

공간 구조 기반 상호작용 다중 모델을 활용한 자유이동 객체들의 이동경로 예측에 관한 연구

김진우, 김규식, 이현석*

세종대학교

qouiuop@naver.com, kyusik@sju.ac.kr, *hyunsuk@sejong.ac.kr

A Study on Trajectory Prediction of Freely Moving Objects Using a Spatial-Structure-Based Interacting Multiple Model

Kim Jin-Woo, Kim Kyu-Sik, Lee Hyun-Suk*

Sejong Univ.

요약

본 논문에서는 자유이동 하는 디지털 객체의 이동경로를 예측하기 위해 공간 구조 기반 상호작용 다중 모델 알고리즘을 활용한 방법을 제안한다. 제안된 방법은 전체 공간을 다수의 분할된 공간으로 나누고 객체가 각 구간에 존재할 확률을 기반으로 다중 모델을 구성하며, 모델 간 전이 확률을 객체의 속도에 따라 가우시안 함수로 동적으로 조정한다. 이를 통해 상호작용 다중 모델에 객체의 불확실한 이동 특성을 효과적으로 반영할 수 있다. 마지막으로 시뮬레이션 실험을 통해 제안한 알고리즘이 자유이동 하는 디지털 트윈 객체의 경로를 효과적으로 예측할 수 있음을 보인다.

I. 서 론

최근 들어 자율주행 기술, 스마트 시티 구축 등과 같은 기술이 발전하고 공간 내 객체들의 실시간 이동 정보를 활용한 의사결정의 중요성이 커짐에 따라 디지털 트윈 객체들의 이동 경로를 예측하는 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 디지털 트윈이란 현실 세계에서 실존하는 것을 디지털 공간에 실물과 똑같은 쌍둥이를 만들고, 이를 활용하여 디지털 세계에서 모의실험 등을 통해 현실세계의 사고 등을 미리 예방하는 기술을 일컫는 말이다. 다수의 움직이는 디지털 트윈 객체들이 있을 때 객체들의 이동 경로를 예측하면, 이를 바탕으로 각 객체들의 위험도를 계산하거나 의사 결정을 하는 등 다방면으로 사용 가능하다.

디지털 트윈 객체의 이동경로를 예측하기 위한 기법은 크게 결정론적인 접근과 확률론적인 접근으로 구분된다. 결정론적 방법은 현재 상태를 기반으로 하나의 고정된 미래 경로를 산출하는데 중점을 두는 반면, 확률론적 방법은 미래의 불확실성을 반영하여 예측 가능한 다양한 이동 경로를 동시에 고려하는 방식이다. 인간과 같이 경로에 제약이 없고 이동 방향이 결정되어 있지 않은 객체의 움직임을 모사한 디지털 트윈을 자유 이동 디지털 트윈 객체라 하는데, 이 자유 이동 디지털 트윈 객체는 자유도가 높고, 불확실하게 이동하기 때문에 결정론적 접근으로는 정확한 이동 경로 예측에 한계가 존재한다. 반면, 확률론적 접근의 경우 여러 가능성을 동시에 고려하여, 미래 상태에 대한 불확실성을 반영하여 자유이동 디지털 트윈 객체의 이동 경로를 예측하기 때문에 결정론적 접근 대비 효과적이다.

대표적인 확률론적 접근 중 하나는 상호작용 다중 모델(Interacting Multiple Model, IMM) 알고리즘이다 [1]. IMM은 복수의 상태 추정 모델을 동시에 운용하고, 각 모델의 모델 확률을 동적으로 조정하여 객체의 상태를 예측 및 추정하는 기법으로, 항공기, 차량 등 동역학 특성이 명확한 이동체를 추적하기 위해 개발되었다.

이에 본 논문에서는 기존의 IMM으로 동역학 특성이 불명확한 자유이동 디지털 트윈 객체의 이동 경로를 보다 효과적으로 예측하기 위해, 공간 구

조 정보를 기반으로 구간별 존재 확률을 추정하는 다중 모델 구성 방식과, 객체의 속도에 따라 적응적으로 변화하는 모델 전이 확률을 통합한 IMM 알고리즘을 제안한다.

II. 배경

IMM 알고리즘은 각 모델에 대해 칼만 필터를 독립적으로 적용하는 방식으로 상태를 추정하므로, 본 논문에서는 IMM에 대한 논의를 시작하기에 앞서 칼만 필터의 기본 개념과 작동 원리를 먼저 설명하고자 한다.

II-1. 칼만 필터(Kalman Filter)

칼만 필터는 선형 상태 공간에서 단일 모델로 객체의 상태를 추정하는 필터링 기법이다. 본 필터는 예측과 개신이라는 두 단계로 구성되며, 예측 단계에서는 이전 상태와 상태 추정 모델을 바탕으로 미래 상태를 추정하고, 개신 단계에서는 관측값과 추정값 간의 차이를 이용하여 상태 추정값을 보정한다. 그러나 칼만 필터는 단일 모델만을 가정하고 있기 때문에, 객체의 동적 특성이 변화하거나 다양한 행동 모드가 존재하는 경우에는 예측 정확도가 급격히 저하되는 한계를 갖는다.

II-2. IMM 알고리즘

이러한 단일 모델 기반 접근의 한계를 극복하기 위해 제안된 것이 IMM 알고리즘이다. 일반적인 IMM은 복수의 상태 추정 모델을 동시에 운영하면서 각 모델에 대해 칼만 필터를 독립적으로 적용하고, 모델 간 전이 확률과 모델 확률을 바탕으로 객체의 상태를 추정하는 확률론적 알고리즘이다.

일반적인 IMM 알고리즘은 다음과 같은 네 단계로 구성된다. 첫째, 혼합 단계에서는 각 모델의 이전 상태 추정지, 공분산, 모델 확률 및 모델 전이 확률을 기반으로 현재 시점에서의 초기 상태를 혼합한다. 둘째, 필터링 단

계에서는 혼합된 상태를 입력으로 사용하여 각 모델별 칼만 필터를 독립적으로 적용하고, 관측값에 대한 우도를 계산한다. 세째, 모델 확률을 개선 단계에서는 필터링 단계에서 계산된 우도를 이용해 각 모델의 모델 확률을 개선한다. 넷째, 최종 예측 단계에서는 각 모델의 상태 추정값과 공분산을 개선된 모델 확률에 기반해 선형 결합하여 최종 추정 결과를 도출한다. IMM은 서로 다른 동적 특성을 가진 모델들과 모델 간 상호작용을 동시에 고려함으로써, 복잡하고 변화가 많은 객체에 대해 보다 정확한 상태 추정이 가능하도록 한다.

III. 공간구조 기반 IMM을 활용한 자유 이동 객체의 경로 예측

기존 IMM은 정지, 보행, 달리기 등 이산적으로 명확히 구분되는 행동 모드를 기반으로 모델을 정의하는 방식으로, 자동차나 항공기처럼 물리적 특성이 정형화된 동적 객체에 대해 효과적인 반면, 자유도가 높고 복잡하게 변화하는 자유이동 디지털 트윈 객체의 경우 이러한 이산적 행동 모드 기반 방식만으로는 이동 특성을 충분히 설명하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 자유이동 객체의 복잡성을 효과적으로 반영하고 실제 환경의 구조적 제약을 반영하기 위해, 공간을 여러 구간으로 나누고 각 구간에 객체가 존재할 확률을 추정하는 모델들로 다중 모델을 구성함으로써 보다 정밀한 공간 기반 상태 추정이 가능하도록 하였다.

또한 제안한 방식으로 모델을 정의하면 자유이동 객체의 현재 속도에 따라 모델 간 전이 확률이 동적으로 변하기 때문에 기존 IMM의 고정된 모델 간 전이 확률을 사용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 [2]의 접근법을 참고하여 모델 간 전이 확률을 고정된 값으로 사용하는 것이 아닌, 관측한 객체의 현재 속도에 따라 가우시안 기반으로 적응적으로 변하도록 설계하였다.

기존의 IMM 구조와 달리 적응적인 모델간 전이 확률을 적용한 IMM 알고리즘의 구조는 Fig. 1과 같다. 이와 같은 공간 구조에 기반한 모델 정의와 속도에 따라 동적으로 계산되는 전이 확률을 통해, IMM 알고리즘이 자유이동 하는 객체의 불확실한 이동 경로에 대한 추정 정확도를 향상시킬 수 있다.

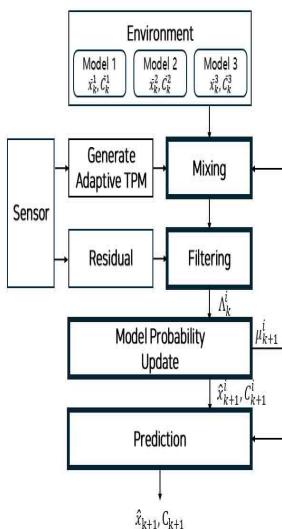


Fig. 1 제안한 IMM 알고리즘 구상도

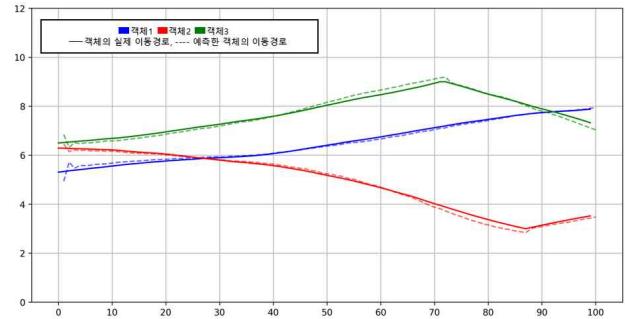


Fig. 2 IMM 예측 결과

IV. 실험

본 논문에서 제안한 방식이 자유이동 디지털 트윈 객체의 이동 경로를 효과적으로 예측할 수 있음을 검증하기 위해, 객체의 움직임을 시뮬레이션 할 수 있는 2D 게임 개발용 파이썬 라이브러리인 Pygame을 활용하였다. Pygame은 간단한 그래픽 구현 및 객체의 위치, 속도 제어 등을 용이하게 처리할 수 있는 오픈소스 도구로, 본 논문에서는 이를 이용해 1차원 선상에서 임의의 속도를 가지며 자유롭게 이동하는 객체들을 생성하고, 각 객체의 이동 경로를 예측하는 실험을 진행하였다.

제안한 IMM 알고리즘으로 객체들의 이동 경로를 예측한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 예측 초기에는 초기화 작업에 의해 예측 성능이 저하되었으나 그 이후에는 급변하는 속도에도 이동 경로를 잘 예측하는 것을 볼 수 있었다. 이 같은 결과로 앞서 제안한 IMM 알고리즘이 자유 이동하는 디지털 트윈 객체의 움직임을 효과적으로 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 정형화된 동적 객체의 이산적 행동 모드를 기반으로 구성된 기존의 IMM과 달리 자유 이동하는 디지털 트윈 객체의 연속적이고 복잡한 이동 특성을 반영하기 위해 공간을 나누고 각 구역에 존재할 확률로 다중 모델을 구성하였고, 이러한 모델들 사이 전이 확률을 객체의 속도에 따라 동적으로 변하도록 설계하였다. 이를 통해 자유이동 하는 디지털 트윈 객체의 이동경로를 효과적으로 예측할 수 있었으며, 향후 도시 공간 내 군중 예측이나 위험도 분석 등 다양한 응용 분야에 활용 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2022-II220545, 지능형 디지털 트윈 연합 객체 구성 및 데이터 프로세싱 기술 개발, 70%)과 정보통신기획평가원-대학 ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2021-II211816, 30%)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] DINGLER, Sebastian. State estimation with the Interacting Multiple Model (IMM) method. *arXiv preprint arXiv:2207.04875*, 2022.
- [2] XU, Can; ZHAO, Wanzhong; WANG, Chunyan. An integrated threat assessment algorithm for decision-making of autonomous driving vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 21.6: 2510-2521.