

표면영상유속계를 이용한 하천의 유속측정 기술 개발

Development of a Velocity Measurement Technique with Surface Image Velocimetry

류권규*, 김남길**, 윤병만***

Kwonkyu Yu, Namkil Kim, Byungman Yoon

요 지

표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)는 수표면의 영상분석을 통해 유속을 측정하는 도구이다. SIV는 하천의 유속을 매우 간편하게 측정할 수 있기 때문에, 야외 실험이나 하천의 유속 측정에 매우 유용한 장비이다. 그러나, SIV를 이용하여 유량을 산정하고자 할 경우, 하천 표면의 평면 측량 자료와 하천의 단면 측량 자료가 반드시 필요하다. 그러나, 측량 작업 특히 강우 중의 측량 작업은 매우 번거롭기 때문에, SIV의 간편성과 유용성에도 불구하고, 이용자들로 하여금 SIV를 쉽게 이용하기 어렵다는 그릇된 인식을 줄 수 있다. 만일 번거로운 측량을 거치지 않고도 효율적이고 간편하게 하천의 평면을 추정할 수 있다면, SIV를 마치 일반적인 프로펠러 유속계처럼 쉽게 이용할 수 있을 것이며, 그 적용성도 크게 증진될 것이다. 본 연구는 카메라 영상 모형을 유도하는 것이다. 이 카메라 모형을 이용하여 번거로운 측량 작업이 없이 평면의 좌표점을 추정할 수 있게 되며, 유속장 측정을 자동화할 수 있을 것이다. 이를 위하여 평면 좌표와 참조점을 관련짓는 사영 변환과 회전 변환 등 사진 측정 기법을 도입하였다.

핵심용어 : 표면 영상 유속계(SIV), 유속 측정, 영상 분석, 카메라 영상 모형

1. 서론

표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimetry)는 수표면의 영상분석을 통해 유속을 측정하는 매우 유용하고 간편한 도구이다. SIV는 하천의 유속을 매우 간편하게 측정할 수 있기 때문에, 야외 실험이나 하천의 유속 측정에 매우 유용한 장비이다. 그러나, SIV를 이용하여 유량을 산정하고자 할 경우, 하천 표면의 평면 측량 자료와 하천의 단면 측량 자료가 반드시 필요하다. 그러나, 측량 작업 특히 강우 중의 측량 작업은 매우 번거롭기 때문에, SIV의 간편성과 유용성에도 불구하고, 이용자들로 하여금 SIV를 쉽게 이용하기 어렵다는 그릇된 인식을 줄 수 있다. 이런 문제를 극복하기 위하여 류권규 등(2008, 2009)은 내부 보정된 카메라를 이용하여, 현지 측량이 없이 SIV를 적용할 수 있는 방법을 개발하였다. 본 연구는 이러한 연구를 보완하여, 카메라 영상 모형(camera imaging model)을 이용하여 내부 보정 절차까지도 생략할 수 있는 기법을 개발하는 것이다. 이를 통하여 SIV의 적용성을 증진시키기 위한 것이다.

* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 조교수 · E-mail: pururumi@deu.ac.kr

** 정회원 · 동의대학교 토목공학과 박사후 과정 · E-mail: kils0008@hanmail.net

*** 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : bmyoon@mju.ac.kr

2. SIV의 구성

SIV에서는 물리 공간을 영상 평면으로 만드는 과정에서 필연적으로 영상 왜곡이 발생한다. 일반적으로 영상 왜곡은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 첫째는 실제 사물은 3차원 공간상에 존재하므로 이를 영상으로 전환할 경우, 2차원 평면 형태로 저장되기 때문에 발생하는 왜곡이고, 둘째는 카메라의 촬영 각도에 따른 사물의 원근에 의해 발생하는 왜곡이다(노영신, 2005).

따라서, SIV에서는 반드시 물리 좌표계(physical coordinate)와 영상 좌표계(image coordinate)간의 관계를 이용하여 영상에 대한 왜곡을 수정해주어야 한다.

실제 좌표계와 영상 좌표계간의 관계는 그림 Fig. 1과 같다. 두 좌표계간의 관련을 짓기 위해 이용되는 점들을 참조점(reference points)라고 하며, 참조점은 보통 하천 양안에서 몇 개의 점을 선정하여 정하게 된다. 참조점은 측량을 통해 얻게 된다. 그런데, 이런 측량 작업을 해야 한다는 점이 SIV의 적용성을 크게 떨어뜨리게 된다. 특히 호우시의 하천 측량은 거의 불가능하다고 보아야 할 것이다. 물론 청천시에 미리 대상 구역을 평면 측량하여 참조점들의 위치를 알고 있으면 되지만, 이런 작업이 항상 가능한 것은 아니다. 또한, 하천의 폭이 매우 넓어서 적절한 수의 참조점을 찾기 곤란한 경우도 있을 것이다. 따라서, 이를 극복할 수 있는 방안으로 참조점이 필요없는 SIV의 개발이 필요한 것이다.

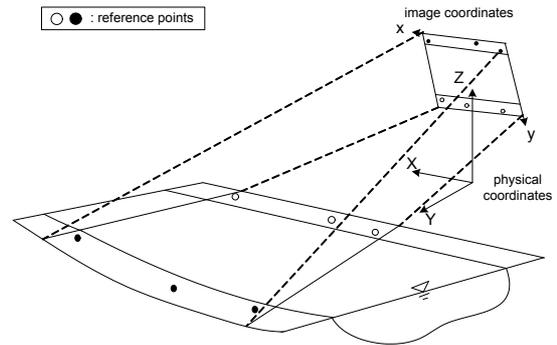


Fig. 1 Reference points for coordinate transform (Fujita et al., 1998)

3. 영상 변환식의 구성

3.1 사영 변환

이 연구는 사진 측량 기법을 이용하여, 사진기의 사영 변환, 좌우 및 전후 기울기, 카메라의 위치 등을 추정하는 모형을 제시한다.

이를 위해서는 먼저 물리 공간의 물체(또는 수면)이 카메라(비디오 카메라)의 영상면에 형성되는 관계를 나타내는 카메라 모형을 구성하여야 한다. 이 카메라 모형은 카메라 렌즈를 통하여 물체가 카메라의 투영면에 투영되는 사영 변환(perspective transform)과 카메라가 삼차원 물리 공간에서의 이동, 회전 등에 의한 공간 변화를 나타내는 변형으로 이루어져 있다(Bow, 2002; Pratt, 2007).

먼저, 물리 공간상의 어떤 물체의 좌표 벡터 \mathbf{v} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 영상면을 일단 $x-y$ 좌표로 잡고, 이에 대한 물리 공간의 대응 관계를 만들기 때문에 물리 공간의 $X-Y-Z$ 축이 일반적인 경우와 다르다는 것을 유념해야 한다. 이 벡터 \mathbf{v} 에 대응하는 동차 벡터(homogeneous vector) $\tilde{\mathbf{v}}$ 는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{v}} = \{sX \ sY \ sZ \ s\}^T \quad (1)$$

여기서 s 는 동차 벡터로 나타내기 위한 임의의 상수이다. 마찬가지로 영상 좌표 벡터 \mathbf{w} 에 대응하는 동차 벡터 $\tilde{\mathbf{w}}$ 는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{w}} = \{w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4\}^T = \left\{ sX \ sY \ sZ \ s - \frac{sZ}{f} \right\}^T \quad (2)$$

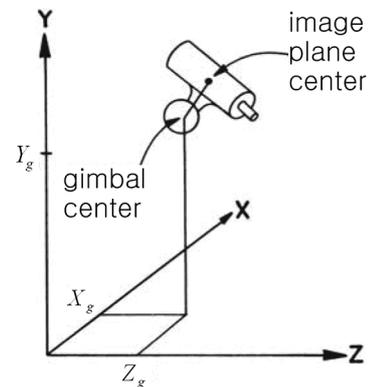


Fig. 2 Camera imaging model (Pratt, 2007)

여기서, f 는 렌즈의 초점 거리이다. 그러면, 물리공간 좌표와 영상 공간 좌표는 다음의 관계를 가진다.

$$\tilde{w} = P\tilde{v} \quad (3)$$

여기서, P 는 사영 변환이다.

3.2 카메라 영상 모형

카메라가 삼차원 물리 공간에서의 이동, 회전 등에 의한 공간 변화를 나타내는 변형으로 이루어진 카메라 모형을 개념적으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 물체가 카메라 영상면에 맺히기까지에는 여러 가지 변환과 이동이 결합되어 있다. 이를 차례로 보이면 다음과 같다.

1) 물리 좌표 원점

물리 좌표는 (X, Y, Z) 로 나타낼 수 있으며, 원점은 $(0, 0, 0)$ 에 있다. 물리 좌표는 v 로 나타낼 수 있으며, 이것을 동차 행렬(homogeneous matrix)로 나타내면 \tilde{v} 이다.

2) 받침대 위치

받침대(gimbal)은 물리 좌표로 (X_g, Y_g, Z_g) 에 위치하고 있다. 따라서, 물리 좌표에 받침대까지 이동 변환이 있다. 이 변환은 기호로 T_g 로 나타낸다.

3) 기울기

카메라의 기울기에 따라 영상이 변화한다. 기울기에는 X 축에 대해 회전하는 전후 기울기 α , Y 축에 대해 회전하는 수평면 회전(rotation) β , Z 축에 대해 회전하는 좌우 기울기 γ 가 있다. 이 때 회전각은 반시계 방향을 양(+)으로 한다. 이 변환을 나타내는 행렬을 각각 R_α , R_β , R_γ 이다.

4) 받침대-카메라 중심 거리

영상에 영향을 미치는 또 하나의 요소는 받침대에서 카메라의 중심까지의 거리(gimbal-to-camera distance)이며, T_c 로 나타내기로 한다.

5) 축척 행렬

카메라의 경우 앞의 2.1절에서 설명한 사영 변환(perspective transform)에 의해 생기는 축척(scaling)이 생긴다. 이 축척을 나타내는 행렬은 P , 식 (6)이다. 그리고, 실제의 카메라 내부의 영상면의 크기(길이 단위)와 파일로 저장되는 영상의 크기(화소 단위)의 변환 계수 S 가 하나 있다. 이 때, 축척 변환 계수 S 는 $S_x = S_y = S_z = S$ 와 같이 모든 방향의 축척이 같다는 의미이다. 그러나 많은 경우 식 (3)의 변환에서 f 에 S 의 값이 이미 반영되어 있다고 볼 수도 있고, 나중에 추가적으로 이 값을 하나 곱해주어도 된다.

위의 단계를 전부 나타내면, 어떤 물리 공간의 점 (X, Y, Z) 는 영상점의 좌표 (x, y, z) 로 다음과 같이 사영된다.

$$\tilde{w} = SP T_c R T_g \tilde{v} \quad (4)$$

여기서, R 은 R_α , R_β , R_γ 의 곱이다. R 은 어느 각을 먼저 회전하는가에 따라 값이 달라지는 데, 여기서는 Y 축을 중심으로 한 수평 회전 $\rightarrow X$ 축을 중심으로 한 전후 회전 $\rightarrow Z$ 축을 중심으로 한 좌우 회전의 순으로 일어난다고 가정한다. 그러면, R 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P T_c R T_g = \begin{bmatrix} c_\gamma c_\beta - s_\gamma s_\alpha s_\beta & s_\gamma c_\alpha & c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\alpha c_\beta & -X_g(c_\gamma c_\beta - s_\gamma s_\alpha s_\beta) - Y_g s_\gamma c_\alpha - Z_g(c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\alpha c_\beta) - X_c \\ -s_\gamma c_\beta - c_\gamma s_\alpha s_\beta & c_\gamma c_\alpha & -s_\gamma s_\beta + c_\gamma s_\alpha c_\beta & X_g(s_\gamma c_\beta + c_\gamma s_\alpha s_\beta) - Y_g c_\gamma c_\alpha + Z_g(s_\gamma s_\beta - c_\gamma s_\alpha c_\beta) - Y_c \\ -c_\alpha s_\beta & -s_\alpha & c_\alpha c_\beta & X_g c_\alpha s_\beta + Y_g s_\alpha - Z_g c_\alpha c_\beta - Z_c \\ \frac{c_\alpha s_\beta}{f} & \frac{s_\alpha}{f} & -\frac{c_\alpha c_\beta}{f} & \frac{-X_g c_\alpha s_\beta - Y_g s_\alpha + Z_g c_\alpha c_\beta + Z_c}{f} + 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

그러면, 영상점 좌표 (x,y) 와 물리 공간 좌표 (X,Y,Z) 의 관계는 다음과 같다.

$$x = \frac{Xf(c_\gamma c_\beta - s_\gamma s_\alpha s_\beta) + Yf(s_\gamma c_\alpha) + Zf(c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\alpha c_\beta)}{(Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - X_g c_\alpha s_\beta - Y_g s_\alpha + Z_g c_\alpha c_\beta + Z_c) + f} \quad (6.a)$$

$$+ \frac{f[-X_g(c_\gamma c_\beta - s_\gamma s_\alpha s_\beta) + Y_g s_\gamma c_\alpha + Z_g(c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\alpha c_\beta) + X_c]}{(Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - X_g c_\alpha s_\beta - Y_g s_\alpha + Z_g c_\alpha c_\beta + Z_c) + f}$$

$$y = \frac{-Xf(s_\gamma c_\beta + c_\gamma s_\alpha s_\beta) + Yf(c_\gamma c_\alpha) + Zf(-s_\gamma s_\beta + c_\gamma s_\alpha c_\beta)}{(Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - X_g c_\alpha s_\beta - Y_g s_\alpha + Z_g c_\alpha c_\beta + Z_c) + f} \quad (6.b)$$

$$+ \frac{f[X_g(s_\gamma c_\beta + c_\gamma s_\alpha s_\beta) - Y_g c_\gamma c_\alpha + Z_g(s_\gamma s_\beta - c_\gamma s_\alpha c_\beta) - Y_c]}{(Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - X_g c_\alpha s_\beta - Y_g s_\alpha + Z_g c_\alpha c_\beta + Z_c) + f}$$

여기서 행렬 요소를 나타내는 삼각함수는 수식의 길이를 줄이기 위해 약어로 표시하였으며, $c_\alpha = \cos \alpha$, $s_\alpha = \sin \alpha$, $c_\beta = \cos \beta$, $s_\beta = \sin \beta$, $c_\gamma = \cos \gamma$, $s_\gamma = \sin \gamma$ 를 각각 의미한다.

위의 식 (6)이 완전한 카메라 영상 모형이다. 이 기법들은 영상 분석(Bow, 2002; Pratt, 2007)과 컴퓨터 시각 (Ballard와 Brown, 1982) 분야에서 오랜 동안 연구되어 온 것이다. 다만, 일반적인 경우는 Y 축에 대한 회전 β 를 고려하지 않아도 되기 때문에 이보다는 간단한 형태로 나타난다. 본 연구에서도 이 회전각은 보정에서만 필요하며, 실제 이용시에는 필요하지 않다.

그러나, 이 식을 그대로 이용하기에는 너무 복잡하므로, 몇 가지 가정을 통해 쉽게 이용할 수 있는 식으로 재구성할 필요가 있다.

첫째, 만일 카메라와 받침대 사이의 거리가 매우 짧다고 가정하면, $X_c = Y_c = Z_c = 0$ 이다. 또, 둘째, 받침대가 $(0, Y_g, 0)$ 에 위치한다고 가정하면, $X_g = Z_g = 0$ 이다. 이를 이용하여 구한 영상 좌표 (x,y) 와 물리 좌표 (X,Y,Z) 의 관계는 다음과 같다. 이 때, 영상 좌표계의 z 좌표는 0으로 간주할 수 있으므로 생략한다.

$$x = \frac{Xf(c_\gamma c_\beta - s_\gamma s_\alpha s_\beta) + Yf(s_\gamma c_\alpha) + Zf(c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\alpha c_\beta) + fY_g s_\gamma c_\alpha}{Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - Y_g s_\alpha + f} \quad (7.a)$$

$$y = \frac{-Xf(s_\gamma c_\beta + c_\gamma s_\alpha s_\beta) + Yf(c_\gamma c_\alpha) + Zf(-s_\gamma s_\beta + c_\gamma s_\alpha c_\beta) - fY_g c_\gamma c_\alpha}{Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - Y_g s_\alpha + f} \quad (7.b)$$

그런데, 우리는 영상 좌표에서 (x,y) 의 크기를 알지 못하며(보정에 의해 f 를 구한 뒤에는 알 수 있다), 실제로 아는 것은 파일 상태에서 화소점의 위치 (p,q) 를 알 뿐이다. 따라서, 영상 좌표 (x,y) 와 물리 좌표 (X,Y,Z) 의 관계가 아닌 화소 좌표(pixel coordinate) (p,q) 와 물리 좌표 (X,Y,Z) 의 관계를 알아야 한다. 영상 좌표 (x,y) 와 화소 좌표 (p,q) 사이는 Fig. 3과 같으며, 식 (7)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$p = \frac{-XSf(c_\gamma c_\beta - s_\gamma s_\alpha s_\beta) - YSf(s_\gamma c_\alpha) - ZSf(c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\alpha c_\beta) - fSY_g s_\gamma c_\alpha}{Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - Y_g s_\alpha + f} + p_0 \quad (8.a)$$

$$q = \frac{+XSf(s_\gamma c_\beta + c_\gamma s_\alpha s_\beta) - YSf(c_\gamma c_\alpha) - ZSf(-s_\gamma s_\beta + c_\gamma s_\alpha c_\beta) + fSY_g c_\gamma c_\alpha}{Xc_\alpha s_\beta + Ys_\alpha - Zc_\alpha c_\beta - Y_g s_\alpha + f} + q_0 \quad (8.b)$$

또한, 식 (8)은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{d_1 X + d_2 Y + d_3 Z + d_4}{d_9 X + d_{10} Y + d_{11} Z + 1}, \quad q = \frac{d_5 X + d_6 Y + d_7 Z + d_8}{d_9 X + d_{10} Y + d_{11} Z + 1} \quad (9)$$

3.3 역변환

한편, 역변환에 의해 영상 좌표에서 물리 좌표를 구할 수 있다. 다만, 이때 파일 평면 (p, q) 에서 물리 좌표 (X, Y, Z) 로 변환관계는 일대다의 대응관계이기 때문에 추가적인 정보를 필요로 한다. 여기서 수면고를 Y 라 하여 알고 있다고 가정하자. (일반적인 경우는 $Y=0$ 로 놓을 수 있을 것이다.) 그러면, 물리 좌표 (X, Y, Z) 는 다음과 같이 계산된다.

$$X = \frac{e_1 Y + e_2}{e_5}, \quad Z = \frac{e_3 Y + e_4}{e_5} \quad (10)$$

필요한 변수는 사진기의 초점 거리와 축척(f), 수평 회전(β), 전후 기울기(α), 좌우 기울기(γ), 카메라의 높이(Y_g), 물체의 높이 Y 의 총 6개이다. 이 방법을 이용하면 번거로운 측량에 의존하지 않고도, 표면 유속장을 쉽게 추정할 수 있다. 변수 f 는 카메라의 내부 보정을 통해 결정하며, α 와 γ , β 는 경사계(clinometer)를 이용하여 측정하며, Y 와 Y_g 는 거리계를 이용하여 측정할 수 있다.

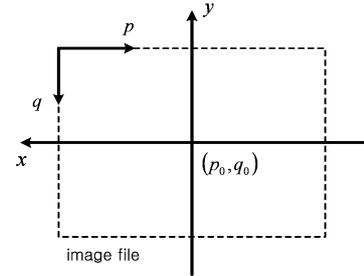


Fig. 3 Image coordinate and pixel coordinate

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 사영 변환과 카메라 영상 모형을 이용하여, 물리 좌표와 영상 좌표의 관계를 유도하였다. 식의 유도에는 초점 거리와 축척(f), 수평 회전(β), 전후 기울기(α), 좌우 기울기(γ), 카메라의 높이(Y_g), 물체의 높이 Y 를 고려하였다. 유도된 방정식을 표면 영상 유속계에 적용하면 참조점을 필요로 하지 않는 표면 영상 유속계를 만들 수 있다. 번거로운 측량을 거치지 않고도 효율적이고 간편하게 하천의 평면을 추정할 수 있다면, 표면영상유속계를 마치 일반적인 프로펠러 유속계처럼 쉽게 이용할 수 있을 것이며, 그 적용성도 크게 증진될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

노영신 (2005), 영상해석기술을 이용한 하천유량측정기법 개발, 명지대학교 토목환경공학과, 박사학위논문

류권규, 정범석, 윤병만 (2008) “보정된 카메라를 이용한 표면 영상 유속계의 좌표 변환 방법”, 수자원학회논문집, 제41권 제7호, pp.701-709.

류권규, 김남길, 윤병만 (2009) “참조점이 필요없는 표면 영상 유속계를 위한 카메라 모형의 개발”, 대한토목학회 정기학술발표회 논문집, 대한토목학회.

Ballard, D.H. and Brown, C.M. (1982) *Computer vision*, Prentice Hall.

Bow, S.-T. (2002). *Pattern recognition and image preprocessing*, Marcell Dekker, Inc., New York.

Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. (1998), "Large-Scale Particle Image Velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering application", *J. of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.36, No.3, 397

Pratt, W.K. (2007) *Digital image processing*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc.