

영상을 이용한 표적 추적 기법

권정훈, 송은한, 하인중
서울대학교 전기 컴퓨터 공학부

A Vision-Based Target Tracking Method

Jung-Hun Kwon, Eun-Han Song, In-Joong Ha
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - Image plane상에서의 목표의 크기, 시선각 (Line-of-Sight angle) 및 관측자의 상태 정보 등을 이용하여 목표의 상태를 추정한다. 표적 모델을 Linear Time Varying(LTV) system처럼 다룰 수 있음을 밝히고, 이를 이용하여 가관측성(observability)이 성립하는 조건을 구하고 Kalman filter를 이용하여 비선형 추정기를 설계한다. 그리고 등가속도 표적 추정, 미사일의 정지 표적 공격 등의 모의실험에 적용해 본다.

1. 서 론

표적의 상태를 추정하는 것은 로봇, 미사일 등의 여러 제어 분야에 있어서 중요한 문제이다. 표적의 상태 추정에 있어서 거리 측정이 중요한데, 수동형 센서를 사용한 경우 거리 측정을 하기 힘들어 표적의 상태를 정확하게 추정하기 어렵다.

점 표적에 대한 경우 표적에 대한 시선각으로부터 표적의 상태를 추정하는 bearings-only tracking 문제가 오래 전 부터 연구되어 왔다. Bearing-only tracking에서는 관측자의 움직임에 따라 가관측성이 성립하지 않을 수 있는데, 특히 시선방향으로 이동할 때 가관측성이 성립하지 않아서 제어 문제에 적용하기 힘들다[1,2]. 영상 센서를 사용한 경우 영상에 나타나는 표적의 특징을 이용하여 거리를 추정하는 다양한 방법이 소개되었다[3,4,5]. 그러나 실시간 구현하기에 계산량이 많거나, 정지된 물체에만 적용가능하다는 단점이 있다. 그런데, 최근에 snaking 기법으로 image plane상의 표적의 크기를 측정하여 표적의 상태를 추정하는 기법이 소개되었다[6,7]. 이 방법은 bearings-only tracking과 유사하게 관측자의 움직임에 따라 가관측성이 성립하지 않을 수도 있지만, 표적의 정확한 형태를 모르더라도 적용 가능하고, 움직이는 물체의 상태를 추정할 수 있다. 더구나, 시선방향으로 이동해도 변화하는 측정치가 있어 bearing-only tracking보다 가관측성이 완화되어 있을 것이라고 예측할 수 있다.

본 논문에서는 [6,7]의 연구 결과를 바탕으로 하여 영상에 비친 표적의 크기를 이용한 표적 추적기법을 제안한다. 등가속도 모델에 대해서 시스템의 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 가관측성이 성립하기 위한 조건을 구하고 추정기를 설계한다. 그 다음 모의실험을 통해서 그 조건과 추정기의 성능을 검증해 본다.

2. 본 론

2.1 등가속도 표적 모델 분석

대표적인 표적 모델인 등가속도 모델에 대해서 상태 방정식을 유도하고, 그 특성을 분석해본다. 표적 모델은 그림 1과 같다. 표적이 등가속도 운동을 하고, 표적의 형태를 구하고 가정할 경우 표적 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x} = Ax + Bu. \tag{1}$$

여기서

$$A \triangleq \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 1} \end{bmatrix}, \quad B \triangleq \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ -I_3 \\ 0_{4 \times 3} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

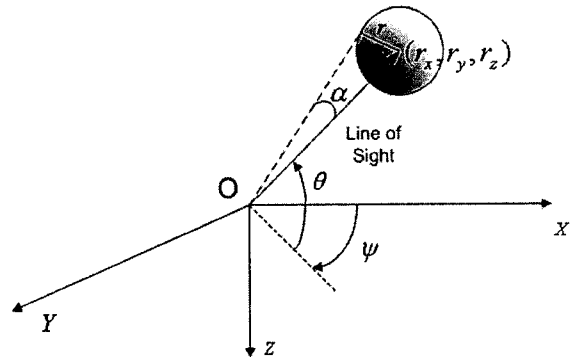
$$x \triangleq [r_x \ r_y \ r_z \ \dot{r}_x \ \dot{r}_y \ \dot{r}_z \ A_{\alpha} \ A_{\psi} \ A_{\theta}]^T, \tag{3}$$

$$u \triangleq [A_{\alpha} \ A_{\psi} \ A_{\theta}]^T. \tag{4}$$

(3)에서 r_x, r_y, r_z 는 표적과 관측자 사이의 상태 위치 벡터를 나타낸다. 또한, $A_{\alpha}, A_{\psi}, A_{\theta}$ 는 관측자의 가속도이며, $A_{\dot{\alpha}}, A_{\dot{\psi}}, A_{\dot{\theta}}$ 는 표적의 가속도이다. 그리고 r 은 표적의 반지름이다. Measurement는 다음과 같다.

$$y \triangleq \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \alpha \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \tan^{-1}(r_y/r_x) \\ \tan^{-1}(-r_z/\sqrt{r_x^2+r_y^2}) \\ \sin^{-1}(r/\sqrt{r_x^2+r_y^2+r_z^2}) \end{bmatrix}. \tag{5}$$

여기서 ψ, θ 는 시선각(Line-of-Sight angle)을 Euler angle로 나타낸 것으로 각각 yaw, pitch angle에 해당한다. α 는 그림 1과 같이 영상에 비친 표적의 크기를 나타내는 각도이다.



〈그림 1〉 표적 모델

이전의 연구결과[2,8]에서 시선각을 이용하여 measurement를 Linear Time-Varying(LTV) system과 유사한 형태로 나타낼 수 있음이 알려져 있다. 특히 [8]에서는 시선각에 다음과 같은 특성이 있음을 밝혔다.

$$\begin{bmatrix} \psi - \psi^* \\ \theta - \theta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x^*, \psi) \\ h_2(x^*, \psi, \theta) \end{bmatrix} (x - x^*). \tag{6}$$

여기서 x^* 는 $\dot{x} = Ax^* + Bu^*$ 의 해로 임의로 설정한 값이다. 그리고 $\psi^*, \theta^*, \alpha^*$ 은 x^* 에 의하여 결정되는 측정치이다. 시선각을 측정할 수 있는 경우 α 역시 (6)과 동일한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\alpha - \alpha^* = h_3(x^*, y)(x - x^*). \tag{7}$$

여기서

$$h_3(x^*, y) \triangleq \frac{1}{a_1 - a_2} [-\sin\beta \quad -\cos\beta \quad 1] \begin{bmatrix} H_d(x^*, y) & & \\ & 1 & 0_{1 \times 3} \\ & & 1 \end{bmatrix} - h_2(x^*, \psi, \theta), \tag{8}$$

$$\beta = \alpha + \theta, \quad \beta^* = \alpha^* + \theta^*, \tag{9}$$

$$H_d(x^*, y) \triangleq [\cos\psi \quad \sin\psi \quad 0_{1 \times 8}] + (-\sin(\frac{\psi+\psi^*}{2})\text{sinc}(\frac{\psi-\psi^*}{2})r_x^* \tag{10}$$

$$+ \text{sinc}(\frac{\psi-\psi^*}{2})\cos(\frac{\psi+\psi^*}{2})r_y^*] h_1(x^*, \psi), \tag{11}$$

$$a_1 \triangleq R^* \cos\alpha^* \text{sinc}(\beta - \beta^*), \tag{12}$$

$$a_2 \triangleq r^* \text{sinc}(\frac{\beta - \beta^*}{2}) \sin(\frac{\beta - \beta^*}{2}), \tag{13}$$

$$R^* \triangleq \sqrt{r_x^{*2} + r_y^{*2} + r_z^{*2}}. \tag{14}$$

(6),(7)로부터 (5)를 다음과 같은 LTV system의 출력과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = C(t)x + D(t)\bar{u}. \tag{15}$$

여기서

$$C(t) \triangleq H(x^*, y) \triangleq \begin{bmatrix} h_1(x^*, \psi) \\ h_2(x^*, \psi, \theta) \\ h_3(x^*, y) \end{bmatrix}, \tag{16}$$

$$D(t) \triangleq [I_3 \quad -C(t)]^T, \tag{17}$$

$$\bar{u} \triangleq [\psi^* \ \theta^* \ \alpha^* \ x^{*T}]^T. \tag{18}$$

식(7)로부터 α 가 수학적으로 시선각 ψ, θ 와 유사한 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그래서 bearings-only tracking에서 연구된 다양한 기법을 적용 가능한 것으로 예상된다. 또한 LTV system과 유사한 형태이므로 Kalman filter를 이용하여 비선형 추정기를 간단하게 설계할 수 있다[8,9].

2.2 가관측성 분석

2.1장의 결과에 의해서 LTV system의 observability Gramian matrix[10]를 이용하여 가관측성을 판정할 수 있음을 알 수 있다. 식(1),(14)로부터 observability Gramian matrix는 다음과 같다.

$$W_o(t_0, t_1) \triangleq \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t, t_0)^T C(t)^T C(t) \Phi(t, t_0) dt. \quad (18)$$

여기서

$$\Phi(t, t_0) \triangleq \begin{bmatrix} I_3 & \Delta t I_3 & \frac{1}{2} \Delta t^2 I_3 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 & \Delta t I_3 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\Delta t = t - t_0. \quad (20)$$

식(18)의 observability Gramian matrix는 다음 식이 성립할 때 nonsingular이다.

$$C(t) \Phi(t, t_0) a \neq 0. \quad (21)$$

여기서 $a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9 \ a_{10}]^T$ 는 영벡터가 아닌 10차원 벡터이다. 식(18)에 식(5)를 대입하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{r_x}{r} \neq \frac{a_1 + a_4 \Delta t + a_7 \frac{1}{2} \Delta t^2}{a_{10}}, \quad (22)$$

$$\frac{r_y}{r} \neq \frac{a_2 + a_5 \Delta t + a_8 \frac{1}{2} \Delta t^2}{a_{10}}, \quad (23)$$

$$\frac{r_z}{r} \neq \frac{a_3 + a_6 \Delta t + a_9 \frac{1}{2} \Delta t^2}{a_{10}}. \quad (24)$$

표적의 위치는 Δt 의 2차 다항식이므로, 식(22)~(24)으로부터 표적이 등가속도 운동을 하는 경우 관측자의 jerk가 0이 아니면 가관측성이 성립한다. 이로부터, 표적이 등속도 운동을 하는 경우 관측자는 가속도 운동을 해야 하고 표적이 정지되어 있는 경우 관측자가 움직이면 가관측성이 성립함을 예측할 수 있다. 이 결과를 bearings-only tracking의 가관측성이 성립하기 위한 조건[1]과 비교해 볼 때, 관측하는 수치가 늘어날 만큼 가관측성이 성립하는 조건이 완화된 것을 확인할 수 있다.

2.3 모의실험

우선 [8]에서처럼 (1), (14)식으로부터 Kalman filter를 이용한 비선형 추정기를 설계하여, 가관측성 조건을 모의실험을 통해서 검증해 본다. 표적은 반지름이 1m인 구로 가정하였으며, 표적과 관측자의 초기 조건은 표1과 같이 (22)~(24)의 조건이 성립하도록 설정하였다.

	표적	관측자
위치(m)	(40,40,40)	(0,0,0)
속도(m/s)	(50,50,50)	(0,5,3)
가속도(m/s ²)	(10,10,10)	(1,6,4)
Jerk(m/s ³)	(0,0,0)	(1,1,1)

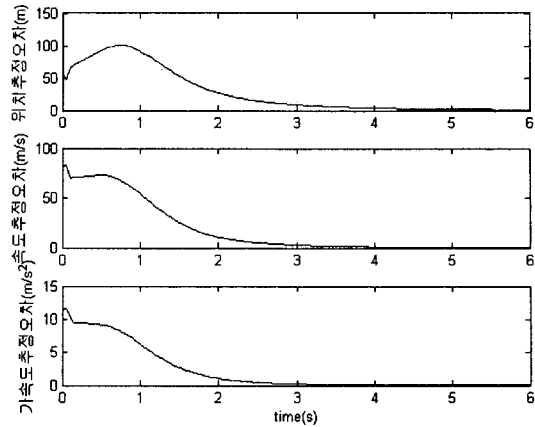
〈표 1〉 표적과 관측자의 초기조건(등가속도 표적 추정)

그림 2는 추정된 거리와 실제 거리의 오차를 도시한 것이다. 그림 2의 결과에서 식(22)~(24)의 조건이 성립하는 경우 상태변수를 정확하게 추정하는 것을 볼 수 있다. 특히 표1의 초기 조건에 의한 표적과 관측자의 운동은 bearings-only tracking의 가관측성이 성립하지 않는 것이므로 제한한 기법이 더 완화된 조건에서 가관측성이 성립하는 것을 확인할 수 있다.

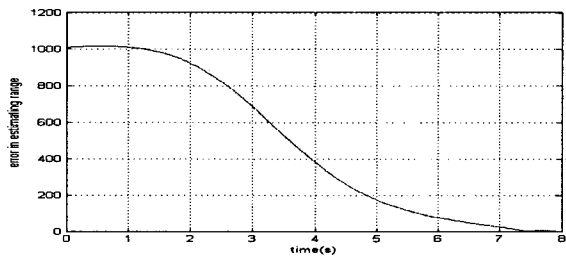
마지막으로 제한한 표적 추적 기법을 미사일에 적용해 보았다. 등속, 혹은 가속도 운동을 하는 표적의 경우 가관측성이 성립하지 않을 수 있어 적용이 힘들지만, 정지 표적의 경우 항상 가관측성이 성립하므로 제한한 표적 추적 기법을 사용할 수 있다. 미사일의 초기 위치는 원점이며, 표적의 위치는 [2000m, 100m, -200m]이다. 미사일의 초기 속도는 [255m/s, 25.5m/s, -25.5m/s]로 하였다. 표적 형태에 오차가 생길 경우의 영향을 알기 위해서 표적 형태로 구가 아니라 가로 10m, 세로 10m, 높이 20m인 직육면체를 선택하였다. 모의 실험에서 미사일 자동조종장치의 동역학은 무시하였으며, 유도 법칙은 비례항법 유도법칙(Proportional Navigation Guidance law)을 사용하였다. 그림 3은 추정된 거리와 실제 거리의 차이를 도시한 것으로 표적의 위치를 정확하게 추정하는 것을 확인할 수 있다. Miss distance는 0.001m로 실제 수치 대신 추정치를 사용하고자 표적에 충분히 접근할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 image plane에 투사된 표적의 크기를 이용하여 표적의 상태를 추정하는 방법을 제안하였다. 정지 표적의 경우 관측자가 움직이면 가관측성이 성립하므로, 제안한 방식을 쉽게 적용할 수 있으나, 등속도 혹은 등가속도 모델과 같이 표적이 움직이는 경우 관측자의 움직임에 조건이 더



〈그림 2〉 등가속도 표적의 추정치 오차



〈그림 3〉 정지 표적 공격 시의 추정치 오차

필요하다. 따라서 움직이는 표적에 대한 제어 문제에 적용할 경우에는 [6,7]처럼 추정치를 정확하게 하기위하여 제어목적과는 다르게 움직일 필요가 있어서 제어성능이 제한될 것으로 생각된다. 또한 제한한 기법에서는 표적을 구형으로 가정하고 있어, 실제 표적의 형태와 차이가 생기는 경우 그 영향을 줄이는 법에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 생각된다.

Acknowledgment

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (계약번호 UD070007AD)

참 고 문 헌

- [1] Fogel, E., and Gavish, M., "N th-order Dynamics Target Dynamics Target Observability from Angle Measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.24, No.4, pp.305-308, May. 1988.
- [2] Nardon, S.C., and Aidala, V.J. "Observability Criteria for Bearings-Only Target Motion Analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.17, No.2, pp.162-166, 1981.
- [3] C.M. Harding and R.G. Lane. "Passive Navigation from Image Sequences by use of a volumetric Approach," *Journal of Optical Society of America A*, Vol.19, No.2, pp. 295-305, Feb.2002
- [4] B. Sinopoli, M. Micheli, G. Donato, and T. J. Koo, "Vision Based Navigation for an Unmanned Aerial Vehicle," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.1757-1764, Korea, May.2001.
- [5] S. Avidan and A.Shashua, "Trajectory Triangulation: 3D reconstruction of moving points from a Monocular Image Sequence," *IEEE Transactions on Pattern Analysis*, Vol.22, No.4, Apr.2000.
- [6] A. Bester, P. Vela, and A. Tannenbaum, "Automatic Tracking of Flying Vehicles Using Geodesic Snakes and Kalman Filtering," *43rd IEEE conference on Decision and Control*, pp.1649-1654, Dec.2004.
- [7] C. Cao and N. Hovakimyan, "Vision-Based Aerial Tracking using Intelligent Excitation," *2005 American Control Conference*, pp.5091-5096, 2005.
- [8] T.L. Song and J.L. Speyer, "A Stochastic Analysis of a Modified Gain Extended Kalman Filter with Application to Estimation with Bearings-Only Measurements," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 30, No. 10, pp. 940-949, Oct.1985
- [9] Y. Bar-Shalom, X.R. Li, and T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*, Wiley, 2001.
- [10] C.T. Chen, *Linear System Theory and Design*, Oxford University Press, 1999.