

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(6), 502-511(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.6.502

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## PDOP 가중치 기반 정밀 탄궤적 정합 알고리즘

신석현\*, 김종주\*\*

A Precise Projectile Trajectory Registration Algorithm  
Based on Weighted PDOP

Seok-Hyun Shin\* and Jong-Ju Kim\*\*

Hanwha Research Institute Corporation, Korea

## ABSTRACT

Recently, many kind of smart projectiles are being developed. In case of smart projectile, studying in advance, it uses a navigation data acquired from the GNSS receiver to check its location on the geocentric(WGS84) coordinates and to estimate P.O.I(point of impact). However, because of various error inducing factors, the result of positioning involve some errors. We introduce the advanced algorithm for the reconstruction of a navigation trajectory using weighted PDOP, based on a simulated trajectory acquired from PRODAS. It is very fast and robust to noise and shows reliable output. It can be widely used to estimate an actual trajectory of a projectile.

## 초 록

최근 다양한 형태와 기능을 갖춘 스마트 무기들이 개발되고 있다. 화포탄의 경우 스마트 탄을 개발하기 위한 초기 연구로 신관 내부에 GNSS 수신기를 장착하여 탄자의 비행 위치를 정밀하게 측정하고 이를 바탕으로 탄착점을 추정하는 연구가 진행되고 있다. 하지만, 수신기 성능 및 수신된 데이터에 포함된 다양한 오차유발 원인들로 인해 항법데이터의 위치정확도에 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 PRODAS로부터 얻은 모의궤적 데이터를 수신기로부터 얻은 항법데이터에 포함된 PDOP 가중치를 적용하여 정합함으로써 탄의 발사부터 탄착까지의 전체 비행궤적 및 탄착점을 보다 정밀하게 추정하는 개선된 알고리즘을 소개한다.

**Key Words :** Projectile(화포탄), PRODAS(모의궤적 데이터 생성장치), Registration(정합), GNSS(범지구위성항법시스템), Navigation(항법), PDOP(항법 측위 정밀도), CEP(공산오차)

## 1. 서 론

화포탄의 사격 시 원하는 지점에 탄자를 탄착

시키기 위해 이상적으로는 탄자의 질량과 진행 거리에 적합한 장약을 선택하고 그에 해당하는 고각(Elevation Angle)과 방위각(Azimuth Angle)을

† Received : November 25, 2015    Revised : March 25, 2016    Accepted : May 27, 2016

\* Corresponding author, E-mail : daniel0103@hanwha.com

설정해주면 된다. 하지만 비교적 정밀한 사격제원을 이용하더라도 포신 내부의 상태, 탄의 물리량과 형상의 미세한 변화, 장약 세기의 불균일성, 대기상태에 따른 다양한 공기역학적 영향(Aerodynamic Effect), 그리고 방위각 및 고각 측정오차 등의 다양한 원인으로 인해 실제로는 탄자는 예상한 곳과는 다른 곳에 탄착하게 된다. 따라서 최근 개발되고 있는 지능형 화포탄의 경우 탄의 비행궤적을 구현하기 위해 위성항법을 이용한다.

그동안 위성항법을 이용하여 궤적을 보정하는 몇몇 연구들이 있어왔다[1][2]. 전자의 경우 GPS/INS 통합항법을 통해 위성항법 정보가 없는 구간에서 MEMS INS와 추측항법 센서(dead-reckoning sensors)의 정보를 이용하여 궤적을 보정하였다. 후자의 경우 저 샘플링된 GPS 데이터와 디지털 도로망(road network) 정보를 이용하여 예상 이동 궤적을 구하였다. 이러한 궤적구현 방법은 위성 수신기만을 장착한 화포탄에 적용하기 어렵다. 또한 항법정보를 이용하여 탄의 궤적을 복원하는 연구는 전무한 상황이다.

본 저자의 이전 논문에서는 장거리 포발사 및 다양한 시야 방해요소로 탄착점 확인이 불가능한 상황에서 지능형 화포탄(Smart Projectile)으로부터 얻은 부분적인 항법데이터(Navigation Data)에 발사한 탄의 정보(탄종, 장약, 고각 등)를 해석하여 생성된 모의궤적 데이터(Simulation Data)를 정합(Registration)함으로써 탄궤적을 복원하고 예상 탄착점(POI, Point of Impact)을 추정하는 궤적정합 알고리즘을 제안하였다[3]. 하지만 이후 다양한 지형적 환경적 조건하에서 포발사 시험을 진행하면서 가용 위성의 종류 및 배치 상태에 따라 위성항법 연산에 반영되는 오차(error)의 정도가 변하여 궤적정합에 영향을 주는 것을 확인하였다. 따라서 항법 데이터에서 발생하는 궤적 불연속성의 원인을 분석하고 이를 해결하기 위한 알고리즘을 궤적정합 알고리즘에 추가 적용하였다. 이를 통해 항법데이터에 포함된 위치 오차에 강인해진 정밀 탄계적 복원 알고리즘을 추가 발표하였다[4].

본 논문에서는 제안하는 알고리즘을 통해 구한 궤적과 정합에 흔히 사용되는 아핀 정합(Affine Registration)을 통해 얻은 궤적을 서로 비교 분석 함으로써 제안하는 알고리즘의 우수성을 입증하였다. 또한 구글어스(Google Earth)와의 연동 알고리즘을 적용한 사용자 인터페이스(UI, User Interface)를 제작하였다. 이를 통해 사용자 편리성을 증대 시켰고 출력 궤적을 가상 지형에

반영하여 빠른 결과 분석이 가능하도록 하였다.

## II. 본 론

### 2.1 지능형 화포탄에서의 위성항법의 문제점

최근에 개발되고 있는 지능형 화포탄의 경우 다양한 항법 장치들을 이용하여 비행중인 탄의 3차원 공간상에서의 위치 정보를 구한다. 그리고 이를 지상 수신장치로 전송함으로써 운용하는 측에서는 항법데이터 정보를 이용하여 탄자의 시간에 따른 이동 궤적을 확인할 수 있다. Fig. 1은 수신기에 수신된 항법데이터 중 궤적정보를 추출하여 구글어스에 나타낸 것이다. 지능형 화포탄의 경우 데이터를 전송하기까지 약 3~10초 정도가 소요되기 때문에 초기 발사 후 항법을 하기까지의 데이터가 존재하지 않는다. 또한 탄에 부착된 안테나의 지상 수신장치까지의 거리와 방향성에 따른 무선 신호의 감쇄로 인해 지상으로부터 약 100m 이상의 위치에서 탄착까지의 항법데이터가 소실된다.

또한 Fig. 2의 경우와 같이 항법데이터가 불충분하고 위치정확도가 낮을 경우 기존의 외삽법(Extrapolation)을 이용한 궤적 복원 방법은 탄의 실제 비행궤적과 달리 큰 오차를 발생시킨다.

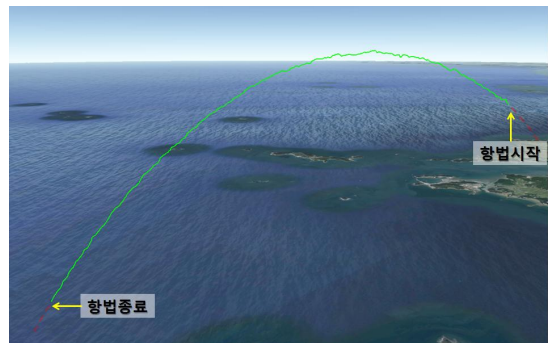


Fig. 1. Result of Navigation Trajectory

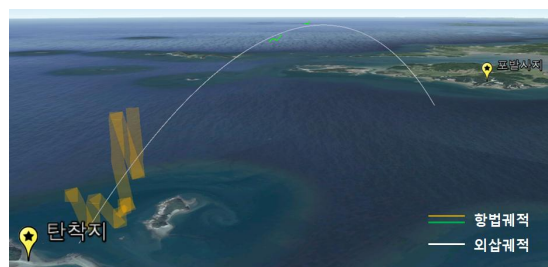


Fig. 2. Comparison of Reconstructed Trajectory

따라서 보다 정확한 비행궤적 추정을 통해 실제 탄착점에 근사한 예상 탄착점을 도출할 수 있는 객관적이고 신뢰성 높은 방법이 필요하다.

### 2.2 위성항법 위치계산 알고리즘 분석

탄의 신관에 내장된 수신기를 이용하는 지능형 화포탄의 경우 위성으로부터 받은 항법메세지를 통해 자신의 위치를 계산, 출력하게 된다. 위성으로부터 받은 항법정보는 아래와 같은 식을 통해 위성항법 수신기의 위치값으로 변환된다[5]. 아래의 식은 GPS의 위치계산 알고리즘을 나타낸다.

$$PSR_{i_t} = \sqrt{(X_{Sut_i} - X_{User})^2 + (Y_{Sut_i} - Y_{User})^2 + (Z_{Sut_i} - Z_{User})^2} + c\Delta t_0 \quad (1)$$

$$R_{G,es_i} = \sqrt{(X_{Sut_i} - X_{G,es})^2 + (Y_{Sut_i} - Y_{G,es})^2 + (Z_{Sut_i} - Z_{G,es})^2} \quad (2)$$

$$PSR_{i_t} = R_{G,es_i} + \frac{\delta(R_{G,es_i})}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta(R_{G,es_i})}{\delta y} \Delta y + \frac{\delta(R_{G,es_i})}{\delta z} \Delta z + c\Delta t_0 \quad (3)$$

$$V = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} \frac{X_{G,es} - X_{Sut_1}}{R_{G,es_1}} & \frac{Y_{G,es} - Y_{Sut_1}}{R_{G,es_1}} & \frac{Z_{G,es} - Z_{Sut_1}}{R_{G,es_1}} & c \\ \frac{X_{G,es} - X_{Sut_2}}{R_{G,es_2}} & \frac{Y_{G,es} - Y_{Sut_2}}{R_{G,es_2}} & \frac{Z_{G,es} - Z_{Sut_2}}{R_{G,es_2}} & c \\ \frac{X_{G,es} - X_{Sut_3}}{R_{G,es_3}} & \frac{Y_{G,es} - Y_{Sut_3}}{R_{G,es_3}} & \frac{Z_{G,es} - Z_{Sut_3}}{R_{G,es_3}} & c \\ \frac{X_{G,es} - X_{Sut_4}}{R_{G,es_4}} & \frac{Y_{G,es} - Y_{Sut_4}}{R_{G,es_4}} & \frac{Z_{G,es} - Z_{Sut_4}}{R_{G,es_4}} & c \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} PSR_1 - R_{G,es_1} \\ PSR_2 - R_{G,es_2} \\ PSR_3 - R_{G,es_3} \\ PSR_4 - R_{G,es_4} \end{bmatrix} \quad V = A^{-1} \cdot R \quad (4)$$

위에 나타낸 식(1)은 위성과 수신기 사이의 실제거리와 시간차이로 나타낸 의사거리(Pseudo Range, PSR) 계산식이다. 이상적으로는 3개 위성 각각의 위치값과 위성신호가 수신기에 도달하는데 걸리는 시간값을 알면 의사거리는 0가 되고 삼각측량법 만으로 수신기의 정확한 위치를 구할 수 있다. 하지만 항법메세지를 통해 받은 위성의 시간과 수신기가 카운트하는 시간의 차이 및 신호가 수신기에 도달하는 동안 겪게 되는 전리층과 대류층의 지연, 다중경로반사 등의 다양한 영향으로 인해 필연적으로 의사거리가 발생하게 된다.

식(2)는 실제 수신된 데이터로부터 추정된 수신기와 위성사이의 거리를 나타낸다. 3개의 위성만을 이용할 경우 수신기와 위성 사이의 의사거리(Pseudo Range)를 계산할 수 없기 때문에 식(3)에서와 같이 시간오차를 계산하기 위한 위성 데이터를 추가 대입하고 식을 선형화 함으로써 의사거리를 계산하게 된다. 식(4)는 식(3)을 총 4개의 위성값에 대한 행렬식 형태로 나타낸 것으

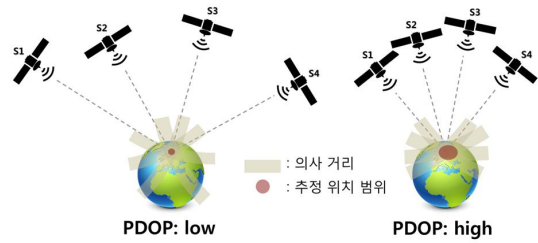


Fig. 3. Spatial geometry for PDOP values

로 식의 프로세스는 다음과 같다.

추정된 초기 데이터로부터 얻은 위성과 수신기 사이의 시간오차( $\Delta t_0$ )를 통해 각 위성 별 초기 의사거리( $PSR_i$ )를 계산한다. 의사거리는 위성의 위치벡터의 역행렬과 곱해져서 각 축에서의 위치 오차 수정값( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )와 시간 오차 수정값( $\Delta t$ )를 도출하는데 사용된다. 초기 추정된 수신기 위치에 위치오차 수정값을 반영하여 새롭게 추정된 위치로 업데이트하고 시간오차 수정값을 적용하여 의사거리를 새로 계산한 한다. 그런 다음 앞의 과정을 반복하면 시간오차와 위치오차는 점차 줄어들게 되고 시간 오차 수정값이 최소화 될 때의 각 축의 위치 오차 수정값을 추정된 위치값에 최종 적용함으로써 수신기의 항법위치를 도출하게 된다.

최종적으로 계산된 A는 공분산 행렬 (Covariance Matrix)이라고 하는데 이 행렬은 수신기로부터 각각의 위성으로의 단위방향벡터를 나타낸다. Fig. 3을 통해서 비교해보면 단위방향 벡터의 크기가 클 경우에는 위성이 공간상에 넓게 분포해서 실제 수신기 위치에 근접한 결과를 도출한다. 하지만 벡터의 크기가 작아지면 항법 위치계산 시 오차가 증가하여 실제 수신기의 위치와 동떨어진 결과를 얻게 된다.

공분산 행렬 A는 수신기 위치에서 보여지는 위성의 기하학적 구조에 의존적이다. 따라서 이를 이용하여 위치정확도를 평가할 수 있는 지표 벡터를 구할 수 있는데 이를 Q행렬이라고 한다. 이에 대한 식은 아래와 같다.

$$Q = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Q행렬은 거리 공분산 행렬을 항법 공분산 행렬로 나타낸다. 따라서 이 행렬은 의사거리 오차로부터 항법 오차로의 환산계수를 나타내게 된다. Q행렬을 이용하여 위성항법의 정확도를 평

가하는 파라미터를 출력할 수 있는데 이를 DOP(Delution Of Precision)라 한다. DOP 중 3 차원 위치에 대한 정확도를 측정할 때에는 PDOP (Positional DOP)를 사용하는데 계산하는 식은 아래와 같다.

$$PDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \quad (6)$$

이상적으로는 탄자가 비행하는 동안 수신기가 항법계산에 사용하는 위성을 연결하여 구한 체적이 가장 큰 상태가 되고 PDOP값이 1로 고정(Fix)되어 비행하는 동안의 정밀한 궤적을 산출해야 한다. 하지만 실제 상황에서는 비행하는 탄자에 내장된 수신기를 기준으로 한 위성 배치 상태와 주변 환경조건, 그리고 수신기 안테나의 타입과 지향방향에 따른 수신 성능 변화 등 다양한 원인들의 복합적인 영향에 의해 위성항법 연산을 위해 사용하는 위성의 개수와 위치, 그리고 종류가 바뀌게 된다. 그로 인해 PDOP는 탄자가 비행하는 동안 그 값이 변하게 되고 출력되는 항법위치 정확도에도 영향을 미쳐 결과적으로 항법궤적에 불연속성이 발생하게 된다.

### 2.3 PDOP 가중치 알고리즘

저자의 이전 논문[3]의 경우 PDOP를 고려하지 않고 궤적정합을 진행했었는데 PDOP값이 작을 때에는 궤적정합에 문제가 발생하지 않았지만 PDOP값이 크게 변하는 구간이 포함된 항법데이터를 이용하여 궤적정합을 하게 되면 실제 탄착점과는 동떨어진 곳을 예상 탄착점으로 측정하는 문제가 발생하였다. 이는 위치정확도가 낮은 궤적 데이터가 궤적정합 알고리즘에 포함되어졌기 때문이다. 아래의 표는 위치정확도에 대한 항법위성의 공간배치의 영향을 나타낸다[6].

PDOP값은 GNSS 수신기를 기준으로 위성의 배치상태에 따라 변하게 된다. Table 1을 살펴보면 PDOP값이 1인 경우 실제 GNSS 수신기의 위치와 항법을 통해 구한 위치 출력값이 동일하다고 간주하며 1~2사이의 값을 가질 경우 현실적으로 매우 우수한 항법 위치값을 출력한다고 판단한다. 2~5사이의 값은 고정밀 항법 위치값 출력의 한계 허용 범위가 되고 5 이상의 값은 항법에 사용하기에는 제약이 따르게 된다.

이번에 제안하는 알고리즘은 기존의 궤적정합

Table 1. Meaning of PDOP values

DOP Value	1	1-2	2-5	5-10	10-20	>20
Rating	Ideal	Excellent	Good	Moderate	Fair	poor

알고리즘에 PDOP 가중치를 적용하여 위치정확도가 높은 부분의 궤적일수록 정합 연산에 비중을 크게 하고 위치정확도가 낮은 부분의 경우 연산 비중을 작게 함으로써 보다 빠르고 신속한 탄계적 복원이 가능하게 하였다. 아래는 PDOP값에 가중치를 적용하기 위한 수식을 나타낸다. 이때  $n$ 은 반복적 시험을 통해 2.87을 최적의 값으로 도출하였다.(시험 결과는 8page의 Table 2에 나타내었다.)

$$W(t) = n/n^{PDOP(t)}, \quad (n = 2.87) \quad (7)$$

수식은 PDOP의 신뢰도 특성에 따라 식(7)과 같이 지수적으로 감소하는 형태를 나타내도록 설계하였다. 즉 특정 시간에서의 항법데이터의  $PDOP(t)$ 가 1일 때에는 가중치는 1이 되고 그때 얻은 위치데이터(위도, 경도, 고도)는 궤적정합에 그대로 반영된다. 반면,  $PDOP(t)$ 가 1보다 큰 경우에는 위의 수식과 같이 가중치를 계산하고 위치데이터에 계산된 가중치를 곱하여 궤적정합에의 반영정도를 조절한다.

### 2.4 PDOP 가중치 적용 궤적정합

궤적정합에는 위성항법을 통해 얻은 항법데이터와 모의궤적 데이터가 사용된다. 모의궤적 데이터는 PRODA라는 프로그램을 통해 발사할 탄자의 형상, 장약, 발사고각, 방위각, 주변 환경에 대한 최적의 인자(Parameter)를 설정, 입력하여 실제와 유사한 데이터를 생성한다. 하지만 실제 포발사를 통해 얻은 항법데이터와 모의궤적 데이터를 궤적 분석을 통해 비교해보면 실제 포발사 환경에서의 다양한 요인들로 인해 유사하지만 차이가 나는 결과를 나타낸다.

Figure 4는 항법데이터로부터 생성한 궤적과 모의궤적 데이터로부터 생성한 궤적을 나타낸다. 위의 그림은 방위각 오차와 바람의 영향으로 인해 발생한 차이를 나타내고 가운데 그림은 포발사 시의 항법위성의 배치상태 불균일 및 수신기 감도 저하로 인한 항법 측위의 부정확도를 나타낸다. 아래 그림은 GPS·GLONASS 복합항법 시 GLONASS 항법 측위의 오차로 인해 발생한 차이를 나타낸다.

이러한 다양한 원인들로 인해 예상한 궤적(모의 궤적)과 항법 궤적 사이에 차이가 발생하기 때문에 실제 탄이 비행한 궤적을 추정하기 위해서는 측위 오차의 영향을 최소화 하여야 한다.

수신기로부터 생성된 항법데이터에는 PDOP에 대한 정보가 포함되는데 앞에서 설명한 알고리즘에 적용하여 가중치 데이터를 구한 다음 아래와

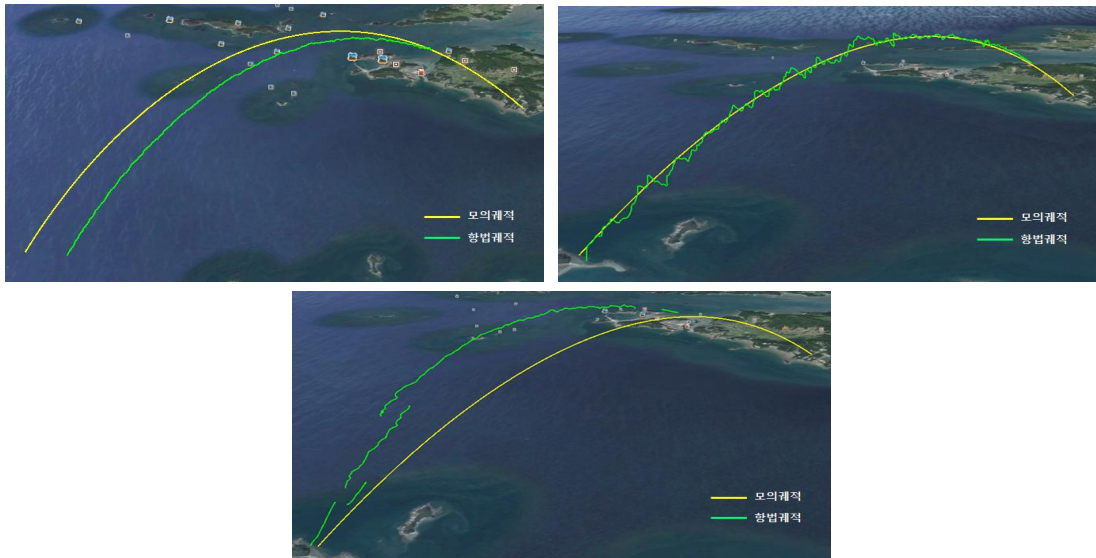


Fig. 4. Comparison of Trajectory(Simulation : yellow, Navigation : green)

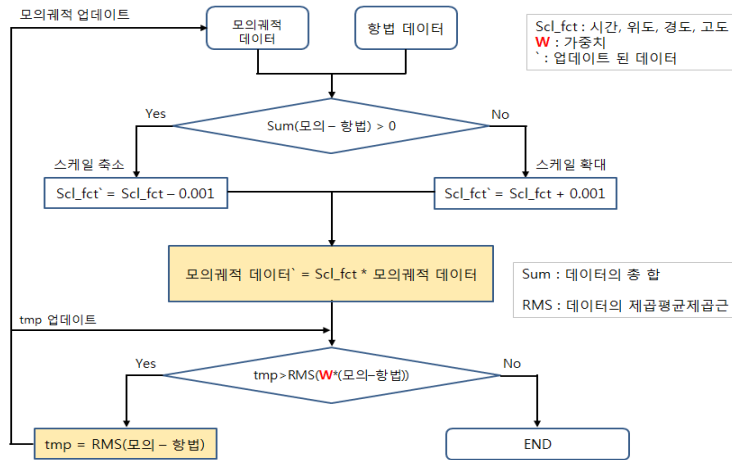


Fig. 5. Registration Flowchart(Time, Latitude, Longitude, Altitude)

같은 궤적 정합 프로세스에 적용하면 PDOP 가중치가 적용된 궤적정합이 진행된다. 정합 알고리즘에는 노이즈 제거를 위한 필터링(Filtering)과 항법데이터와 모의신호데이터의 샘플링 차이를 해결하기 위한 보간법(Interpolation Method), 그리고 최적의 결과값 도출을 위한 반복법(Iterative Method)이 포함되어 있다[7].

Figure 5와 Fig. 6은 궤적정합을 위한 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

궤적정합 알고리즘은 크게 시간, 위도, 경도, 고도를 정합하는 부분과 방위각, 편이를 정합하는 부분으로 나뉜다. 모의궤적 데이터 중 시간, 위도, 경도, 고도, 방위각, 편이의 총 6개의 데이

터의 크기를 조절하여 그에 대응하는 항법궤적 데이터와 유사하게 변형시키는 과정을 통해 궤적을 정합하게 된다.

궤적정합은 앞에서 언급한 순서대로 진행된다. Fig. 5의 정합 프로세스를 살펴보면 우선 모의궤적 데이터 중 시간 데이터에 시간 요소(Scf\_fct)를 곱해서 데이터를 갱신한다. 그런 다음 항법데이터의 시간 데이터와 차이에 가중치(W)를 곱해서 두 데이터 사이의 차이값이 최소가 될 때까지 시간 요소를 재설정하는 과정을 반복한다. 반복을 통해 최적의 값을 얻게 되면 이때를 시간축이 정합된 것으로 간주하고 해당 프로세스를 종료하고 고도정합을 동일 프로세스로 진행한다.

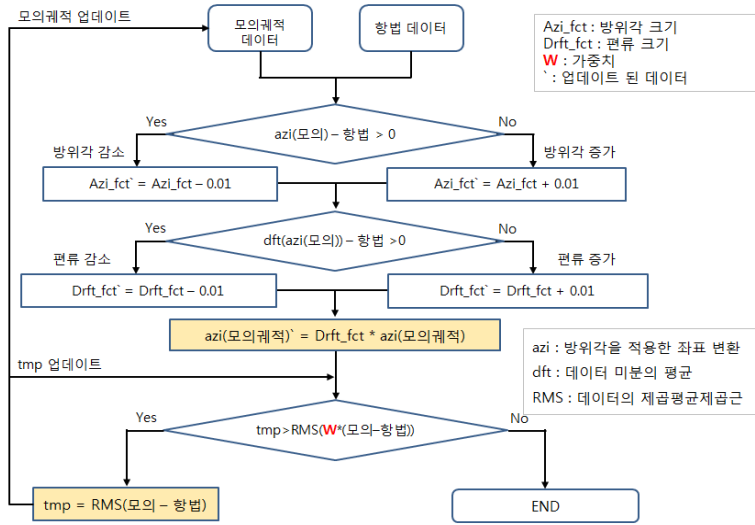


Fig. 6. Registration Flowchart (Azimuth, Drift)

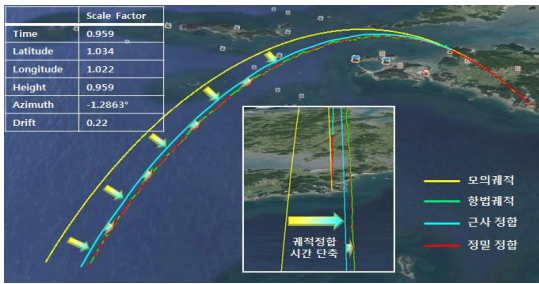


Fig. 7. Result of Trajectory Registration

고도 정합이 완료되면 위도, 경도 정합 전에 방위각과 편이 정합을 진행하는데 이유는 Fig. 4에서 보았듯이 항법데이터와 모의계적 데이터 사이에 방위각과 편이의 차이가 발생하기 때문이다. Fig. 6의 프로세스를 살펴보면 모의계적 데이터에 방위각 요소(Sci\_fct)를 증감하여 데이터를 갱신한 다음 갱신된 데이터에 편이 요소(Drft\_fct)를 증감하여 곱한다. 그런 다음 항법데이터와의 차이에 가중치(w)를 곱해서 구한 두 데이터 사이의 차이값이 최소가 될 때까지 방위각 요소와 편이 요소를 순차적으로 재설정하는 과정을 반복한다. 반복을 통해 각각의 최적의 값을 얻게 되면 이때를 방위각과 편이가 정합된 것으로 간주하고 해당 프로세스를 종료하고 위도, 경도 정합을 진행한다. 위도, 경도 정합은 앞의 시간, 고도 정합과 마찬가지로 Fig. 5의 프로세스를 이용하여 순서대로 진행한다.

위의 알고리즘은 일정한 요소값을 대입하여 순차적으로 궤적정합을 진행하기 때문에 모의계

적과 항법계적의 위치 및 형태의 차이가 클수록 정합에 걸리는 시간도 길어진다. 따라서 정규화 알고리즘을 응용한 두 궤적 사이의 차이를 근사적으로 줄여주는 알고리즘을 적용하였다[8].

$$\hat{y}_t^n = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n [y_t / \hat{y}_t^o] \times \hat{y}_t^o \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n W(t) \times [y_t - \hat{y}_t^n]^2 \quad (9)$$

식(8)에서 모의계적 데이터( $\hat{y}_t^o$ )와 항법계적 데이터( $y_t$ )의 크기 차이의 평균을 통해 새롭게 업데이트 된 모의계적 데이터( $\hat{y}_t^n$ )를 구한다. 그런 다음 식(9)와 같이 모의계적 데이터와 항법계적 데이터의 차이의 자승값에 PDOP 가중치를 곱한 후 평균을 취하여 초기 잔차(R, residual)를 얻는다. 이 잔차가 최소가 될 때까지 Fig. 5와 Fig. 6의 프로세스를 이용하여 각각의 요소들을 업데이트 한다. Fig. 7은 앞에서 설명한 두 알고리즘을 이용한 궤적정합 프로세스를 나타낸다. 도출된 요소 값들도 함께 나타내었다.

### 2.5 궤적정합 및 분석 UI 구성

궤적정합 및 분석을 위한 UI는 Matlab을 이용하여 설계하였다. Fig. 8은 UI의 구성을 나타낸다.

UI는 Fig. 9와 같이 크게 데이터를 입력하는 부분과 결과 데이터를 분석하는 부분, 분석 결과를 저장하는 부분, 그리고 분석 결과를 구글어스

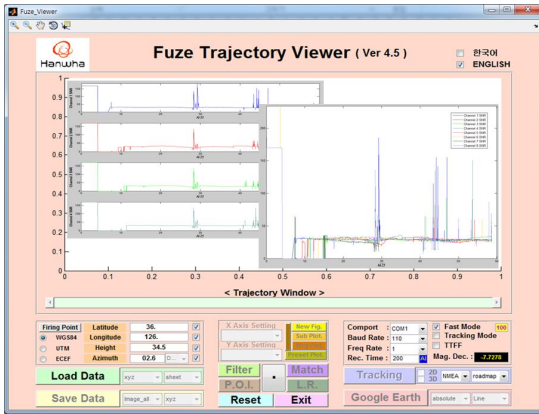


Fig. 8. UI Configuration

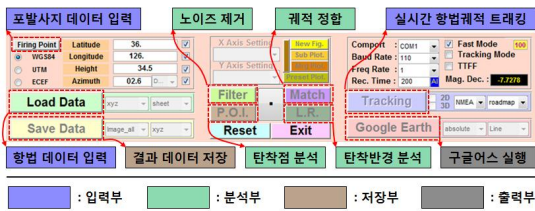


Fig. 9. Explanation of UI Buttons

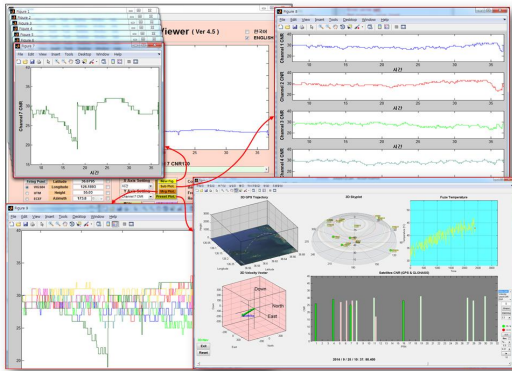


Fig. 10. Representation methods of Data

로 출력하는 부분으로 나누어진다.

포발사 시 실시간으로 받은 항법 데이터 또는 포발사 후 저장된 항법 데이터를 불러와서 분석에 방해가 되는 노이즈를 제거한다. 그런 다음 궤적정합을 진행하고 출력된 결과 데이터를 바탕으로 탄착점 분석 및 탄착반경 분석을 진행한다. 결과 데이터는 추후 분석을 위해 저장하게 되며 저장된 데이터 중 위치에 대한 데이터는 구글어스로 불러와서 가상 지형상에 궤적으로 나타낸다.

결과 데이터 분석은 Fig. 10과 같이 분석하러

는 데이터의 특성에 따라 크게 4가지 방식으로 분석이 가능하다. 독립적인 개별 데이터를 분석할 경우에는 하나의 창에 하나의 그래프로 나타낸다. 서로 연관이 있는 데이터들을 분석할 경우에는 하나의 창에 여러 개의 그래프를 배치하거나 하나의 창에 그래프를 겹쳐 나타내는 방식으로 표현한다. 여러 개의 데이터가 서로 복잡하게 연관되어 있어 단순 그래프로 분석이 어려운 경우 관련 데이터들을 통합하여 시각화 함으로써 직관적인 이해가 가능하도록 하였다.

이를 통해 기존에 함수 단위로 개별적으로 동작하던 알고리즘들을 UI로 통합하여 서로 유기적으로 연결하고 자동화 함으로써 보다 손쉬운 결과 분석 및 출력이 가능해졌다.

## 2.6 결과 비교

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 아핀 정합을 이용하였다[9]. 아핀 정합은 입력 데이터를 확률밀도함수로 가정하고 이를 최소자승 연산과 그에 따른 확률분포를 이용하여 정합률이 높은 아핀 변환(Affine Transformation) 행렬을 찾는다. Fig. 11에 표현된 식을 통해 주어진 입력에 가장 최적인 변환 행렬을 계산한다.

아핀 정합은 정합하려는 데이터와 기준이 되는 데이터의 상관관계(Correlation)가 높아야 정합 결과가 좋게 나타난다. 따라서 모의궤적 데이터를 부분적인 항법 데이터에 정합하기 위해서는 모의 궤적 데이터에서 항법 데이터와 형태적 유사도가 큰 부분을 직접 구해주어야 한다. 이 부분을 자동화 할 경우 루프(loop) 연산에 엄청난 시간(약 25분)이 소요된다.

반면, 제안하는 알고리즘의 경우 Fig. 12와 같이 항법 데이터와 모의궤적 데이터 간의 잔차를 자동으로 최소화하는 방향으로 수렴시키고 연산에 걸리는 시간 또한 약 3초 정도로 매우 작다.

아핀 정합 결과 데이터는 가장 높은 정합률을 나타내는 아핀 행렬을 대입하여 구하였고 제안하

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1 y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 y_1 & 0 & 1 \\ x_2 y_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 y_2 & 0 & 1 \\ x_3 y_3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_3 y_3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ x'_3 \\ y'_3 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} Ax = b \\ x = A^{-1}b \end{matrix}$$

A Squares

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 11. Equation of Affine Transformation

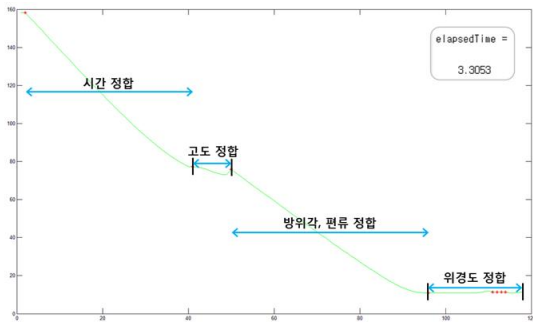


Fig. 12. Plot showing the RMS Transition

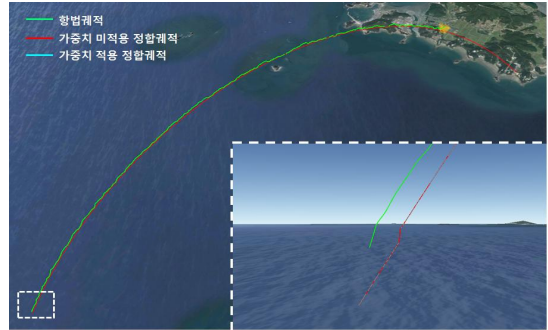


Fig. 14. Registration Result of 1st. Firing

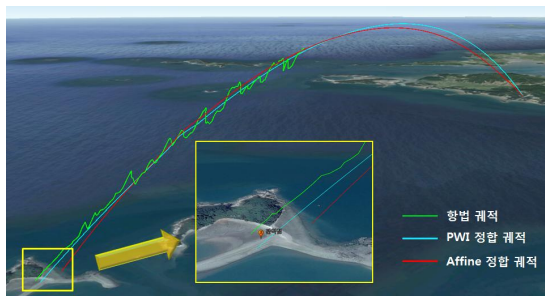


Fig. 13. Comparison of Registration Result

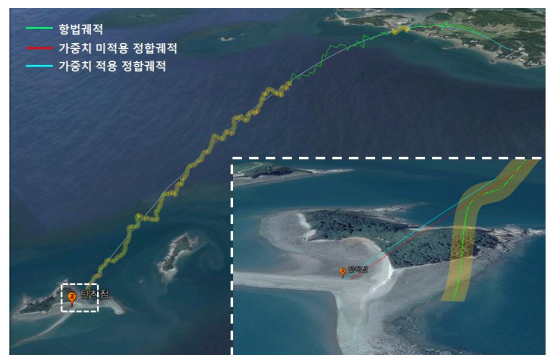


Fig. 15. Registration Result of 2nd. Firing

는 알고리즘(PDOP Weighted Iterative Registration, PWI 정합) 결과 데이터와 항법 데이터를 구글어스에 함께 나타내어 비교해 보았다.

Figure 13을 보면 제안하는 알고리즘을 통해 정합한 모의궤적이 항법궤적과 더 유사하고 실제 측정된 탄착점에 훨씬 가깝게 나타난 것을 확인할 수 있다.

다음으로 궤적정합 알고리즘을 서로 다른 환경에서의 포발사 시험을 통해 얻은 3개의 항법 데이터에 적용해 보았다. 모든 항법궤적은 탄자가 비행하는 동안 변화하는 PDOP를 표현하기 위해 해당 궤적 데이터가 가지는 PDOP값을 이용하여 궤적선의 색상과 굵기가 달리 나타나도록 하였다 (PDOP값이 작을 경우 가늘고 초록색에 근접하고 클 경우 굵고 선홍색에 근접하게 설정).

PDOP가중치의 적용 유무에 따른 모의궤적 데이터의 항법궤적 데이터로의 정합 결과는 아래와 같다.

1차 포발사의 경우 Fig. 14에서 보는 것처럼 탄자가 비행하는 동안 항법 초기 몇 초 동안 약 6.8의 PDOP값을 나타낸 것을 제외하고는 약 2.3의 낮은 PDOP값으로 안정적으로 항법을 한 것을 확인하였다. 따라서 가중치를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에서도 지면에서의 위경고도 차이가 거의 발생하지 않았다.



Fig. 16. Registration Result of 3rd. Firing

2차 포발사의 경우 Fig. 15에서 보는 것처럼 위성 기하학적 배치상태가 고르지 않아 탄자가 비행하는 동안 PDOP값이 불안정하게 변화였고 비행 중후반의 경우 약 7.8의 PDOP값을 나타내었다. 따라서 가중치를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우 지면에서의 위경고도 차이가 약 11.5m 발생하였다.

3차 포발사의 경우 Fig. 16에서 보는 것처럼 위성의 배치상태가 비교적 양호하였지만 GLONASS 항법 계산상의 오차가 발생하여 궤적



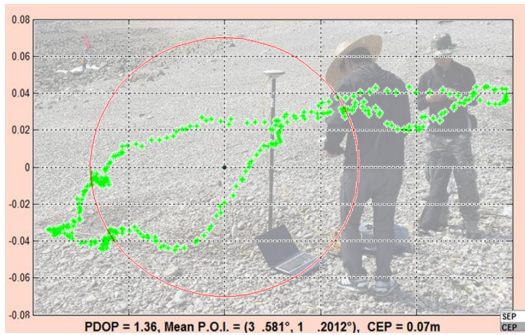


Fig. 17. POI Measurement using DGPS

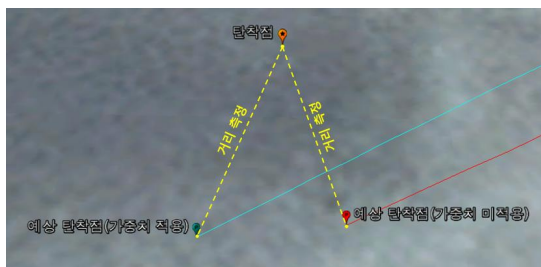


Fig. 18. Distance Measurement

의 많은 부분에서 PDOP값과는 별개로 궤적의 위치정확도가 낮게 출력되었다. 하지만 탄착하기 전 몇 초 동안은 GPS만을 이용하여 항법(PDOP: 2.1)을 하였고 높은 위치 정확도를 가지는 궤적 정보를 얻을 수 있었다. 가중치를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우 지면에서의 위경고도 차이는 약 679.7m 발생하였다.

다음으로 가중치를 적용한 궤적정합을 이용할 경우 실제 탄착점과의 차이가 어떻게 나타나는지 확인해보았다.

Figure 17과 같이 실제 탄착점을 찾아 상용 DGPS장비를 이용하여 정밀측위를 하였다. 그런 다음 측위값의 분포를 적용형 원형공산오차(CEP, Circular Error Probability) 계산 알고리즘에 대입하여 확률적으로 정밀한 탄착지의 위경고도(오차 반경: 7cm)를 계산하였다. 이 결과값을 이용하여 식(7)의 n값을 변경하면서 최적의 n값을 구하였고 그 결과는 Table 2와 같다. 이를 이용하여 Fig. 18과 같이 실험탄착지와 궤적정합을 통해 구한 예상 탄착지 사이의 거리를 계산해 보았다(1차 포발사의 경우 바다에 탄착하여 탄착점 측정이 불가능했기 때문에 제외).

포발사를 통해 얻은 항법궤적에 모의궤적을 정합시킬 때 가중치 적용 유무에 따라 각기 다른 예상 탄착점을 계산하게 된다. 이를 실험 탄착점에서 측정한 정밀 위치값과 비교해보면 Table 3과

Table 2. Distance Comparison between Real and Estimated P.O.I

	궤적정합 (가중치 적용)			
	n=1.23	n=2.87	n=3.24	n=4.81
2차 결과	21.243m	8.214m	9.862m	15.623m
3차 결과	113.274m	12.854m	27.291m	48.458m

Table 3. Distance Comparison between Real and Estimated P.O.I

	궤적정합 (가중치 미적용)	궤적정합 (가중치 적용)
2차 결과	28.157m	8.214 m
3차 결과	675.468m	12.854 m

같이 가중치를 적용한 궤적정합이 그렇지 않은 것보다 실 측정 위치값에 보다 근접한다는 것을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

기존 본 저자의 궤적정합 알고리즘에서 문제가 되었던 PDOP 변화에 따른 항법궤적의 불연속성과 그로인해 발생하는 궤적정합 불일치를 PDOP 가중치를 적용함으로써 해결하였다. 그리고 데이터 분석 및 정합 알고리즘의 편리한 사용을 위해 UI를 설계하였고 이를 통해 사용자의 편의성을 증대시켰다. 또한 정합 결과를 구글어스와 연동함으로써 보다 사실적인 궤적 표현 및 분석이 가능하게 되었다. 이를 통해 보다 정밀한 예상 탄착점을 계산할 수 있게 되었으며 기존의 정합 알고리즘(아핀 정합)과의 비교 및 실 측정한 탄착점과의 비교를 통해 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

### References

- 1) Yin, L., Chengyang, Z., Yu, Z., Xing, X., Wei, W., Yan, H., " Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories," Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Nov. 2009
- 2) Spagnol, C., Muradore, R., Assom, M., Beghi, A., and Frezza, R., " Trajectory

reconstruction by integration of GPS and a swarm of MEMS accelerometers: model and analysis of observability," Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Oct. 2004

3) Seokhyun, S., Jongsoo, O., and Wanjo, K., " Algorithm for the Reconstruction of Ballistic Trajectory Using Simulated Trajectory," Proceedings of KIMST, Sep. 2014, pp.853~854

4) Seokhyun, S., Jongju, K., and Jineep, R., " A Novel Algorithm for the Precise Reconstruction of Ballistic Trajectory Using Weighted DOP based on Simulated Trajectory," Proceedings of KIMST, May 2015, pp.151~154

5) Zogg, J. M., " GPS basics," U-Box, 2002.

6) Geoffrey, P., Cheryl, K., and Steve, W., " Constellations Merge," Professional Surveyor Magazine, Mar. 2010.

7) Dosik, H., Gengsheng, L. Z., " A new simple iterative reconstruction algorithm for SPECT transmission measurement," Med Phys, Vol. 32, 2005, pp.2312~2319.

8) Byunggyu, K, Dongjo, P, " Adaptive image normalisation based on block processing for enhancement of fingerprint image," Electronic Letters, Vol. 38, 2002, pp.696~698.

9) Ho, J., Peter, A., Ranganranjan, A., and Yang, M.H., " An Algebraic Approach to Affine Registration of Point Sets," In Proc. of ICCV, Oct. 2009, pp.1335~1340