴인식, 의료영상처리, 영상처리, 의료임베디드시스템