

원격자료수신장비의 발사체 궤적 추정정확도 향상을 위한 궤적데이터마이닝의 적용

(Application of trajectory data mining to improve the estimation accuracy of launcher trajectory by telemetry ground system)

이 성 희¹⁾, 김 두 경²⁾, 김 근 형^{3)*}

(Sunghee Lee, Doo-gyung Kim, and Keun-hyung Kim)

요 약 본 논문은 궤적데이터마이닝의 2차 회귀분석 기법을 이용하여 나로우주센터 내 원격자료수신장에서 우주발사체의 실시간 비행궤적을 보다 정확하게 추정하기 위한 방법을 제시하고 있다. 원격자료수신장비는 추적손실 없이 실시간으로 우주발사체의 비행위치와 상태정보를 수신하기 위한 정확한 위치추정 알고리즘이 필요하다. 따라서 나로호 1차 발사 시, 기존 보간법에 의한 원격자료수신장비 안테나의 거친 구동특성을 보완하고 안정적인 발사체의 위치추정을 위한 2차 회귀기법을 고려했다. 성능분석을 위해 나로호 1차 비행시험데이터를 사용하였고, 수학적 모델링을 통해 실시간 발사체의 비행위치정보를 추정한 결과가 분석되었다. 분석결과, 궤적데이터마이닝의 2차 회귀기법을 적용한 위치추정알고리즘이 기존의 보간법에 의한 위치추정알고리즘보다 향상된 안테나 구동특성 및 추정정확도를 보였다.

핵심주제어 : 궤적데이터마이닝, 2차 회귀분석, 보간법, 우주발사체, 원격자료수신장비

Abstract This paper is focused on how the trajectory of launch vehicle could be optimally estimated by the quadratic regression of trajectory data mining for the operation of telemetry ground system in NARO space center during real-time. To receive the telemetry data, the telemetry ground system has to track the space launch vehicle without tracking loss, and it is possible by the well-designed algorithm to estimate a flight position in real-time. For this reason, the quadratic regression model instead of interpolation was considered to estimate the exact position data of launch vehicle and the improvement of antenna performance. For analysis, the real trajectory data which had been logged during NARO 1st launch mission were used, the estimation result of launcher current position was analyzed by the mathematical modeling. In conclusion, the algorithm using quadratic regression based on trajectory data mining showed the better performance than previous interpolation algorithm to estimate the next flight position and the antenna driving performance.

Key Words : Trajectory Data Mining, Quadratic Regression, Interpolation, Launch Vehicle, Telemetry Ground System(TGS)

* Corresponding Author : khkim@jejunu.ac.kr

Manuscript received September 17, 2014 / revised November 1, 2014 / accepted October 22, 2015

1) 한국항공우주연구원 정지궤도위성관제팀, 제1저자
2) 제주대학교 경영정보학과, 제2저자
3) 제주대학교 경영정보학과, 교신저자

1. 서 론

최근 GPS 및 무선통신 기술의 발전과 더불어 다양한 분야에서 이동 대상체(Moving Target)의 위치정보를 수집하여 적용 가능한 서비스에 대한 수요가 늘어나고 있으며, 이를 위해 각 대상체에 대한 추적(Tracking)이 실시간으로 이루어지면서 생성된 궤적데이터를(Trajectory Data) 분석하는 일에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 이동 대상체는 위성, 유도무기, 위성발사체, 항공기, 차량 등 시간에 따라 위치가 연속적으로 변하는 대상으로 정의할 수 있으며 사람, 동물 및 태풍등도 그 범주에 포함된다[2]. 과거에 생성된 궤적의 일부나 전부를 해석하여 미래의 궤적을 예측하거나 의미 있는 패턴을 분석하는 것은 여러 가지 의미(안정성, 효율, 정확성)에서 매우 중요하다[3]. 위성발사체의 경우 빠른 속도(최대 8Km/Sec)로 비행을 하며 발사 후 10분 만에 원하는 우주공간에 위성을 분리하고 임무를 종료하기 때문에 지상 추적 장비에서 발사체를 실시간으로 추적하여 정확한 비행궤적과 데이터를 획득하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 궤적데이터마이닝의 회귀분석을 통하여 나로우주센터 원격자료수신장비(TGS: Telemetry Ground System)가 발사 임무 중 우주발사체의 비행궤적을 정확하게 추정하여 발사체로부터 안정적인 데이터를 수신할 수 있는 비행위치추정 알고리즘을 고찰하였다. 나로우주센터 원격자료수신장비에서 나로호 1차 발사임무동안 저장된 비행궤적데이터를 이용하였고, 이를 통해 기존 보간법(Interpolation)과 궤적데이터마이닝의 2차 회귀기법(Quadratic Regression)에 의한 위치추정알고리즘을 비교하여 아래 2가지 사항과 같이 안테나 구동특성 및 위치추정알고리즘의 정확성을 분석하였다.

- 나로호 1차 발사임무를 통해 실시간 비행궤적 추정 시 사용된 기존 위치추정알고리즘(보간법)의 안테나 구동특성 및 오차분석
 - 회귀기법의 수학적 모델링을 통해 구현된 위치추정알고리즘으로 발사체의 실시간 위치추정 시, 안테나 구동각과 Slavind data와의 오차 분석
- 분석결과 보간법에 의한 기존위치추정알고리즘

에 비해 궤적데이터마이닝의 2차 회귀기법을 적용한(Quadratic regression) 알고리즘이 보다 우수한 시스템 성능특성(안테나 구동특성)과 추정정확도(적은 오차)를 보였다.

2. 이론적배경 및 시스템 개요

2.1 궤적데이터마이닝

일반적으로 궤적데이터는 이동하는 특정 대상체가 일부시점에서 위치가 연속적으로 변하는 데이터를 기록한 것이다[4]. 위성, 자동차, 동물, 선박 등의 이동 데이터는 자동차의 교통흐름제어나 동물의 이동패턴 등을 유추하기 위해 많이 수집되었고 이러한 궤적데이터를 바탕으로 각 분야에서 유용한 데이터마이닝 연구가 진행되었다[5-8]. 특히 위성이나 위성발사체와 같이 이동하는 대상체에 의해 생성된 궤적의 일부 또는 전부를 이용하여 패턴이나 경향분석을 통해 향후의 위치를 추정하는 것은 추적 임무 전 구간동안 매우 중요하다. 궤적데이터마이닝의 연구 분야는 크게 3가지 정도로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 궤적 집합화(Trajectory Clustering) 방법으로 2가지 방법이 사용되며, 유사한 이동궤적들을 하나의 동일한 그룹으로 묶기 위해 모든 데이터를 비교하거나 전체 데이터 중 특징 있는 부분을 추출한다[9-10]. 전체 궤적을 모두 비교할 경우, 그 데이터가 너무 많고 길어서 군집화 작업에 상당히 비효율적이며 궤적상의 작은 변화로 유사궤적을 찾아내는데 어려움이 있다. 이를 위해 전체궤적을 일부 부분궤적으로 나눈 후 그룹화 하는 궤적 군집화 방법이 주로 사용된다[11]. 둘째, 여러 가지 궤적들을 사전에 정의한 범주 중 하나의 영역에 할당하는 분류(Classification)이다 [5]. 이 방법은 주로 기계학습 기법을 바탕으로 연구되어 왔으며, 세포나 바이러스의 이동궤적을 분류하기 위해서 위치의 변화를 기록한 연구가 수행되어져 왔다[1]. 셋째, 자동차 주행 및 유도무기 등의 탄환 궤적 등을 추정하기 위해 사용하는 회귀분석이다. 따라서 본 논문에서는 이동대상체(발사체)의 궤적 추정을 위해 사용되는 회귀분석에 초점을 맞추었다.

2.2 보간법 및 회귀분석

현재 시점의 발사체 궤적을 정확하게 추정하고 원격자료수신장비 안테나를 위치시키기 위해 안테나제어장치는 나로우주센터 내 발사통제센터 비행정보중앙처리장비로부터 실시간 비행위치정보(Slaving Data)를 수신하고, 이 데이터를 처리하기 위한 알고리즘이 필요하다. 보간법에 의한 위치추정은 'Fig. 1'과 같이 주어진 관측점들을 정확히 지나는 근사모델로써, 회귀분석모델과 달리 실제적용 모델에서 보다 실험실과 같은 이상적인 상황에서 시뮬레이션 할 때 랜덤오차(Random Error)가 없는 실험이나 추정방식에서 많이 사용된다. 통계적 혹은 실험적으로 구해진 데이터들로부터, 주어진 데이터를 만족하는 근사함수를 구하고 이 식을 이용하여 주어진 변수에 대한 함수 값을 구하는 일련의 과정을 수행한다. 측정점이나 실험점을 정확히 지나기 때문에 많은 측정값들이 존재하고 비선형성이 큰 시스템에 적용할 경우에는 성능 및 예측값을 추정하는데 있어서 정확도를 증가시킬 수 있으나, 측정값이나 실험값이 적은 경우에는 응용분야의 궤도 예측(추정)값이나 시스템의 성능 예측값에 왜곡을 줄 수도 있다. 또한 주어진 값들을 모두 통과하는 하나의 수식을 만들어 내기가 어렵고, 구간을 나누어 처리할 경우 여러 개의 수학적 식이 산출되어 복잡도가 증가된다.

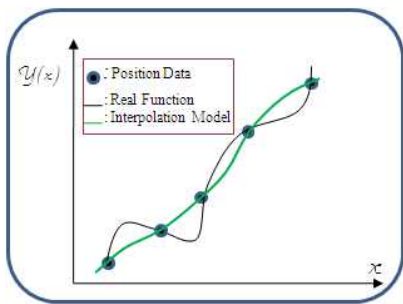


Fig. 1 Interpolation Model

회귀분석은 실제 시스템 운용이나 실험과 같이 불확실하게 발생할 수 있는 랜덤 에러를 갖거나 노이즈가 있는 데이터를 부드럽게 연결(Smooth Out)하여 시스템의 전체적인 경향을 파악하는 경우에 유용하게 사용되는 근사모델 방법이다. 따라

서 보간법처럼 주어진 측정치 값들을 모두 정확히 지날 필요가 없고, 근접하게 (Smoothing) 처리하면 된다.

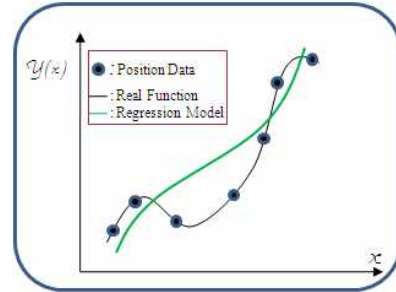


Fig. 2 Quadratic Regression

일반적으로 둘 또는 그 이상의 변수들 간의 인과관계를 파악함으로써 어떤 특정변수(종속변수)의 값을 다른 한 개 또는 그 이상의 변수(독립변수)들로부터 함수적인 연관성을 설명하기 위한 수학적 모형을 도출하고 예측하는 방법을 사용한다 [12]. 즉 특정 변수 값의 변화와 다른 변수 값의 변화가 가지는 수학적 함수식을 파악함으로써 상호관계를 추론하기 위한 회귀식을 사용한다. 회귀분석의 수학적 모형을 도출하기 위해서는 종속변수와 독립변수 사이의 함수관계(선형, 비선형)를 먼저 파악하고, 종속변수에 영향을 주는 독립변수의 영향 검토를 통해 회귀함수를 정의할 수 있다.

2.3 원격자료수신장비

원격측정(Telemetry)이란 어원에서 볼 수 있듯이 사람이 직접 접근하기 어려운 환경에서 통신링크를 통해 계측하고자 하는 대상체의 정보를 획득하기 위해 사용되어 왔고, 자동차, 항공기 유도무기 등 움직이는 대상체를 시험하기 위해 발전되어 왔다[13-14]. 일반적으로 필요한 데이터를 획득하고 모니터링하기 위한 대상체에 송신장치를 설치하고, 해당 데이터를 획득하기 위한 수신장치가 지상국에 별도로 운용된다. 송신장치의 경우 센서에 의한 신호획득 처리부와 무선 송신부등이 구성되며, 수신장치는 안테나와 RF 수신기, 신호처리 및 기록장치 등으로 이루어져 있다[15-16]. 우주발사체 추적용 원격자료수신장비는 발사 전부터 최

중 위성이 분리되는 시점까지(수 천 Km) 발사체를 추적하고 발사체로부터 신호를 수신하여 실시간 처리하는 방식으로 이루어져 있다. 위성발사를 위해서는 상당한 예산이 소요되며, 발사 전 구간 동안 예상할 수 없는 많은 위험상황이 발생할 수 있다. 발사 전부터 발사임무가 완료되는 전 구간 동안 발사체의 동작특성 및 상태정보는 발사 진행의 지속여부를 판단하는 주요 정보로 사용되며 위성의 진입과 상태 등을 확인하는데 매우 중요한 요소로 사용된다[13]. 따라서 위성발사체를 정확하게 추적(Tracking)하여 임무 전 구간동안 발사체의 위치 및 상태정보를 획득하고 실시간 분석하는 기술이 무엇보다 중요하며, 이를 위해서는 발사체를 정확하게 추적하는 기술이 선행되어야 한다.

나로우주센터 원격자료수신장비는 발사 전부터 발사체(나로호) 및 탑재체(위성)에 대한 각종 동작상태 및 특성 등에 관한 제반자료를 획득하는 무선통신시스템으로써, 발사체의 위치, 자세, 속도, 가속도, 온도, 압력 및 단(Stage)분리, 위성분리 등의 주요상태 및 운동특성을 획득하기 위한 장비이다[17]. 발사체로부터 안정적인 신호 획득을 위한 운용개념으로 발사 초기구간, 소형지상국 1대를 센터내부에 설치하고 2대의 대형지상국(직경 11m 안테나)을 제주추적소에 설치하였다. 소형지상국은 비행초기구간(약 30Km)에 대하여 신호를 수신하는 역할을 하며, 제주추적소 원격자료수신장비는 발사 후 고각 약 1도 이상이 확보되는 시점(발사 후 약 41초)부터 위성분리시점(발사 후 약 540초)까지를 임무구간으로 설정하였고, 나로호 2단 비행구간이 시작되는 시점부터 위성분리시점까지는 안정적인 신호획득을 위하여 해상 이동형 다운레이저시스템을 남태평양 해상에 운용하였다. 제주추적소에 설치·운용중인 원격자료수신장비는 발사체 송신부의 성능 특성에 따라 최대 2,000Km까지 추적이 가능하고, 실제 임무 시 서로 간에 백업 기능이 가능하도록 설계되어 있다.

나로호의 경우, 최대 8km/sec의 속도로 비행하기 때문에 원격자료수신장비가 발사통제센터 비행정보중앙처리장비로부터 비행위치정보(Slaving Data)를 수신하여 안테나를 구동할 시점에는 이미 수신된 데이터가 과거시점(다운레이저의 경우 최대 0.7초)의 데이터가 되어 보정 없이 그대로 사



Fig. 3 Operational Concept for TGS

용할 수 없다. 즉 비행위치정보를 수신한 시점에 발사체는 이미 그 위치를 통과하여 발사체 추적에 실패할 수도 있다. 따라서 수신된 과거의 비행 궤적정보를 기준으로 현 시점에서의 발사체 위치를 정확하게 추정하고, 비 정상적인 비행위치정보에 대해서도 민감하게 반응하지 않는 위치추정 알고리즘이 필요하다.

2.4 비행위치정보(Slaving Data) 운용개념

나로호 발사 추적 임무 시, 센터 내 소형지상국을 제외한 각 운용국의 안테나는 운용개념에 따라 자동추적모드, Slaving Mode, 프로그램모드(Program), 매뉴얼모드(Manual) 순으로 우선순위(Priority)가 지정되어 발사체 추적 임무를 수행한다. 자동추적의 경우 발사체로부터 송신되는 RF 신호를 추적하고, 안테나로부터 전송된 추적오차신호를 처리하여 안테나 구동부를 실시간 제어한다. 발사 초기구간 RF 신호를 수신하지 못하거나, 자동추적 실패 시에는 외부 시스템으로부터 비행위치정보(Slaving Data)를 제공받아 안테나 운용모드를 변경(Slaving Mode)하여 발사체를 지속적으로 추적할 수 있다. 따라서 제주추적소 및 이동형 다운레이저시스템은 최초 발사체로부터 신호를 수신하기 전 발사통제센터 비행정보중앙처리장비에 의해 전송된 비행위치정보를 이용하여 안테나를 Slaving Mode로 우선 운용한 후 발사체로부터 RF 신호를 획득하여 자동추적모드로 전환한다.

나로우주센터 발사통제센터 내의 비행정보중앙처리장비는 지상추적장비(추적레이더, 원격자료수

신장비, 광학추적장비)로부터 발사체의 위치정보를 획득하여 처리 후 비행위치정보를 분배하는 기능을 수행한다. 각 추적 장비에서 수신된 비행위치정보는 비행정보중앙처리장비의 알고리즘에 의해 필터링 및 좌표계 변환 등의 과정을 거쳐 관련 시스템 전자지도 및 그래프 상에 발사체의 위치표시를 위해 분배된다. 또한 각 추적 장비들의 추적 실패 시, 재 추적 시도를 위한 기본 자료로 이용하기 위해 최적의 발사체 위치 데이터를 각 추적장비의 사용 좌표계 형태로 변환한 후 전용 통신망을 통해서 각 추적시스템으로 분배한다[18]. 비행정보중앙처리장비에 의한 비행위치정보는 추적레이더 및 다른 추적장비에 의해 발사체를 추적한 비행위치정보를 기준으로 각 위치의 추적장비로 전송되기 때문에 각 추적장비에서는 현재 위치에서의 발사체 위치정보를 정확히 알고 추적하기 위한 알고리즘이 필요하다.

3. 기존 위치추정알고리즘(보간법) 분석

나로호 발사임무는 2009년 8월 25일 1차 발사를 시작으로 2013년 1월 30일까지 모두 3차례 이루어졌으며, 발사 임무동안 발사체 추적을 위한 지상추적장비의 임무는 모두 성공적으로 수행되었다. 본 논문의 목적과 분석을 위해 본 절에서는 성공적인 위성궤도 진입과 나로호가 정상적인 비행궤적을 유지한 3차 발사데이터보다 페어링 미분리로 인하여 비행궤적이 비정상적으로 유지되어 지상에서의 추적각 변화가 심했던 나로호 1차 발사데이터를 이용하여 기존 위치추정알고리즘의 분석 및 문제점을 제시하였다.

나로호 1차 발사의 경우, 위성보호를 위해 사용되는 페어링(위성보호덮개) 한쪽이 미분리되어 발사 후 380초 이후에 발사체의 비행자세가 심하게 변하였고 그에 따라 비행위치정보의 변동폭도 매우 컸다. 따라서 발사 운용개념에 따라 발사 후 380초 이후 자동추적모드에서 Slaving Mode로 안테나를 운용한 제주추적소 원격자료수신장비#2의 안테나는 비행위치정보의 큰 변동폭으로 인해 안테나 구동이 매우 불안정하였고 자동추적에 진입할 수 없었다. 본 절에서는 제주추적소 원격자료

수신장비#2에서 기록된 로그파일을 이용하여 기존 위치추정알고리즘에 의한 안테나 구동 및 오차특성을 분석하였다.

3.1 발사임무내용 및 비행궤적

나로호 발사 임무를 위해, 원격자료수신장비는 'Fig. 4'와 같이 센터내부의 소형지상국, 제주추적소, 해상 이동형 다운레이저시스템을 운용하였다. 비행정보중앙처리장비로부터 실시간 비행위치정보를 수신하면서 Slaving Mode로 안테나를 구동하다가 고각 약 3도 이상이 유지되는 시점부터 RF 신호에 의한 자동추적을 수행하였다.

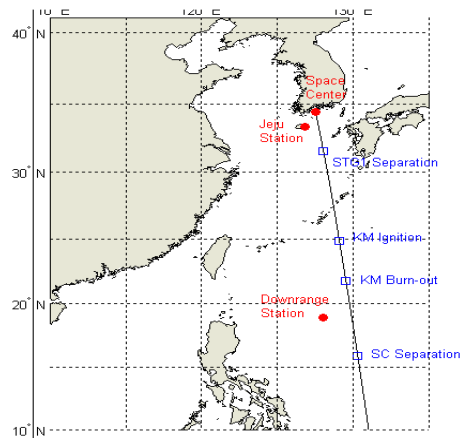


Fig. 4 Launch Trajectory for KSLV-1

3.2 결과분석

나로호 1차 발사에 따른 비행위치정보의 수신경향을 살펴보면, 제주추적소 및 다운레이저시스템에서 발사 후 380초 이전까지는 특별한 진동폭을 가지지 않는 정상적인 비행위치정보가 수신되었으나 그 이후에는 발사체의 이벤트 문제(페어링 미분리)로 인해 2단 발사체가 비행중심을 잡지 못하고 급격한 자세변화와 비정상적인 비행으로 불연속적인 값을 갖는 비행위치정보가 수신되었다. 발사 후 380초까지는 추적레이더에 의한 비행위치정보가 Slaving Data로 분배되었으나 이후 운용개념에 따라 발사체 내부에 있는 관성항법장치(INS: Inertial Navigation System) 데이터를 통한 비행위치정보가 분배되었다. 발사체의 2단 점화

이벤트가 발생하고 추력에 의한 가속도가 상승하던 발사체는 상단 페어링 한곳의 미 분리로 인하여 무게중심이 무너지고 비행자세가 불안정해지면서 심하게 텀블링하는 문제가 발생한다. 발사체 내부의 관성항법장치에 의해서 생성되어 분배된 비행위치가 심하게 변하였고 이 데이터를 수신하여 운용개념에 따라 Slaving mode로 추적을 실시한 원격자료수신장비#2에서는 원천데이터의 나쁜 특성 때문에 자동추적을 할 수 없을 정도로 안테나 지향 구동각의 변화가 심하게 나타났다. ‘Fig. 5’와 같이 발사 후 380초 이후에 비행위치정보에 의하여 추적한 안테나 구동각(DA: Direction of Antenna Pointing)과 추정된 비행위치정보(DO: Direction of Object Designation) 사이의 오차(방위각: 검은색 Plot, 고각: 빨간색 Plot)가 매우 심하게 변하는 것을 볼 수 있다. 이동형 해상 다운레인지시스템에서의 안테나 구동특성도 발사 후 380초까지는 다운레인지 안테나제어장치에서 추정된 Slaving mode에 의한 각도의 변화가 적고 연속적인 값을 가지나, 이후에 비행위치정보의 소스원이 INS로 변하면서 변동폭이 심하게 발생하였다.

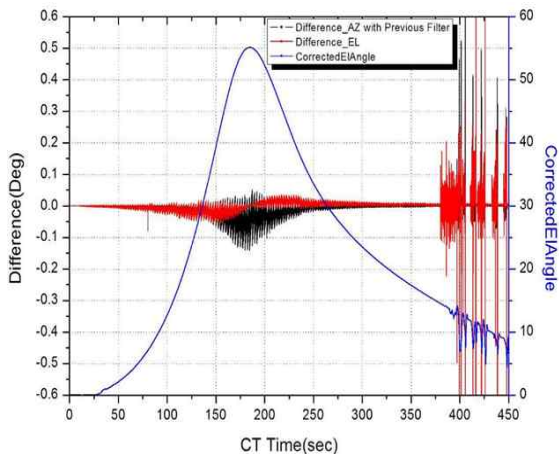


Fig. 5 Angle Error between DO and DA by Interpolation Algorithm in Jeju TGS#2

4. 궤적데이터마이닝의 회귀기법적용

4.1 위치추정알고리즘 모델링

원격자료수신장비 안테나제어시스템은 비행위치정보를 이용하여 안테나가 지향해야 할 위치정보를 계산한다. 계산을 위해 사용되는 원천 비행위치정보는 추적레이더 또는 INS에 의해 측정된 값이며 이 값에는 계측한 장비 특성에 따른 측정오차가 포함되어 있다. 따라서 원격자료수신장비 및 이동형 다운레인지시스템의 안정적인 운용을 위해서는 수신된 비행위치정보를 이용하여 더욱 부드럽고 정확한 안테나 구동특성을 위한 알고리즘을 구현해야 한다. 회귀분석을 통한 회귀계수를 구하는 가장 좋은 방법은 측정치에 가장 적합한 식을 구하는 것이고, 적합도가 가장 큰 식이란 잔차(측정치-추정치)의 합이 최소가 되도록 정의하는 식이라고 할 수 있다. 따라서 잔차(Residual)의 제곱의 합이 최소가 되게 하는 회귀식을 구하는 것이 일반적인 방법이며 이러한 추정은 최소자승법을 통해 알 수 있다. 추정 시, 오차를 최소화하기 위해 오차의 합을 단순히 이용해서는 안 된다. 즉, 오차가 +3, -3일 경우 오차의 합이 0이 되어 어떠한 오차도 발생하지 않게 되며 오차의 전체 합을 잘 못 표현할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 오차를 양수로 바꾼 값을 이용하는 것이 필요하며, 절대값을 이용하거나 제곱을 이용하는 방법을 사용할 수 있다. 수학적 편의성을 위해 절대값을 이용하는 방법보다 제곱합수를 이용하여 제곱합을 최소로 하는 편미분으로 쉽게 계산할 수 있다. 발사통제센터에서 송신되는 비행위치정보는 제주추적소의 원격자료수신장비 #2,#3의 위치좌표로 변환된 값 Az, El에 대한 회귀분석 모델을 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_{az} &= \beta_{az0} + \beta_{az1}t + \beta_{az2}t^2 + \epsilon_{az} \\ s_{el} &= \beta_{el0} + \beta_{el1}t + \beta_{el2}t^2 + \epsilon_{el} \end{aligned} \quad (1)$$

측정치 s_i 의 개수 n 과 측정값 s_i 에 대해 오차 제곱합이 최소가 되도록 식 (2)를 도출하고, 최소자승법에 의해 오차항이 최소가 되도록 그 값을 추정할 수 있다.

$$E = \sum_i^n [s_i - (\beta_0 + \beta_1 t_i + \beta_2 t_i^2)]^2 \quad (2)$$

E를 최소로 하는 회귀계수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 에 대해 각각 편미분하고 식 (3)의 연립방정식을 통해 추정값인 $\hat{\beta}_j$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \beta_0} &= -2 \sum_i^n [s_i - (\beta_0 + \beta_1 t_i + \beta_2 t_i^2)] = 0 & (3) \\ \frac{\partial E}{\partial \beta_1} &= -2 \sum_i^n t_i [s_i - (\beta_0 + \beta_1 t_i + \beta_2 t_i^2)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \beta_2} &= -2 \sum_i^n t_i^2 [s_i - (\beta_0 + \beta_1 t_i + \beta_2 t_i^2)] = 0 \end{aligned}$$

위 식에서 $\beta_j(j=0,1,2,\dots,m)$ 에 관한 연립방정식을 Gauss 정규방정식 행렬과 벡터로 표시하면 $Aa=b$ 형태로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_0 n + \hat{\beta}_1 \sum_i^n t_i + \hat{\beta}_2 \sum_i^n t_i^2 &= \sum_i^n s_i & (4) \\ \hat{\beta}_0 \sum_i^n t_i + \hat{\beta}_1 \sum_i^n t_i^2 + \hat{\beta}_2 \sum_i^n t_i^3 &= \sum_i^n t_i s_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_i^n t_i^2 + \hat{\beta}_1 \sum_i^n t_i^3 + \hat{\beta}_2 \sum_i^n t_i^4 &= \sum_i^n t_i^2 s_i \end{aligned}$$

회귀계수 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 를 구하기 위하여 계수행렬이 대칭행렬로 표현될 수 있으며, $A=C^T C$ 이고, $b=C^T s$ 이므로 식 (5)와 (6)과 같이 전개할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum t_i & \sum t_i^2 \\ \sum t_i & \sum t_i^2 & \sum t_i^3 \\ \sum t_i^2 & \sum t_i^3 & \sum t_i^4 \end{bmatrix} a = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} \sum s_i \\ \sum t_i s_i \\ \sum t_i^2 s_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (C^T C)\hat{\beta} &= C^T s \\ \hat{\beta} &= (C^T C)^{-1} C^T s & (6) \\ &= \begin{bmatrix} n & \sum t_i & \sum t_i^2 \\ \sum t_i & \sum t_i^2 & \sum t_i^3 \\ \sum t_i^2 & \sum t_i^3 & \sum t_i^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum s_i \\ \sum t_i s_i \\ \sum t_i^2 s_i \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (6)을 통해 회귀계수를 구하고, 최종적으로 수신한 비행위치정보의 t_0 시점에서 과거 n개의 측정값을 기준으로 하는 회귀식 (7)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_n(az, t_0) &= \hat{\beta}_{az0} + \hat{\beta}_{az1}t + \hat{\beta}_{az2}t^2 & (7) \\ s_n(el, t_0) &= \hat{\beta}_{el0} + \hat{\beta}_{el1}t + \hat{\beta}_{el2}t^2 \end{aligned}$$

따라서 현재 시점(t)의 위치 추정값은 식 (7)을 이용하여 최종 측정시간(t_0)과 발사체의 속도(v_0) 및 가속도값(a_0)을 고려하여 식 (8)과 같이 안테나 운용각(값)을 구할 수 있다.

$$s_{current}(t) = s_n + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a_0(t - t_0)^2 \quad (8)$$

‘Fig. 6’은 원격자료수신장비#2에서 보간법에 의해 분석한 데이터를 회귀분석 모델링을 통해 분석한 결과로써, ‘Fig. 5’의 CT+380초 이후 구간을 비교해 볼 때 안테나 구동각과 추정된 비행위치정보와의 오차가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다.

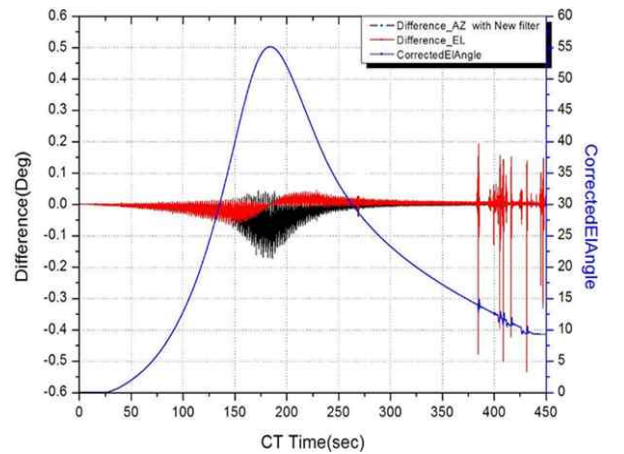


Fig. 6 Angle Error between DO and DA by Quadratic regression in Jeju TGS#2

4.2 결과분석 및 비교

본 알고리즘을 이용하여 제주추적소 원격자료 수신장비#3에 저장된 나로호 1차 발사 데이터를 이용하여 기존위치추정알고리즘(보간법)과의 비교 분석도 실시하였다. ‘Fig. 7’부터 ‘Fig. 10’까지는 두 알고리즘에 의한 안테나 운용각(DA)과 비행위치정보에 의한 추정값(DO)간의 오차특성을 비교한 것이다.

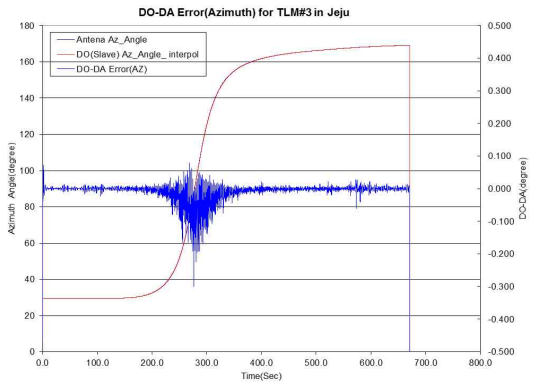


Fig. 7 DO-DA_AZ Error by Interpolation in Jeju TGS#3

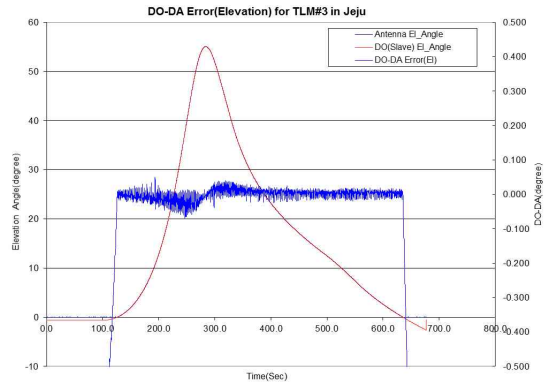


Fig. 10 DO-DA_EL Error by Quadratic Regression in Jeju TGS#3

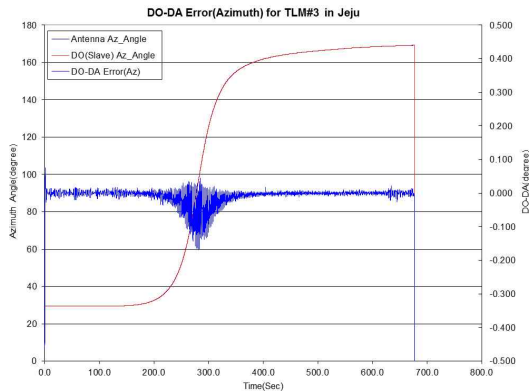


Fig. 8 DO-DA_AZ Error by Quadratic Regression in Jeju TGS#3

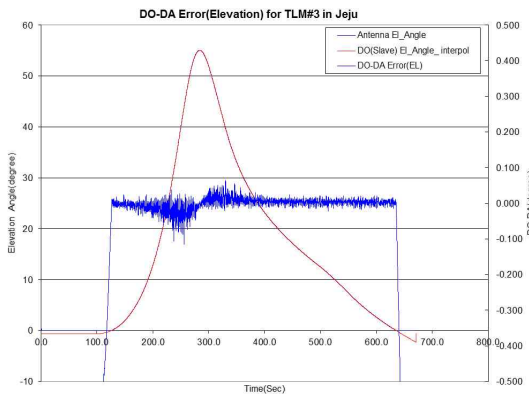


Fig. 9 DO-DA_EL Error by Interpolation in Jeju TGS#3

안테나 운용각과 추정된 Slaving Data간의 차이에 대한 최대 $Error_{quad}$ 값은 아래 식 (9)를 이용해서 구할 수 있고 제주추적소 지상국은 <Table 1>과 같은 오차특성을 나타내었다.

$$Error_{quad} = \sqrt{(Error_{Az} * \cos(El))^2 + Error_{El}^2} \quad (9)$$

(여기서, $Error_{Az(El)} = DO-DA_Az(El)$)

Table 1 DO-DA Error_{quad} Analysis

DO-DA_Quad (최대값)	기준위치추적 알고리즘	2차 회귀기법
제주추적소 TGS#2	0.196	0.103
제주추적소 TGS#3	0.182	0.098

따라서 궤적데이터마이닝의 2차 회귀기법을 통한 안테나 실제 운용각과 비행위치정보에 의한 추정각 최대오차(DO-DA)가 크게 줄어들고 그래프에서 볼 수 있듯이 전체적인 오차도 부드럽게 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 추정된 근사모델을 통해 보다 부드러운 안테나 구동특성을 구현할 수 있고 발사체 비행위치에 따른 자동추적 실패 확률을 줄일 수 있는 정확도 향상을 가져올 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 나로호 1차 발사결과 데이터를 이용하여 기존의 위치추적알고리즘(보간법)과 궤

적데이터마이닝의 2차 회귀기법을 통한 원격자료 수신장비의 위치추정알고리즘을 비교, 분석하였다. 나로호 1차 발사임무 시, 페어링 미 분리로 인해 발사체가 텀블링하며 비행위치가 급격하게 변할 때 비행위치정보에 의한 Slaving mode로 추적 임무를 수행한 원격자료수신장비#2의 경우 비행 위치정보 자체의 급격한 변화로 인해 안테나의 구동특성이 매우 거칠게 나타났고 자동추적에 실패하는 현상이 나타났다. 이러한 특징은 보간법에 의한 위치추정알고리즘이 비행위치정보를 제공하는 다른 추적 장비에 의해 실제 획득한 측정점을 모두 고려하여 계산하였고, 그 값에 오류정보가 포함되어 있는 경우 보간 에러까지 발생하여 안테나의 구동특성이 거칠게 나타나 정확한 발사체 궤적 추적이 어려웠다. 따라서 과거의 실제 측정치 궤적을 그대로 지나는 데이터를 이용한 보간법보다 과거의 궤적데이터를 사용하여 궤적데이터마이닝의 2차 회귀기법을 통해 근사화한 추정방정식 모델을 만들고 이를 통해 비행위치궤적 정보를 예측하여 발사체 추적손실 및 안테나 구동특성을 부드럽게 유지할 수 있었다.

4절의 결과에서 볼 수 있듯이, 나로호 1차 비행 궤적을 이용하여 2차 회귀기법을 통한 안테나 운용각의 오차 및 구동특성을 살펴보면, 발사체 2단 점화가 일어난 후 급격한 비행위치 변화가 일어나는 약 380초 이후 구간부터 임무 종료 시까지 안테나 운용각과 비행위치정보의 차이가 기존의 보간법 보다 훨씬 줄어든 것을 볼 수 있다. 비행위치 정보로 입력되는 개별적인 값에 모두 반응하여 안테나 동작특성이 나타나지 않았고, 정의된 예측모델에 따라 추정된 값을 부드럽게 따라가는 것을 알 수 있다. 'Table 1'과 같이 안테나 운용각과 비행위치정보와의 최대오차(DO-DA)의 경우에도 급격히 줄어든 것을 볼 수 있다. 따라서 궤적데이터마이닝의 2차 회귀기법을 적용한 원격자료수신장비 안테나 위치추정알고리즘은 향후 한국형발사체 임무 및 유럽 위성발사체(VEGA, Soyuz)의 발사운용 지원 임무 에도 매우 유용하게 적용될 수 있다. 하지만 비행위치추정을 위해 입력되는 비행위치정보는 랜덤하게 발생하는 오류 성분(속도, 위치정보 등) 및 통신링크상의 시간지연이 길어질수록 더욱 더 크게 증가하므로, 향후 오류정

보가 될 수 있는 요소를 파악하고 그 종류 및 크기에 따라 추정오차의 정확도에 영향을 주는 정도를 파악해 보는 것은 향후 필요한 연구과제가 될 수 있다.

References

- [1] J.Y. Kang, "Trajectory Pattern Mining and Location Prediction Techniques for Moving Objects", Ewha Womans University, 2010. (*thesis for Ph.D.*)
- [2] Y.J. Jang, "Design and Implementation of a Moving Object Location Management System for LBS", Konkuk University, 2004. (*thesis for M.S.*)
- [3] Yue Song, Peng Cheng and Chundi Mu, "An Improved Trajectory Prediction Algorithm based on Trajectory Data Mining for Air Traffic Management", IEEE International Conference on Information and Automation, June 6-8, 2012, Shenyang, China, pp.981-986, IEEE Press. (*conference*)
- [4] R.H.Guting and M.Scheider, "Moving Objects Database", Morgan Kaufmann, 2005. (*book*)
- [5] J.G. Lee, "A Data Mining Tool for Massive Trajectory Data", Journal of KIISE, Vol.15, No.3, pp. 145-153, 2009. (*journal*)
- [6] Yang-Ji Lee, Duck-Young Kim, Min-Soon Hwang, and Young-Soo Cheong, "An event-driven intelligent failure analysis for marine diesel engines", Journal of the Korea Society Industrial Information System Society, Vol. 17, No. 4, pp. 71-85, 2012. (*journal*)
- [7] Min-Sung Hong and Nam-Hae Mok, "A method of determining the user's state of movement based on the smart device usage", Journal of the Korea Society Industrial Information System Society, Vol. 18, No. 6, pp. 51-59, 2013. (*journal*)

- [8] Byung-Hyun Moon, Young-Seok Jin, Jeong-Tak Ryu, "Implement of Vehicle Sensor System Using Wireless Communication and Mobile Device", Journal of the Korea Society Industrial Information System Society, Vol. 14, No. 2, pp. 71-85, 2009. (*journal*)
- [9] Lee, J.-G., Han, J., and Whang, K.-Y., "Trajectory Clustering: A Partition-and-Group Framework", 2007 ACM SIGMOD Int'l conference on management of data, June 11-14, 2007, Beijing, China, pp.593-604, ACM New York, NY, USA. (*conference*)
- [10] Wang Chao and Han Zhonghua, "Trajectory Clustering Method Research and Application", International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering(TMEE), Dec. 16-18, 2011, Changchun, China, IEEE Press. (*conference*)
- [11] W.Y. Jung and S.J. Cho, "A study on the starting point estimation of moving objects using the trajectory data mining", the conference of KIIE, Nov. 5, 2011, Seoul, Korea, pp.1220-1225, KIIE press. (*conference*)
- [12] J.M. Lee, "A study on Statistical Regression Analysis", Yonsei University, 2002. (*thesis for M.S.*)
- [13] S.H. Lee, C.Y. Oh and H.K Lee, "A study on the Design of Telemetry Ground System for Space Launch Application", Aerospace Engineering and Technology, Vol.2, No.2, pp.167-178, 2003. (*journal*)
- [14] Frank Carden, "Telemetry System Design", Artech House, 1995. (*book*)
- [15] S.H. Lee, S.I. Lee, S.H. Kwon, C.Y. Oh and H.K. Lee, "The technical trend of telemetry ground system for space launch application", Current Industrial and Technologic Trends in Aerospace, Vol.2, No.2, pp.109-119, 2004. (*journal*)
- [16] Telemetry Group, "Telemetry Application Handbook 119-88", Range Commanders Council, 1988. (*book*)
- [17] Chang-Yul Oh, "Analysis on the Radiowave Refraction to Improve the Tracking Accuracy for Space Launch Vehicle", Chungnam National University, 2011. (*thesis for Ph.D.*)
- [18] S.Y. Yun, Y.T.Choi, "Design of Algorithm Framework for Tracking Filter Implementation in Central Data Processing System(CDPS)", the conference of KSAS, Nov. 09-11, 2011, Yongpyong, Korea, pp. 1295-1300, KSAS press. (*conference*)



이 성 희 (Sunghee Lee)

- 정회원
- 홍익대학교 전자전기제어공학 공학사
- 제주대학교 경영정보학과 경영학 석사
- 아주대학교 우주전자정보공학과 박사과정
- 관심분야 : 안테나 및 전파전파, 데이터마이닝



김 두 경 (Doo-gyung Kim)

- 서강대학교 전자공학과 공학사
- 중앙대학교 전자공학과 공학석사
- 중앙대학교 전자공학과 공학박사
- 제주대학교 경상대학 경영정보학과 교수
- 관심분야 : 경영정보시스템, 전자상거래



김 근 형 (Keun-hyung Kim)

- 서강대학교 전자계산학과 공학사
- 서강대학교 전자계산학과 공학석사
- 서강대학교 컴퓨터공학과 공학박사
- 제주대학교 경상대학 경영정보학과 교수
- 관심분야 : 데이터베이스, 데이터마이닝