

論文

비전센서와 INS 기반의 항법 시스템 구현 시 랜드마크 사용에 따른 가관측성 분석

원대희*, 천세범**, 성상경*, 조진수***, 이영재****

Observability Analysis of a Vision-INS Integrated Navigation System Using Landmark

Dae Hee Won*, Sebum Chun**, Sangkyung Sung*, Jin-soo Cho*** and Young Jae Lee****

ABSTRACT

A GNSS/INS integration system can not provide navigation solutions if there are no available satellites. To overcome this problem, a vision sensor is integrated with this system. Since generally a vision aided integration system uses only feature point to compute navigation solutions, it has a problem in observability. In this case, additional landmarks, which is priory known points, can improve the observability. In this paper, the observability is evaluated using TOM/SOM matrix and Eigenvalues. There are always the observability problems in the feature-point-only case, but the landmark-use case is fully observable after the 2nd update time. Consequently the landmarks ensure full observability, so the system performance can be improved.

초 록

위성항법시스템과 INS가 결합된 항법 시스템은 가용 위성이 없는 경우 항법 정보를 제공하지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 비전센서를 결합한 항법 시스템이 대안으로 사용되지만, 일반적으로 특징점만 사용하여 항법을 수행하므로 가관측성이 부족한 문제점이 존재한다. 이때 사전에 위치가 알려져 있는 랜드마크를 추가적으로 사용하면 특징점만 이용하는 경우에 비해 가관측성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 추가적인 랜드마크를 사용하는 경우에 대하여, TOM/SOM 분석과 고유치 분석을 통해 가관측성 향상 정도를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 특징점만 사용하는 경우 항상 가관측성이 부족하나 랜드마크를 사용하는 경우 2번째 갱신과정 이후에는 완전 가관측한 특성을 보였다. 따라서 랜드마크를 사용하면 가관측성이 향상되므로 전체 시스템 성능을 향상시킬 수 있다.

Key Words : Vision(비전), SLAM, Navigation(항법), Observability(가관측성), Landmark(랜드마크)

†2009년 12월 8일 접수 ~ 2010년 2월 22일 심사완료

* 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 대학원

** 정회원, (주) 마이크로인피니티

*** 정회원, 한양대학교 기계공학부

**** 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

교신저자, E-mail : younglee@konkuk.ac.kr

서울시 광진구 화양동 1번지

I. 서 론

로봇 분야의 항법 방법으로 시작된 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)은 주변 환경에 대한 사전 정보 없이 항체의 위치를 알아내고, 지도를 구성하는 이점으로 인해 항공

분야의 항법으로 확대되어 적용되기 시작하였다 [1, 2, 3]. 항공 분야의 보편적인 항법장치인 GNSS (Global Navigation Satellites System)는 실내, 지하, 터널 등의 환경에서 사용이 제한받는데 비해[4], SLAM은 이러한 환경적 제약 없이 사용할 수 있는 장점이 있다[2, 3]. 비전센서 기반의 SLAM은 주변 환경을 촬영한 이미지 정보 내에서 특징점 (Feature Point)을 추출하고 추적하여 항법 오차를 추정해 낸다[5, 6]. 그러나 특징점 위치는 사전 정보 없이 항법 정보를 바탕으로 추정되며, 이때 항법 오차가 추정오차에 포함되게 된다. 이러한 상관관계로 인해 항법 오차는 드리프트 (Drift) 오차를 갖게 되어, 시간이 지날수록 부정확한 항법 정보를 제공하게 된다. 이러한 문제는 가관측성 분석 결과에서도 나타나며, 비전센서 기반의 INS/SLAM 시스템은 가관측성 분석 시 항상 랭크 (Rank)가 부족한 것으로 알려져 있다[7]. 가관측성 부족으로 인해 발산하는 항법 오차를 줄이는 방법으로 절대적인 위치를 알고 있는 랜드마크를 이용하는 방법이 있다. 본 논문은 특징점과 더불어 랜드마크를 사용하는 경우에 있어 랜드마크의 개수와 갱신 횟수에 따른 가관측성 변화를 분석하였다. 가관측성 분석은 TOM/SOM (Total/Stripped Observability Matrix) 분석 방법과 고유치 (Eigenvalues)를 분석하는 방법으로 진행하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 통합 시스템에 사용되는 SLAM에 대해 소개하고, 시스템 모델과 관측 모델에 대해서 설명하였다. 3장에서는 가관측성 분석에 사용된 방법에 대해 설명하고, 이를 토대로 4장에서 가관측성 분석 결과를 제시하였다.

II. 대상 시스템 분석

본 논문에서 구성한 비전센서와 INS 기반의 항법시스템은 SLAM과 저급 관성센서를 사용하는 INS 모델을 사용하였다.

2.1 SLAM

SLAM은 사전에 알려진 운영 지역에 대한 지도 없이 비전 센서, 초음파, 레이더, 레이저 등 다양한 수단을 활용하여 지형 정보를 구축하고, 구축된 지도 내에서 자신의 위치를 파악하는 방법이다. 영상정보 기반의 SLAM은 특징점을 추출하고 추적하여 항체의 움직임과 비교하여 항체의 상대적인 위치/자세를 알아내는 기법이다. 이 경우 영상 내의 특징점 움직임은 항체의 회전이

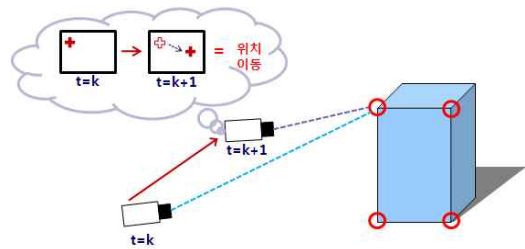


그림 1. SLAM 개념

나 이동에 의해 발생하므로 영상 분석을 통하여 항체의 항법 정보 (위치/속도/자세)를 얻어 낼 수 있다[2, 8].

2.2 시스템/관측 모델 구성

본 논문에서는 높은 주기로 항법 정보를 계산하는 INS와 상대적으로 낮은 주기로 영상정보를 제공하는 두 센서를 결합하기 위해 간접 방식을 이용한 시스템 통합을 수행하였다. 비전센서는 영상정보로 특징점에 대한 방위각 (Bearing)과 고도각 (Elevation) 정보를 제공하고, INS는 항법 정보를 제공한다. 필터는 항법 정보를 이용하여 예측한 방위각과 고도각 정보를 측정값과 비교하여 항법 오차를 추정한다. 추정된 항법 오차는 INS 오차를 보상하여 항법해의 발산을 감소하게 된다. 이때 특징점의 3차원 위치를 추정하는 초기화 알고리즘 [9]이 선행적으로 수행되나, 논문의 연구 범위를 벗어나므로 언급하지 않겠다.

시스템 모델은 항체의 동역학 모델과 특징점과 관련된 모델의 조합으로 구성된다. 항체와 관련된 상태벡터는 위치/속도/자세 오차이고, 특징점과 관련된 모델의 상태벡터는 특징점의 위치이다.

$$x = \begin{bmatrix} \text{Position error} \\ \text{Velocity error} \\ \text{Attitude error} \\ \text{Feature Point Position} \end{bmatrix} \quad (1)$$

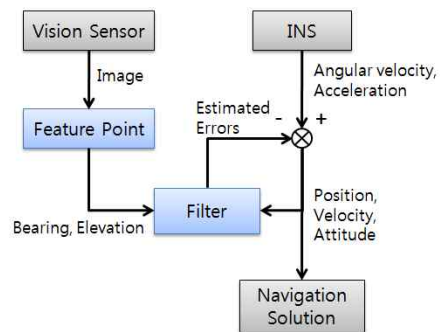


그림 2. 비전센서와 INS 결합 구조 [8]

항체의 동역학 모델은 선형화된 INS의 오차 모델을 이용하고, 특징점 위치는 고정된 점이라 가정하여 랜덤 상수로 모델링 하였다. 이때 IMU 는 저급 관성 센서로 가정하여 중력 모델 보정과 지구 자전은 무시하였다[8].

$$\dot{\mathbf{x}} = F\mathbf{x} + G\mathbf{w}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & & & & \\ & 0 & [\mathbf{f}_b \times] & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ C_b^n & 0 \\ 0 & -C_b^n \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_b \\ \mathbf{w}_b^b \end{bmatrix} \quad (2)$$

- $\mathbf{x} = [\delta \mathbf{x}_v^T \quad \delta \mathbf{x}_{v1}^T \quad \dots \quad \mathbf{x}_{\beta}^T]^T$
- $\delta \mathbf{x}_v = [\delta \mathbf{p}_v^T \quad \delta \mathbf{v}_v^T \quad \delta \Psi_v^T]^T$: Vehicle state error
- $\delta \mathbf{p}_v$: Vehicle position error
- $\delta \mathbf{v}_v^T$: Vehicle velocity error
- $\delta \Psi_v^T$: Vehicle platform tilting error
- \mathbf{x}_{β} : i^{th} Feature point position
- \mathbf{f}_b : Specific force in body axis
- \mathbf{w}_b^b : Angular velocity in body axis
- C_b^n : Rotational transformation matrix from body to navigation frame

그림 3은 항체와 특징점을 표현하기 위해 사용되는 좌표계를 나타낸다. 특징점의 위치는 항법 정보와 동일한 항법 좌표계로 계산되지만 비전센서에서 획득한 영상 정보는 센서 좌표계로 표현된다.

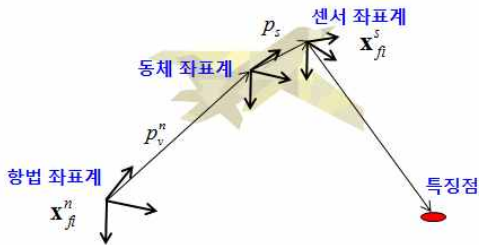


그림 3. 사용된 좌표계 [6]

그림에서 P_v^n 은 항법 좌표계에서 항체의 위치를 나타내는 벡터이고, P_s 는 바디 좌표계 상에서 비전센서의 위치를 나타내는 벡터이다. 좌표 변환을 통해 특징점의 위치를 영상 정보가 획득되는 센서 좌표계로 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{\beta}^s = C_b^s (C_n^b (\mathbf{x}_{\beta}^n - \mathbf{p}_s) - \mathbf{p}_s) \quad (3)$$

센서 좌표계로 표현된 특징점의 위치와 측정치와의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{bmatrix}, \mathbf{x}_{\beta}^s = [x \quad y \quad z], z = \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \end{bmatrix}$$

ψ : Feature point bearing
 θ : Feature point elevation

(4)

랜드마크는 해당 위치가 이미 정확히 알려진 위치이므로 영상 정보를 통한 위치 추정 과정 없이 사전 정보를 이용하여 정확한 위치 할당이 이루어진다. 관측 모델은 특징점만 사용하는 모델에서 확장된 모델을 사용하게 되나 특징점과 마찬가지로 랜드마크의 측정치도 방위각과 고도각 정보로 제공되므로 관측 모델은 특징점의 경우와 동일하다.

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_{FP}^1 \quad \mathbf{z}_{FP}^2 \quad \dots \quad \mathbf{z}_{LM}^1 \quad \mathbf{z}_{LM}^2 \quad \dots]^T$$

\mathbf{z}_{FP}^i : Feature Point
 \mathbf{z}_{LM}^j : Landmark

(5)

Ⅲ. 가관측성 분석 방법

가관측성 분석은 필터 설계 시 설정한 상태 변수의 추정 가능성을 확인하기 위해 필요한 과정이다. 일반적인 가관측성 분석 방법은 가관측 행렬을 구성하고, 행렬의 랭크를 확인하여 가관측 여부를 판별한다. 그러나 특정 시간에서는 가관측 하지 않은 시스템이라도 적절한 기동을 통해 가관측성을 확보할 수 있다[10]. 이러한 경우 특정 순간의 시스템 정보만으로 구성된 가관측 행렬을 이용하는 방법은 시스템의 기동에 의한 변화를 고려하지 않기 때문에 정확한 가관측성 판별이 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위해 TOM/SOM을 이용한 가관측성 판별 방법이 사용되며, 기동에 따른 시스템의 변화를 고려하여 전체 작동 시간에 대한 가관측성 판별을 가능하게 해주는 장점이 있다. TOM/SOM은 선형 시스템/관측 모델에 대해서만 구성 할 수 있으므로 대상 시스템을 PWCS (Piece-Wise Constant System)이라고 가정하고 TOM/SOM을 구성하였다[11, 12].

관측 모델은 선형화 과정으로 인해 시스템에 대한 정확도는 줄어드나 특성은 변하지 않으므로 가관측성 분석 수행에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 TOM/SOM을 구성하기 위해 구성한 관측 모델에 대한 선형화 식을 사용하였다. 연속 시간으로 표현된 PWCS은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= F_j \mathbf{x}(t) + B_j \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{z}_j(t) &= H_j \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 F_j, B_j, H_j 는 동일한 시간 구간 j 에 대해 상수이나, 각각의 시간 구간 j 에 대해서는 변한다. 관측기는 외부 입력에 대해 무관하기 때문에 식 (7)과 같이 동차 (Homogeneous) 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= F_j \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{z}_j(t) &= H_j \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

위의 모델을 이용하여 단일 세그먼트 j 에 대해 식 (8)과 같은 가관측 행렬을 구성할 수 있다.

$$Q_j(r) = \begin{bmatrix} H_j \\ H_j F_j \\ \vdots \\ H_j F_j^{r-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 복수의 시간 구간에 대해 식 (9)와 같은 TOM을 구성할 수 있다.

$$Q_{TOM}(r) = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 e^{F_1 \Delta t_1} \\ \vdots \\ Q_r e^{F_{r-1} \Delta t_{r-1}} \dots e^{F_1 \Delta t_1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위 식에서 QTOM은 연속 시간 형 PWCS의 가관측성을 판단하기 위한 행렬로써 만약 QTOM의 모든 열이 독립이면 대상 시스템은 가관측하다고 말할 수 있다.

PWCS의 가관측성 판단을 위해 TOM을 계산하는 것은 매우 번거로운 과정이다. SOM은 TOM 사용 시의 번거로움을 최소화하기 위해 제안된 가관측성 판단을 위한 행렬이다. Q_{SOM} 은 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_{SOM}(r) = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

만약 식 (11)을 만족하면 식 (12)가 성립하므로 가관측성 판별에 TOM대신 SOM을 적용할 수 있다.

$$Null(Q_i) = Null(F_i), \forall i \quad (11)$$

$$Rank(Q_{TOM}) = Rank(Q_{SOM}) \quad (12)$$

TOM/SOM은 일반적인 가관측성 분석 방법이다. 이 외에도 공분산 행렬의 고유치 분석을 통

해 가관측성을 해석할 수 있다. 상태변수 중 가관측성이 높을수록 고유치의 크기는 작아져서 0에 근접하고, 가관측성이 낮을수록 고유치는 커지게 된다. 일반적으로 TOM/SOM 방법은 가관측의 유/무만 판별할 수 있을 뿐 가관측한 정도를 제시할 수 없다. 반면 고유치를 분석하는 방법은 고유치의 크기를 관찰하여 가관측 정도를 제시해 줄 수 있다[13].

IV. 가관측성 분석 결과

앞서 설명한 선형화된 모델을 사용하여 랜드마크를 사용하는 경우에 대한 가관측성을 분석하였다. 우선 관측행렬을 사용하여 가관측성을 분석한 후 고유치 분석 결과를 통해 재확인하였다. 또한 랜드마크의 수에 따른 가관측성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션은 10m/s로 직선 운동하는 비행체가 20m 이상 떨어진 8개의 측정값 (특징점 + 랜드마크)을 이용하는 경우로 설정하였다.

4.1 TOM/SOM 분석 결과

위치를 알고 있는 랜드마크를 이용하는 경우 첫 번째 갱신이 이루어졌을 때의 SOM은 식 (13)과 같다. (13)에서 블록 1은 일반적인 특징점만을 이용할 경우 블록 4에 대해 독립적이지 않았으나 추가된 행들에 의해 위치를 알고 있는 랜드마크를 1개 이용할 경우 랭크 2, 2개 이상의 랜드마크를 이용할 경우 랭크 3을 갖게 된다. 블록 2는 랜드마크의 이용 여부에 상관없이 랭크 3을 갖고, 블록 3의 경우 1개의 랜드마크만이 관측되면 블록 1과 4에 대해 독립이 아니기 때문에 블록 3의 서브 블록 3에 의해 결정되며, 이 경우 랜드마크를 이용하지 않는 경우와 같이 랭크 2를 갖는다. 랜드마크가 2개 이상 관측되면 블록 3도 랭크 3을 갖게 된다. 블록 4는 특징점만을 이용하는 경우와 같이 2a의 랭크를 갖는다. 요약하면 랜드마크가 1개 관측되는 경우 2a+8의 랭크를 갖고, 2개 이상의 랜드마크가 관측되는 경우 2a+9의 랭크를 갖는다. 두 번째 갱신 과정이 일어나는 경우 랜드마크의 수와는 상관없이 모든 열이 독립이게 된다(Full Column Rank). 이 분석 결과에서 볼 수 있듯이 특징점만을 이용하는 경우는 시스템이 가관측하지 않으나 위치를 알고 있는 랜드마크를 이용하는 경우 2번째 갱신 과정부터는 시스템이 가관측함을 확인할 수 있다.

$$Q_{SOM} = \begin{bmatrix} H_i \\ H_i F_i \\ H_i F_i^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_{A1}^1 & 0 & H_{A1}^1 & H_{A1}^1 & 0 \\ -H_{A2}^1 & 0 & H_{B2}^1 & 0 & H_{A2}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -H_{Aa}^m & 0 & H_{Ba}^m & 0 & 0 & H_{Aa}^m \\ -H_{A-LM1}^1 & 0 & H_{B-LM1}^1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -H_{A-LMb}^m & 0 & H_{B-LMb}^m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -H_{A1}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -H_{A2}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -H_{Aa}^m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -H_{A-LM1}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -H_{A-LMb}^m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -H_{A1}^1 [f_b \times] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -H_{A2}^1 [f_b \times] & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -H_{Aa}^m [f_b \times] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -H_{A-LM1}^1 [f_b \times] & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -H_{A-LMb}^m [f_b \times] & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

표 1은 랜드마크의 사용 여부에 따른 SOM의 랭크 변화를 비교한 것이다. 이 표에서 볼 때 위치를 알고 있는 랜드마크를 1개 이상 사용할 경우 2번째 갱신부터는 전체 시스템이 가관측하게 됨을 확인 할 수 있다. 그림 4, 5는 랜드마크가 각각 1개, 2개 관측될 때의 SOM의 랭크를 시물레이션을 통해 계산해 본 것이다.

표 1. 랜드마크 사용 개수에 따른 가관측성 변화 (a: 관측 가능한 특징점의 수)

갱신 회수	랜드마크 개수				
	0	1	2	3	4
1회	2a+5 (x)	2a+7 (x)	2a+9 (x)	2a+9 (x)	2a+9 (x)
2회	3a+6 (x)	3a+9 (o)	3a+9 (o)	3a+9 (o)	3a+9 (o)
3회	3a+6 (x)	3a+9 (o)	3a+9 (o)	3a+9 (o)	3a+9 (o)

(○: 가관측함, x: 가관측하지 않음)

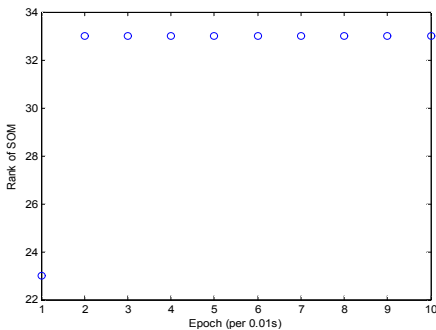


그림 4. 랜드마크가 1개 관측 시 SOM의 랭크 변화 (특징점 개수: 8개)

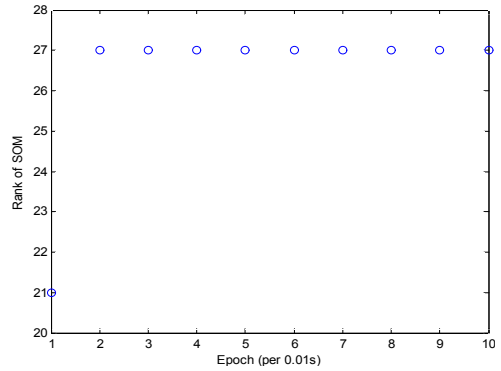


그림 5. 랜드마크가 2개 이상 관측 시 SOM의 랭크 변화 (특징점 개수: 6개)

그림 4는 특징점이 8개로 첫 갱신에서는 2a+7=23, 두 번째 갱신부터는 3a+9로=33으로 표 1에서 예측된 결과와 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 랜드마크가 2개 관측되는 경우로 이때 특징점은 6개가 관측되고 있는 상황이다. 이 경우 첫 갱신에서 2a+9=21, 두 번째 갱신에서 3a+9=27로 랜드마크가 1개 관측될 경우와 마찬가지로 표 1에서 예측한 결과와 완벽히 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 고유치 분석 결과

TOM/SOM을 이용한 가관측성 분석이 가관측성에 대한 'yes/no' 형태의 결과만을 내어 준다면 고유치를 이용한 방법은 가관측성의 정도에 대한 정보를 제공해 준다. 그림 6은 랜드마크가 없을 때의 공분산 변화를, 그림 7, 8, 9는 각각 랜드마크의 수를 1개부터 3개까지 늘려 고유치 변화를 본 것이다. 이 결과에서 볼 때 랜드마크가 관측 되지 않는 경우는 특징점만 이용하므로 이전에 언급했다시피 3개의 가관측하지 않은 모드가 발생한다. 1개의 랜드마크가 관측되는 경우

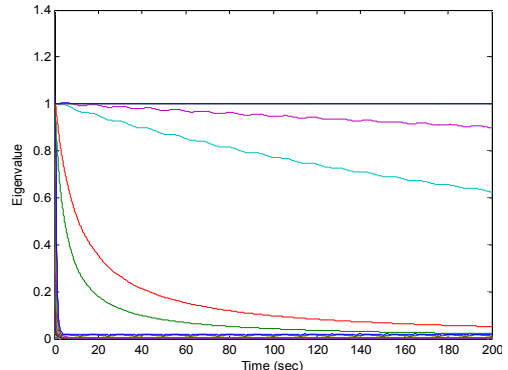


그림 6. 랜드마크가 없을 경우 고유치 변화

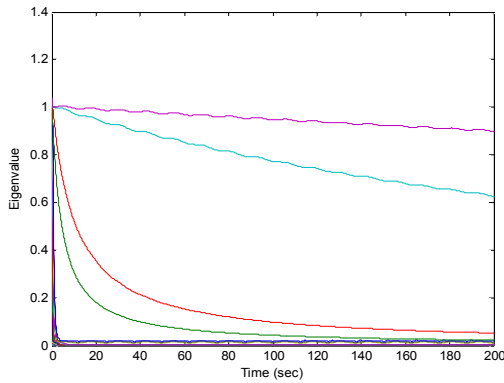


그림 7. 랜드마크 1개 관측 시 고유치 변화

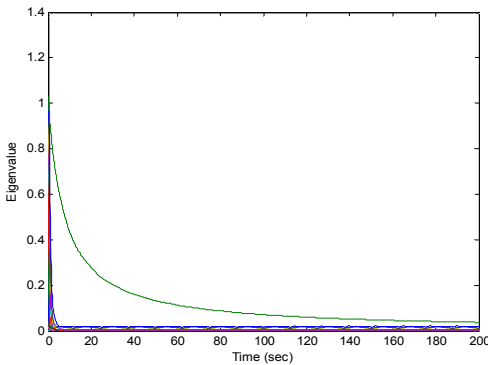


그림 8. 랜드마크 2개 관측 시 고유치 변화

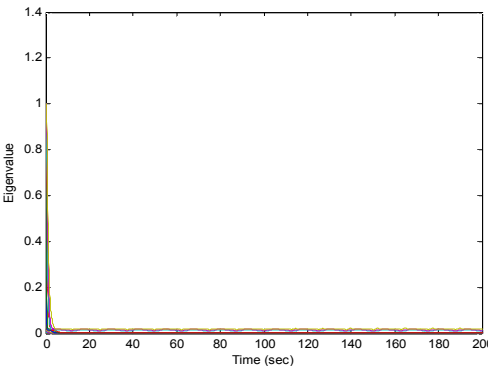


그림 9. 랜드마크 3개 3관측 시 고유치 변화

는 TOM/SOM 결과는 가관측한 것으로 분석 되나 고유치 분석 결과는 2개의 모드가 상대적으로 큰 고유치를 갖고 있어 가관측성이 매우 좋지 않음을 확인 할 수 있다. 반면 2개 이상의 랜드마크가 관측 되는 경우는 전체 고유치가 매우 빠른 속도로 '0'에 가깝게 수렴하는 것을 확인 할 수 있어 특징점만 사용하는 경우에 비해 상대적으로 높은 가관측성을 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 특징점에만 의존하는 비전 기반의 INS/SLAM과는 달리 위치를 사전에 알고 있는 랜드마크들을 이용할 때 얻을 수 있는 성능 향상에 대해 가관측성의 관점에서 분석하였다. 가관측 여부를 판별하기 위해 TOM/SOM을 이용하는 방법과 가관측성의 정도를 비교하기 위한 공분산 행렬의 고유치를 분석하는 방법을 이용하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 두 방법의 결과와 비교하였다.

가관측성 분석과 고유치 분석을 통해 특징점만 이용하는 경우 항상 가관측하지 않는데 반해 랜드마크의 정보를 하나 이상 이용하는 경우는 두 번째 갱신 과정 이후로는 완전 가관측함을 확인 하였다. 또한 고유치 분석 과정에서 2개 이상의 랜드마크를 사용 할 경우 짧은 시간 안에 모든 고유치가 '0'에 가깝게 수렴하는 것을 보아 특징점만을 사용하는 경우나 1개의 랜드마크만을 이용하는 경우에 비해 상대적으로 높은 가관측성을 가지고 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 두 가지 방법으로 분석한 결과 랜드마크는 가관측성을 향상시키며, 2개 이상 이용할 경우 충분한 가관측성을 확보할 수 있다.

이러한 결과로 볼 때 최소한의 랜드마크만 확보하더라도 특징점만 사용할 경우에 비해 향상된 가관측성을 확보 할 수 있으므로 전체 시스템의 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0090722).

참고문헌

- 1) Hugh Durrant-Whyte, Time Bailey, "Simultaneous Localization and Mapping-Tutorial I&II", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, pp. 99~117
- 2) Jonghyuk Kim, *Autonomous Navigation for Airborne Application*, PH.D Thesis, May 2004.
- 3) Jonghyuk Kim and Salah Sukkari, "SLAM aided GPS/INS Navigation in GPS Denied and Unknown Environments", *The 2004 International Symposium on GNSS/GPS*, December 2004.

4) Hofman-Wellenho, Lichtenegger and Walse, *GNSS - Global Navigation Satellites System: GPS, GLONASS, Galileo & more*, Springer Wien New York, 2008.

5) 원대회, *비전센서 기반의 SLAM 기술을 이용한 DR 성능 향상*, 석사학위논문, 건국대학교, 2008.

6) 원대회, 안종선, 윤석창, 성상경, 이영재, 천세범, “파티클 필터의 구조에 따른 비전센서 기반의 INS/SLAM 통합 시스템 성능 비교”, *한국항공우주학회 2009 추계학술발표회 논문집*, 2009, pp. 647~650

7) Teresa Vidal-Calleja, Mitch Bryson, Salah Sukkarieh, Alberto Sanfeliu and Juan Andrade-Cetto, “On the Observability of Bearing-only SLAM”, *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 2007, pp. 4114~4119

8) 천세범, *복수 비전 센서를 이용한 INS/GPS 성능 향상*, 박사학위 논문, 건국대학교, 2008.

9) Mitch Bryson, Salah Sukkarieh, “Building a Robust Implementation of Bearing-only Inertial SLAM for a UAV”, *Journal of Field Robotics* 24(1/2), 2007, pp. 113-143

10) 신정훈, *내고장성 SDINS/GPS 통합시스템 설계*, 석사학위논문, 충남대학교, 2001.

11) D. Goshen-Meskin and I. I. Bar-Itzhack, “Observability Analysis of Piece-Wise Constant Systems-Part I: Theory”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. 28, No 4, pp. 1056~1067, October 1992.

12) D. Goshen-Meskin and I. I. Bar-Itzhack, “Observability Analysis of Piece-Wise Constant Systems-Part II: Application to Inertial Navigation In-Flight Alignment”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. 28, No 4, pp. 1068~1075, October 1992.

13) F.M. Ham, R.G. Brown, “Observability, Eigenvalue, and Kalman Filtering”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. AES-19, No 2, pp. 269~273, October 1983.