

사진 측정 기법을 이용한 스테레오 표면영상유속계의 개발

Development of Stereoscopic Surface Image Velocimetry using Photogrammetric Techniques

류권규¹⁾, 김대곤²⁾, 윤병만³⁾
Kwonkyu Yu, Daegon Kim, Byungman Yoon

요 지

표면영상유속계는 하천 표면의 영상을 분석하여 유속을 산정하는 매우 실용적이며 간편한 장비이다. 그러나, 표면영상유속계를 이용하여 유량을 산정하고자 할 경우, 하천 표면의 평면 측량 자료와 하천의 단면 측량 자료가 반드시 필요하다. 이 때문에 표면영상유속계의 간편성과 유용성에도 불구하고, 이용자들이 쉽게 이용하기 어렵다는 그릇된 인식을 줄 수 있다. 만일 효율적이고 간편하게 하천의 단면을 추정할 수 있다면, 표면영상유속계를 마치 일반적인 프로펠러 유속계처럼 쉽게 이용할 수 있을 것이다.

이 연구는 일반적인 평면 측량없이, 두 대의 비디오 카메라로 이루어진 표면 영상 유속계를 이용하여 하천 평면을 계측하는 방법을 개발하는 것이다. 이를 통하여 표면 영상 분석 과정을 반자동화할 수 있게 된다. 두 대의 카메라를 이용한 평면 측량은 사진 측량 분야이나 컴퓨터 비전 분야에서 오랫동안 연구되어 왔다. 이 기법을 표면영상유속계에 적용함으로써 간단하게 하천의 평면 좌표를 구할 수 있도록 하였다. 두 대의 카메라에 대해서는 직접 선형 변환법을 이용하여 내부 표정과 외부 표정을 수행하여 변환의 매개 변수들을 추정하였다. 추정된 변수들과 공간 전방 교회법을 이용하여 하천의 고정된 기준점들의 좌표를 측정한다. 측정된 좌표점들은 기울어진 영상을 연직으로 사영된 평면으로 변환하는 데 이용되며, 이 과정을 통하여 번거로운 하천의 평면 측량 과정을 생략할 수 있게 되었다. 온천천에 실제 적용하여 본 결과, 결과는 아직은 만족할 만한 정도는 아니나, 보다 정밀한 카메라의 보정 등을 통하여 보다 나은 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 스테레오 표면영상유속계, 상호 표정, 절대 표정, 공간 전방 교회법, 평면 측량

1. 서론

홍수시 하천의 유속을 측정하는 일은 많은 위험을 동반하며, 매우 힘들고 어려운 작업이다. 따라서 보다 효율적이고 손쉬운 유량 측정 방법을 개발할 필요가 있다. 표면 영상 유속계(Surface Image Velocimetry)는 홍수시 하천 표면의 영상의 분석을 통하여 표면 유속을 측정하고, 이를 토대로 하천 유량을 추정하는 장비이다. 이 장비는 매우 간편하고 안전하여, 장래 하천의 실시간 유량 측정 장비로서 주목을 받고 있다. 표면 영상 유속계는 1990년대에 일본을 시작으로 미국 등에서 활발한 연구가 진행되어 왔다(Fujita et al., 1997).

SIV에 의한 표면 유속 측정은 가장 큰 장점은 매우 경제적이며, 단시간에 유속 측정을 할 수 있다는 점이다. 측정에 소요되는 시간도 수 초 정도의 녹화된 동영상 또는 수십매 정도의 정지 영상이면 충분하므로, 기존 측정방법에 비해 측정시간을 약 1/10로 단축할 수 있다. 따라서 홍수 측정시 유량이 급격하게 변화하여 신속한

1) 정희원 · 동의대학교 토목공학과 전임강사 · E-mail : pururumi@deu.ac.kr
2) 정희원 · 동의대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : dgkim@nateon.com
3) 정희원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 · E-mail : bmyoon@mju.ac.kr

측정이 필요한 경우에 특히 유용한 방법이다. 또한, 사용하는 측정 장비가 캠코더와 같은 간단한 촬영장치 뿐이므로 측정인원도 기존의 3~4 명에서 1~2 명으로 줄어, 측정 작업을 더욱 효과적으로 수행할 수 있다. 따라서, 홍수와 같이 순간적으로 변하는 상황에서도 원하는 간격으로 유속을 측정할 수 있다(노영신, 2005). 아울러, 전체 흐름장을 파악할 수 있어 교각 또는 수제와 같은 구조물 주변의 국부적인 흐름변화를 파악하기가 용이하다. 따라서 유량측정의 활용뿐만 아니라 수리모형실험 및 하천의 주요 관심영역에 대한 흐름장을 파악하는데도 편리하게 활용될 수 있다.

다만, SIV는 영상에서 분석한 화소 단위의 변위를 실제 물리 공간의 길이 단위로 환산하는 과정이 필요하며, 이를 위해서는 하천의 평면 측량 자료가 반드시 필요하다. 그런데, 하천 현장에서 유속 측정을 하는 경우는 대부분 강우시 또는 악천후시이므로, 사전에 하천 평면을 측량해 두지 않았다면, SIV를 적용하는 데 어려움이 있을 수 있다. 본 연구는 보정된 카메라를 이용하여 실제의 평면 좌표(물리 좌표)를 추정하는 방법에 대한 것이다. 이것은 컴퓨터 비전 분야나 사진 측량학 분야에서 오랜 동안 이용하던 기법들을 응용한 것이며, 이를 SIV에 적용하면 보정된 카메라를 이용하여 미측정된 평면 좌표를 산정할 수 있다. 따라서, 현장의 평면 측량이라는 번거로운 절차 하나가 생략되어, 유량 측정이 훨씬 신속하고 간편하게 될 수 있다.

2. 영상의 변환

그러나, 표면영상유속계는 어디까지나 하천의 표면 유속을 측정하는 장비이며, 표면 유속을 산정하기 위해서는 필수적으로 하천 표면의 평면 측량이 수반되어야 한다. 즉, 표면 영상 유속계에서는 영상을 흐름면에 비스듬하게 잡기 때문에 이에 따른 영상 왜곡(정확히는 사영 변환)이 생기게 된다. 따라서, 몇 개의 기준점을 이용하여 영상을 정사영으로 변환하게 된다.

입체시를 형성하기 위해 두 대의 카메라를 이용하면, 각각의 카메라를 통해 얻어진 영상은 3개의 위치 요소 (X_o, Y_o, Z_o)와 3개의 회전 요소 (ω, ϕ, κ)를 갖는다. 입체 카메라를 통해 획득된 영상을 이용하여, 촬영 당시의 상황으로 재현하기 위해서는 12개의 표정 요소를 결정해야 한다. 입체시에 의한 카메라의 배치는 그림 1과 같다.

두 대의 카메라에 대한 외부 표정 요소를 알고 있는 경우, 선형 해법에 의해 3차원 위치를 결정할 수 있다. 물리 공간에서 $P(X, Y, Z)$ 인 점이 좌우 사진에 표시된 지점 $p(x_b, y_b)$ 과 $p_r(x_r, y_r)$ 를 찾았을 경우, 외부 표정 요소를 변수로 하는 선형 방정식을 구성하여 3차원 위치를 결정하기 위하여 다음과 같이 계산한다. 단, 이 때 왼쪽 카메라의 위치는 (X_l, Y_l, Z_l) 이고, 오른쪽 카메라는 (X_r, Y_r, Z_r) 에 있다. $p(x_b, y_b)$ 과 $p_r(x_r, y_r)$ 점에 대해 아래의 식과 같은 공선 조건식을 구성할 수 있다(유복모와 토니 쉥크, 2003; Trucco and Verri, 1998).

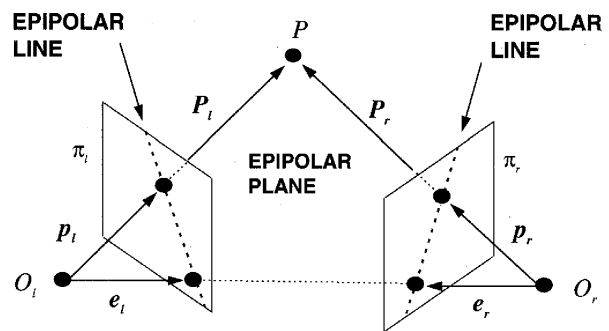


그림 2. 공선 기하

$$x_r = x_l - f \frac{L_{11}(X - X_l) + L_{12}(Y - Y_l) + L_{13}(Z - Z_l)}{L_{31}(X - X_l) + L_{32}(Y - Y_l) + L_{33}(Z - Z_l)}$$

$$y_r = y_l - f \frac{L_{21}(X - X_l) + L_{22}(Y - Y_l) + L_{23}(Z - Z_l)}{L_{31}(X - X_l) + L_{32}(Y - Y_l) + L_{33}(Z - Z_l)}$$

$$\begin{aligned}
x_r &= x_{ro} - f \frac{R_{11}(X - X_r) + R_{12}(Y - Y_r) + R_{13}(Z - Z_r)}{R_{31}(X - X_r) + R_{32}(Y - Y_r) + R_{33}(Z - Z_r)} \\
y_r &= y_{ro} - f \frac{R_{21}(X - X_r) + R_{22}(Y - Y_r) + R_{23}(Z - Z_r)}{R_{31}(X - X_r) + R_{32}(Y - Y_r) + R_{33}(Z - Z_r)}
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, (x_b, y_b) : 좌측 사진에서의 영상 좌표,

(x_r, y_r) : 우측 사진에서의 영상 좌표,

(x_{lo}, y_{lo}) : 좌측 사진의 중심 좌표

(x_{ro}, y_{ro}) : 우측 사진의 중심 좌표

f : 카메라의 초점 거리,

(X_b, Y_b, Z_b) : 좌측 사진의 카메라 위치 좌표,

(X_r, Y_r, Z_r) : 우측 사진의 카메라 위치 좌표,

L_{ij} : 좌측 사진의 강성 변환 행렬 요소,

R_{ij} : 우측 사진의 강성 변환 행렬 요소이다.

식 (1)에서 좌우 사진의 외부 표정 요소를 알고 있을 때, 위 식을 이용하여 지상기준점 좌표 $P(X, Y, Z)$ 를 계산할 수 있다. 이 식들을 각각 (X, Y, Z) 에 대해 정리하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
& \{L_{31}(x_l - x_{lo}) + fL_{11}\}X + \{L_{32}(x_l - x_{lo}) + fL_{12}\}Y + \{L_{33}(x_l - x_{lo}) + fL_{13}\}Z \\
& - \{L_{31}(x_l - x_{lo}) + fL_{11}\}X_l - \{L_{32}(x_l - x_{lo}) + fL_{12}\}Y_l - \{L_{33}(x_l - x_{lo}) + fL_{13}\}Z_l = 0 \\
& \{L_{31}(y_l - y_{lo}) + fL_{21}\}X + \{L_{32}(y_l - y_{lo}) + fL_{22}\}Y + \{L_{33}(y_l - y_{lo}) + fL_{23}\}Z \\
& - \{L_{31}(y_l - y_{lo}) + fL_{21}\}X_l - \{L_{32}(y_l - y_{lo}) + fL_{22}\}Y_l - \{L_{33}(y_l - y_{lo}) + fL_{23}\}Z_l = 0 \\
& \{R_{31}(x_r - x_{ro}) + fR_{11}\}X + \{R_{32}(x_r - x_{ro}) + fR_{12}\}Y + \{R_{33}(x_r - x_{ro}) + fR_{13}\}Z \\
& - \{R_{31}(x_r - x_{ro}) + fR_{11}\}X_r - \{R_{32}(x_r - x_{ro}) + fR_{12}\}Y_r - \{R_{33}(x_r - x_{ro}) + fR_{13}\}Z_r = 0 \\
& \{R_{31}(y_r - y_{ro}) + fR_{21}\}X + \{R_{32}(y_r - y_{ro}) + fR_{22}\}Y + \{R_{33}(y_r - y_{ro}) + fR_{23}\}Z \\
& - \{R_{31}(y_r - y_{ro}) + fR_{21}\}X_r - \{R_{32}(y_r - y_{ro}) + fR_{22}\}Y_r - \{R_{33}(y_r - y_{ro}) + fR_{23}\}Z_r = 0
\end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에서 L_{11} , L_{12} , L_{13} 과 R_{11} , R_{12} , R_{13} 은 초점 거리 f 와 완전히 결합된 상태로 보정되는 것을 알 수 있다. 위의 식 (2)는 다시 몇 개의 기호를 이용하여 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
a_l X + b_l Y + c_l Z + d_l &= 0 \\
e_l X + f_l Y + g_l Z + h_l &= 0 \\
a_r X + b_r Y + c_r Z + d_r &= 0 \\
e_r X + f_r Y + g_r Z + h_r &= 0
\end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_l & b_l & c_l \\ e_l & f_l & g_l \\ a_r & b_r & c_r \\ e_r & f_r & g_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_l \\ -h_l \\ -d_r \\ -h_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

이를 간단히 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\mathbf{p}=\mathbf{k} \quad (5)$$

식 (5)는 방정식의 수가 미지수의 수보다 많은 과대 결정된 문제이다. 따라서, 최소제곱법을 이용하여 $\mathbf{p}=[X, Y, Z]^T$ 를 구할 수 있다.

$$\mathbf{p}=(M^T M)^{-1} M^T \mathbf{k} \quad (6)$$

오른쪽 카메라에 대해서도 같은 방법으로 보정 계수를 구할 수 있다. 이렇게 계산된 두 대의 카메라의 보정 변수를 식 (1)~식 (6)의 관계를 이용하면, 영상에 해당하는 물리 공간의 좌표를 구할 수 있다. 또한, 표면 영상 유속계의 영상 변환 부분에 입력하면(2.1절 참조), 자동으로 영상 변환이 가능하다.

3. 입체 표면 영상 유속계의 적용

3.1 내부 표정

두 대의 동일한 캠코더를 0.9 m 띄워서 고정시키고, 실내에서 표정을 하였다. 그림 2는 내부 표정에 이용된 영상이다. 복도의 바닥은 0.9×0.9 m의 정사각형을 이루고 있다. 이 때 카메라의 높이는 1.5 m이고, 왼쪽 카메라의 위치를 (0.0, 0.0, 0.0)으로 했을 때, 오른쪽 카메라는 (0.9, 0.0, 0.0)이며, 그림 2에서 점 ①은 (0.0, 4.5, -1.5), 점 ②는 (0.9, 4.5, -1.5)가 된다.

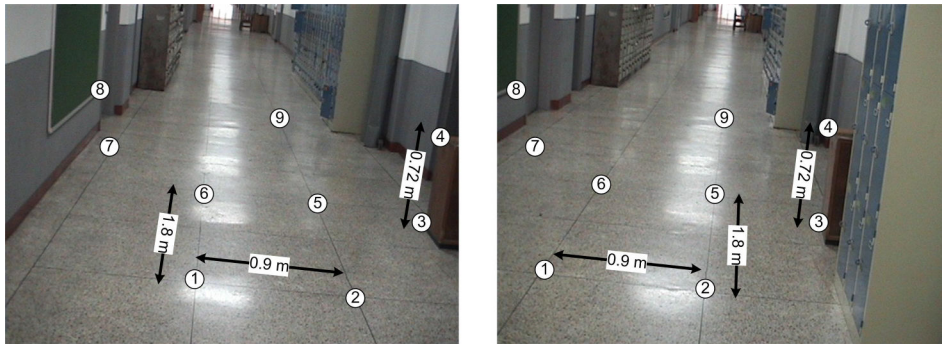


그림 1. 내부 표정용 카메라 영상

그림 2 위의 9개의 점을 이용하여 카메라의 내부 변수들을 표정하였다. 즉, 식 (1)에서 식 (5)까지의 방법으로 왼쪽 카메라와 오른쪽 카메라에 대해 각각 내부 보정 변수들을 산정하였다.

3.2 현장 적용

이렇게 내부 표정이 완료된 카메라를 온천천 현장에 적용하였다. 이 때 카메라의 위치는 수표면에서 5.5 m 높이에 위치하였다. 그림 3은 보정이 완료된 두 대의 카메라를 이용하여 촬영한 온천천의 흐름이다. 단, 좌측 카메라와 우측 카메라는 동시에 촬영된 것이 아니라, 순차적으로 촬영되었다. 평면 측량 결과의 검증을 위해 대상 지역 일대를 평면 측량하였다. 그 결과 하폭은 9.9 m, 그림 2의 좌측 그림에 나타난 참조점의 위치는 왼쪽 카메라로부터 (-0.3, 9.2, -5.5)에 위치하는 것으로 나타났다.



그림 3. 보정된 카메라의 현장 적용

보정된 카메라에 의한 평면 측량 성과는 그림 4의 왼쪽 사진의 네 개의 기준점에 대해 최대 0.5 m 정도로 나타났다. 이것은 측량이라는 면에서는 만족할 만한 결과는 아니며, 추후 보다 정밀한 보정 과정을 통하여 개선해야 할 필요가 있는 것으로 보인다.

한편, 그림 4은 산정된 평면 측량 결과를 이용한 유속 산정결과이다. 유속계로 직접 측정한 결과와 비교하여 아직은 만족할 만한 결과를 보여주지 않았다. 이것은 앞의 측량 오차의 영향을 받았기 때문으로 보인다. 그러나, 실제 측량을 하지 않아도 된다는 간편성을 감안한다면, 추후 카메라의 보정 등을 통하여 개선할 여지는 충분한 것으로 보인다.



그림 2. 표면영상유속계에 의한 유속 측정

4. 요약 및 결론

두 대의 비디오 카메라에 대해 공선 조건식을 적용하고, 직접 선형 변환법을 이용하여 내부 표정과 외부 표정을 수행하여 변환의 매개 변수들을 추정하였다. 추정된 변수들을 공간 전방 교회법을 이용하여 하천의 고정된 기준점들의 좌표를 측정하였다. 측정된 좌표점들을 이용하여 기울어진 영상을 연직으로 사영된 평면으로 변환하였으며, 이 과정을 통하여 번거로운 하천의 평면 측량 과정을 생략할 수 있게 되었다. 개발된 루틴을 실제 하천에 적용하여 본 결과, 결과는 아직은 만족할 만한 정도는 아니나, 보다 정밀한 카메라의 보정 등을 통하여 보다 나은 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 노영신 (2005) 영상해석 기술을 이용한 하천 유량 측정 기법 개발, 명지대학교 박사학위논문.
 유복모, 토니 쉥크 (2003) 현대 디지털 사진 측량학, 피어슨 에듀케이션 코리아.
 Fujita, I. Aya, S., and Deguchi, T. (1997) "Surface velocimetry measurement of river flow using video images of an oblique angle." *Proc. of XXVII IAHR Conference, Thema B*, Vol.1, San Francisco, CA., pp.227-232.
 Trucco, E. and Verri, A. (1998) *Introductory techniques for 3D computer vision*, Prentice Hall.