

카메라를 이용한 3차원 공간상의 이동 목표물의 거리정보기반 모션추정

Motion Estimation of a Moving Object in Three-Dimensional Space using a Camera

좌 동 경*
(Dongkyoung Chwa)

Abstract - Range-based motion estimation of a moving object by using a camera is proposed. Whereas the existing results constrain the motion of an object for the motion estimation of an object, the constraints on the motion is relieved in the proposed method in that a more generally moving object motion can be handled. To this end, a nonlinear observer is designed based on the relative dynamics between the object and camera so that the object velocity and the unknown camera velocity can be estimated. Stability analysis and simulation results for the moving object are provided to show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Motion estimation, Object, Single camera

1. 서 론

카메라를 이용한 비전기반 연구 결과들 중에서 두 대의 카메라를 이용하는 스테레오 비전이 가장 활발히 쓰여 왔다[1]-[2]. 이는 두 카메라 사이의 거리정보를 통해 카메라와 목표물 사이의 거리정보를 획득할 수 있기 때문이다. 한편, 거리 추정문제와는 별도로 3차원 공간상에서 움직이는 목표물의 모션 추정문제 역시 비전 기반 제어분야에서 무척 많이 연구되고 있다[3]. 이에 기반하여 다양한 비전기반시스템에도 적용가능하다는 점에서[4]-[7], 단일 카메라에 기반한 연구가 계속해서 활발해지고 있다. 하지만 목표물의 모션 추정에 관한 기존의 연구결과들[8]-[9]은 카메라 및 목표물에 대한 제한조건이 심하기 때문에 목표물 및 카메라가 보다 일반적인 모션을 가지는 경우에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 동역학에 기반한 비선형 추정기법을 통해 다양한 카메라 및 목표물의 모션에 대해서 목표물 모션 추정 결과를 제시하고, 이의 타당성은 안정성 증명 및 모의실험을 통해 확인한다.

2. 카메라 동역학 모델링

카메라를 통해 목표물을 볼 때 나타나는 특징점을 관측하게 되면 카메라 및 목표물의 상대적인 움직임을 알 수 있으므로, 이의 관계를 나타내는 동역학을 모델링할 필요가 있다. 이 동역학에 기반하여 다양하게 개발되어 온 추정기법들을 적용할 수 있게 된다. 우선 그림 1은 카메라와 목표물 사이의 관계를 나타낸다.

그림 1에서 F^* 는 초기시간에서의 카메라 위치를 기준으로 한 직교 좌표계이고, F_C 는 초기시간 이후 F^* 로부터 회전행렬과 평행 이동에 의해 변화된 직교 좌표계라고 할 때, $\bar{m}(t)$ 및 이의 정규화된 $m(t)$ 는 각각 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$\bar{m}(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T \quad (1)$$

$$m(t) = \left[\frac{x_1(t)}{x_3(t)}, \frac{x_2(t)}{x_3(t)}, 1 \right]^T \quad (2)$$

추가로 $y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t)]^T$ 를

$$y(t) = \left[\frac{x_1(t)}{x_3(t)}, \frac{x_2(t)}{x_3(t)}, \frac{1}{x_3(t)} \right]^T \quad (3)$$

와 같이 도입하면 $m(t)$ 와 픽셀과의 관계는

$$p = A_C m \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 픽셀좌표 $p = [u, v, 1]^T$ 와 카메라 고유행렬 A_C 는 알 수 있는 값이므로, 이를 통해 식 (4)에서 $m(t)$ 를 얻을 수 있다.

특징점 q 의 모션은 F_C 좌표계상에서

$$\bar{m}(t) = \bar{x}_j + \bar{R}x_{O_q} \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 x_{O_q} 는 특징점 q 에 대하여 F^* 좌표계의 원점으로부터의 벡터이다. 식 (5)로부터 동역학식을 얻으면 다음과 같다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea
E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr

Received : November 9, 2016; Accepted : November 14, 2016

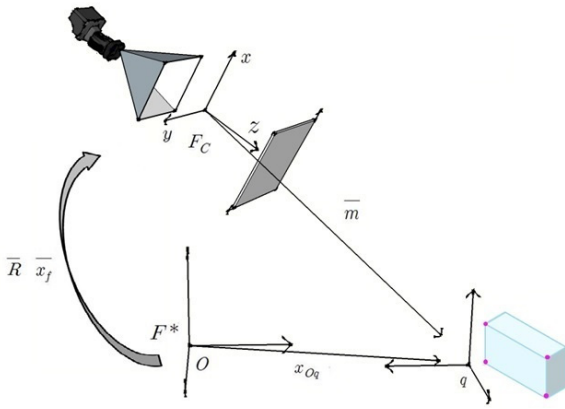


그림 1 카메라 및 목표물의 상대적인 관계
Fig. 1 Relation between a camera and an object.

$$\dot{\bar{m}}(t) = [w]_X \bar{m} + v_r. \quad (6)$$

여기서 $[w]_X$ 은 $w(t) = [w_1(t), w_2(t), w_3(t)]^T$ 로 구성된 카메라 각 속도의 교대행렬이고, $v_r(t)$ 는 특징점 q와 카메라 속도의 상대적인 선속도로서

$$v_r = v_c - \bar{R}v_p \quad (7)$$

와 같이 표현된다. 여기서 $v_c = [v_{cx}, v_{cy}, v_{cz}]^T$ 는 관성프레임에서 카메라의 속도이며, $\bar{R}v_p := v_p = [v_{px}, v_{py}, v_{pz}]^T$ 는 특징점 q의 속도, $\bar{v}_p = [v_{px}, v_{py}, v_{pz}]^T$ 는 좌표계 F^* 에서 특징점 q의 속도이다.

식 (3)과 식 (6)을 이용하면

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = (v_{cx} - y_1 v_{cz})y_3 - y_1 y_2 \omega_1 + (1 + y_1^2)\omega_2 - y_2 \omega_3 \\ \quad - (v_{px} - y_1 v_{pz})y_3 \\ \dot{y}_2 = (v_{cy} - y_2 v_{cz})y_3 - (1 + y_2^2)\omega_1 + y_1 y_2 \omega_2 + y_1 \omega_3 \\ \quad - (v_{py} - y_2 v_{pz})y_3 \\ \dot{y}_3 = -y_3^2 v_{cz} - y_2 y_3 \omega_1 + y_1 y_3 \omega_2 + y_3^2 v_{pz} \end{cases} \quad (8)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 알 수 있는 벡터 $y = [y_1, y_2, y_3]^T$ 를 도입할 수 있게 되므로, 아래의 동역학 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{y} = \Omega_1 v_c + \Omega_2 + \Omega_3 v_p \quad (9)$$

여기서

$$\Omega_1 = \begin{pmatrix} -y_3 & 0 & y_1 y_3 \\ 0 & -y_3 & y_2 y_3 \\ 0 & 0 & y_3^2 \end{pmatrix}$$

$$\Omega_2 = \begin{pmatrix} -y_1 y_2 & 1 + y_1^2 & -y_2 \\ -(1 + y_2^2) & y_1 y_2 & y_1 \\ -y_2 y_3 & y_1 y_3 & 0 \end{pmatrix} \omega$$

$$\Omega_3 = \begin{pmatrix} y_3 & 0 & -y_1 y_3 \\ 0 & y_3 & -y_2 y_3 \\ 0 & 0 & -y_3^2 \end{pmatrix}$$

이다. 이 동역학 모델에 기반하여 다음 절에서는 모션 추정 알고리즘을 제시한다.

3. 목표물의 모션 추정기 설계

본 절에서는 카메라 속도를 모두 알고 있는 경우에 대해 목표물의 모션을 추정한 결과를 제시한다. 추정기 설계의 편의상 동역학 모델 (9)를 아래와 같이 정리한다.

$$\dot{y} = \Omega_D + g_D. \quad (10)$$

여기서 Ω_D 는 아는 값으로서 $\Omega_D = \Omega_1 v_c + \Omega_2$ 이고, g_D 는 모르는 값으로서

$$g_D = \Omega_3 d_s v_p \quad (11)$$

와 같이 정의되며, 목표물 속도의 특성상 $\|g_D(\cdot)\| \leq \zeta_{D1}$, $\|\dot{g}_D(\cdot)\| \leq \zeta_{D2}$, $\|\ddot{g}_D(\cdot)\| \leq \zeta_{D3}$ 와 같이 유한한 값을 지닌다. \hat{g}_D 값은 g_D 의 추정치로서 나중에 제시될 비선형 추정기 (14)와 같이 얻어질 수 있고, 그 값은 g_D 로 점근적으로 수렴함이 아래의 정리 1에 정리되어 있다. 이를 통해 v_p 의 추정치는

$$\hat{v}_p = \Omega_3^{-1} \hat{g}_D \quad (12)$$

와 같이 얻어진다. 이를 위해서는 동역학 모델 (10)에 기반하여 g_D 의 추정기를 설계하는 것이 필요하다. $e_D := y - \hat{y}$ 라고 정의하고 $r_D = \dot{e}_D + \alpha_D e_D$ 를 추가로 상수대각행렬 α_D 에 대해 정의하면, (10)에 대한 비선형 추정기는 아래와 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\hat{y}} = \Omega_D + \hat{g}_D. \quad (13)$$

여기서 \hat{g}_D 는

$$\dot{\hat{g}}_D = -(k_D + \alpha_D)\hat{g}_D + \gamma_D \text{sgn}(e_D) + \alpha_D k_D e_D \quad (14)$$

로 부터 얻어지고, k_D, α_D 는 양한정 상수 대각행렬이다. 이때 오차 동역학은

$$\dot{e}_D = g_D - \hat{g}_D \quad (15)$$

$$\dot{r}_D = \eta_D - k_D r_D - \gamma_D \text{sgn}(e_D) \quad (16)$$

이며, 여기서 $\eta_D(t) := \dot{g}_D + (k_D + \alpha_D)g_D$ 이다. g_D, \dot{g}_D 모두 유한하

고, $\|\eta_D(\cdot)\| \leq \zeta_{D4}$, $\|\dot{\eta}_D(\cdot)\| \leq \zeta_{D5}$ 역시 양의 상수 ζ_{D4} , ζ_{D5} 에 대해 성립하므로 (13), (14)의 비선형 추정기를 3차원 공간상에 움직이는 목표물에 대해 적용하면 아래의 정리와 같은 결과를 얻을 수 있다.

정리 1: 동역학 모델(10)에 대해 대각행렬 γ_D 가

$$\gamma_{Di} \geq \zeta_{D4} + \frac{1}{\alpha_{Di}} \zeta_{D5} \quad (17)$$

을 $i=1, 2, 3$ 에 대해 만족하면 (13), (14)의 비선형 추정기에 의해 \hat{g}_D 가 점근적으로 g_D 에 수렴하게 될 뿐 아니라, v_p 역시 (12)와 같이 추정될 수 있다.

증명: 비선형 추정기의 성능은 카메라 추정 문제를 다룬 [10]에 제시되어 있는 바와 같이 \hat{g}_D 가 점근적으로 g_D 에 수렴하게 하므로, 앞에서 기술된 과정에 의해 추정치 \hat{g}_D 를 이용하면 목표물의 속도 추정치 v_p 는 (12)와 같이 얻어짐을 쉽게 알 수 있다.

(증명끝)

4. 모의실험

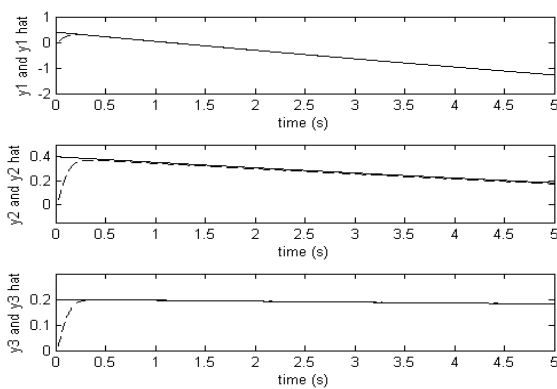
본 절에서는 논문에서 제안한 알고리즘을 모의실험을 통해 검증한다. 비선형 추정기 (14)의 설계변수는 $k_D = 20I_{3 \times 3}$, $\alpha_D = 20I_{3 \times 3}$, $\gamma_D = 10^{-2}I_{3 \times 3}$ 이고, 여기서 $I_{3 \times 3}$ 는 3×3 단위행렬이다. 추정치의 초기치는 $\hat{g}_D(0) = \hat{y}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$, 카메라에 대한 초기 목표물의 위치는 $y(0) = [0.4, 0.4, 0.2]^T(m)$ 로 설정하였다. 식

(4)의 카메라 고유행렬은 $A_c = \begin{bmatrix} 720 & 0 & 320 \\ 0 & 720 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이다. 편의상 카메라

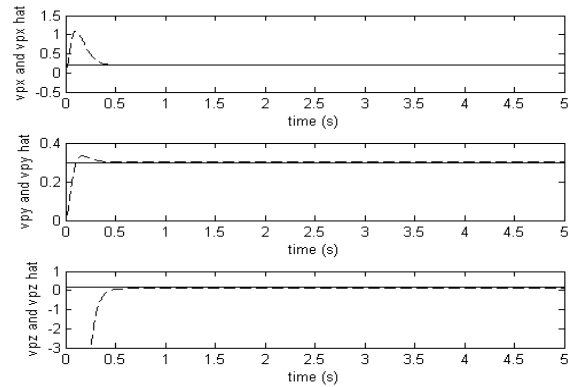
각속도는 0으로 두었고, 카메라 및 목표물의 속도는 각각 $[2, 0.5, 0]^T(m/sec)$ 및 $[0.2, 0.3, 0.1]^T(m/sec)$ 과 같이 설정하였다. 강인성 확인을 위해 목표물 정보에 100dB의 SNR (signal-to-noise ratio)을 지닌 백색 가우시안 노이즈를 추가하였다. 그림 2에서는 목표물 움직임에 대한 모션 추정 결과를 보여준다. 우선 카메라의 속도정보를 모두 알고 있는 경우에는 그림 2(a)에서와 같이 y 의 추정치가 y 로 점근적으로 수렴함을 확인할 수 있고, 식 (14)의 g_D 의 추정치를 통해서 \hat{v}_p 를 추정할 수 있음을 그림 2(b)를 통해 알 수 있다.

5. 결 론

비선형 추정기에 기반하여 목표물의 모션 추정 기법을 카메라 및 목표물 모두 움직이는 상황에서 제시하였다. 기존의 결과에서는 모션뿐만 아니라 정보면에서도 제한적인 단점을 지니나, 제시된 방법은 동역학 모델에 기반한 추정 기법을 통해 일반적인 움직임을 지니는 경우에도 만족스러운 성능을 지님을 확인할 수 있었다. 특히 시변 특성이 있더라도 목표물의 속도를 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 모의실험을 통해 카메라의 일부 모르는 속도 정보까지도 추정할 수 있음을 볼 수 있었다. 목표물 한 대에 관한 결과이므로 카메라 속도 정보를 전혀 모르는 경우까지는 진행하기는 어려움이 있으나 여러 카메라 및 여러 목표물에 관한 연구 결과로 확장한다면 보다 다양하고 일반적인 경우에 대해서도 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 이는 추후 연구 내용으로서 계속 진행해 나갈 것이다.



(a) 카메라 속도 정보를 모두 알 경우 3차원 공간상의 목표물에 대한 \hat{y} 의 추정
(a) Estimation of \hat{y} for a completely known general camera.



(b) 카메라 속도 정보를 모두 알 경우 3차원 공간상의 목표물에 대한 \hat{v}_p 의 추정
(b) Estimation of \hat{v}_p for a completely known general camera.

그림 2 목표물의 모션 추정을 위한 비선형 추정기 성능 (실선: 실제값; 점선: 추정치).

Fig. 2 The performance of the nonlinear observer for an object in the single camera images (solid: actual; dotted: estimate).

감사의 글

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A2A1A11053153).

References

- [1] Y. Yakimovsky and R. Cunningham, "A System for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 7, no. 2, pp. 195-210, Apr. 1978.
- [2] S. T. Barnard and M. A. Fischler, "Computational stereo," *ACM Computing Surveys*, vol. 14, no. 4, pp. 553-572, Dec. 1982.
- [3] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, and S. Sastry, *An Invitation to 3-D Vision*, Springer, 2004.
- [4] M. Aranda, G. López-Nicolás, Carlos Sagüés, and Youcef Mezouar, "Formation Control of Mobile Robots Using Multiple Aerial Cameras," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 4, pp. 1064-1071, Aug. 2015.
- [5] N. Gans and S. A. Hutchinson, "Stable Visual Servoing Through Hybrid Switched-System Control," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 3, pp. 530-540, Jun. 2007.
- [6] P. Cigliano, V. Lippiello, F. Ruggiero, and B. Siciliano, "Robotic Ball Catching with an Eye-in-Hand Single-Camera System," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 1657-1671, Sep. 2015.
- [7] Z. Wang, D.-J. Kim, and A. Behal, "Design of Stable Visual Servoing Under Sensor and Actuator Constraints via a Lyapunov-Based Approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 20, No. 6, pp. 1575-1582, Nov. 2012.
- [8] L. Ma, C. Cao, N. Hovakimyan, C. Woolsey, and W. E. Dixon, "Fast Estimation for Range Identification in the Presence of Unknown Motion Parameters," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 75, no. 2, pp. 165-189, Feb. 2010.
- [9] G. Hu, D. Aiken, S. Gupta, and W. E. Dixon, "Lyapunov-Based Range Identification for Paracatadioptric System," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 7, pp. 1775-1781, Aug. 2008.
- [10] D. Chwa, A. Dani, and W. Dixon, "Range and Motion Estimation of a Monocular Camera using Static and Moving Objects," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1174-1518, Jul. 2016.

저 자 소 개



좌 동 경 (Dongkyoung Chwa)

1971년 12월 23일생. 1995년 서울대 제어계측
측공학과 졸업. 2001년 동 대학원 제어계측
공학과 졸업(공학박). 2005년~현재 아주대 전
자공학과 교수.

Tel : 031-219-1815

Fax : 031-212-9531

E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr