

Statecharts를 활용한 자율 주행 레벨 3 차량의 제어 로직 모델링 및 검증

Modeling and Validation of Control Logic of Automation Level 3 Vehicles Using Statecharts

허윤아

(건국대학교 컴퓨터공학과, 박사과정)

Key Words : Modeling, Validation, Statechart, Automotive Vehicle

목 차

- I. Introduction
- II. Statecharts
- III. Target System
- IV. Modeling and Validation Using Statecharts
- V. Conclusion

I. Introduction

차량의 자율 주행은 오래 전부터 논의되어 온 주제이며 [1], 자율 주행의 수준은 여섯 개의 레벨로 구분된다 [2]. 기존에 운전자가 모든 판단을 내리고 수동으로 조작해야 했던 일반 차량은 자동화 레벨 0에 해당한다. 이 경우 운전자가 모든 정보를 파악하여 단 시간 내에 올바른 판단을 내리기 어렵고, 이로 인해 발생할 수 있는 사고들이 많다는 통계 자료를 확인할 수 있다. 이러한 운전자의 판단 미숙으로 인한 사고의 발생을 줄이기 위해 자율 주행에 대한 개념이 도입되기 시작하였다.

현재 도로에 나와 있는 많은 차량에 탑재되고 있는 자동화 레벨 1의 경우, 운전자가 수행하던 기능을 보조하는 수준이다. 주로 Adaptive Cruise Control (ACC)와 같은 기능을 단일로 제공한다. 레벨 2의 자동화는 테슬라에서 현재 생산하는 차량에서 흔히 발견할 수 있는 자동화 수준이다. 일반적으로 Advance Driver Assistance Systems (ADAS)를 의미하며, 조향 (steering)과 가속 및 감속에 대한 제어가 가능하다. 단, 레벨 2 수준의 자동화까지는 운전자가 모든 상황을 모니터링해야 하며 원할 때면 언제든지 차량을 제어할 수 있기 때문에 자율 주행으로 바라보지 않는다.

자동화 레벨 3부터는 자율 주행으로 간주한다. 이 레벨에서는 차량에 탑재되는 소프트웨어가 자체적으로 환경 정보를 수집하여 대부분의 판단을 내리고 동작하며, 동작을 할 수 없는 경우를 대비하여 운전자가 항상 운전대 앞에 자리해야 한다. 레벨 4부터는 동작을 할 수 없거나 문제가 발생한 경우에

도 사람의 개입을 웬만하면 필요로 하지 않는다. 단, 사람이 완전히 부재할 수는 없다. 레벨 5의 경우 완전한 자동화로, 운전자가 운전대를 잡지 않아도 되고, 반드시 운전석에 앉아 있지 않아도 된다.

본 논문에서는 자율 주행의 시작점으로 간주할 수 있는 자동화 레벨 3의 차량에 대해서 Statecharts를 작성하여 해당 시스템의 제어 로직에 대한 모델링을 진행하고 검증까지 수행한다. 단, 이때 활용되는 대상 시스템은 실제 차량 시스템을 어느 정도 간략화한 모의 시스템이며, 특정 차량 모델 또는 제조사를 대상으로 하지 않는다.

본 논문의 이후 내용에 대한 구성은 다음과 같다. 먼저, 논문에서 활용하는 Statecharts에 대하여 설명하고, 이후 대상으로 하는 시스템의 요구사항과 설계를 제시한다. 다음으로 Statecharts를 활용하여 시스템을 모델링한 결과물과, 검증의 결과물을 제시하고, 평가한다. 마지막으로 논문의 내용을 정리하고 마친다.

II. Statecharts

Statecharts [3]는 시스템 외부와 내부의 자극에 반응하며 많은 경우에 event-driven으로 동작하는 리액티브 시스템 (reactive system)이 복잡한 구조를 가질 때 이를 시각적으로 확인할 수 있도록 formal하게 표기한 상태 머신 (state machine) [4]의 확장된 형태이다. 상태 머신과 동일하게 시스템의 상태를 state, 시스템의 동작을 transition으로 표현하며, 시스템은 한 번에 한 state에만 머무를 수 있다.

Statecharts는 상태 머신에서와 마찬가지로 initial state를 통해 시스템의 시작을 알린다. State를 표기하는 방법에는 두 가지가 있는데, 첫 번째는 단순히 이름만 붙여 시스템의 상태만 나타내는 방법이고, 두 번째는 첫 번째에 더하여 state에 들어올 때 (entry), 머무는 동안 (do), 그리고 state에서 나갈 때 (exit)의 동작 (activity)을 나타내는 방법이다. Transition은 상태 머신에서와 동일하게 event, guard, 그리고 action로 구성되며, event가 발생하면 guard의 조건이 만족되는지 확인하여 만족된다면 action을 수행하면서 이전 상태에서 다음 상태로 전이된다.

상태 머신에서와 달리 Statecharts에서는 하나의 state 내부에 여러 개의 substate가 존재할 수 있으며, 이를 통해 계층 구조를 나타낸다. 한 번에 한 substate에만 시스템이 머무를 수 있기 때문에 Composite state라고 부르며, OR state라고도 한다.

Orthogonality의 경우 서로 다른 시스템 컴포넌트 간에 영향을 주지 않는 것, 즉 시스템 컴포넌트의 동시 실행 (concurrency)을 의미한다. 이를 나타내기 위해서 점선을 통해 state 내부를 두 개 이상의 region으로 나누어 state 내부의 substate들 간에 서로 영향을 주지 않음을 나타낸다. 나뉘어진 각 칸마다 한 번에 하나의 substate에만 머무를 수 있기 때문에 이를 Orthogonal state라고 부르며, AND state라고도 한다.

이 외에도 history state라는 개념을 통해 이전에 머무르던 state로 돌아갈 수 있도록 하기도 하며, condition state라는 개념을 통해 여러 transition의 event가 중복되는 경우 이를 간략하게 나타내기도 한다.

상태 머신을 시스템의 검증 (validation)에 활용할 수 있으므로, 상태 머신의 확장된 형태인 Statecharts 또한 검증에 활용할 수 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 Statecharts를 활용하여 시스템의 제어 로직을 모델링하고 이를 검증한다.

III. Target System

해당 시스템에서 분석의 대상이 되는 시스템은 앞서 서론에서도 언급했던 것처럼 간략화된 자동화 레벨 3의 자율 주행 차량이다. 차량의 자동화 레벨은 SAE (Society of Automotive Engineers)에서 정의한 내용 [2]을 따랐으며, 대상이 되는 시스템은 다음과 같은 요구사항을 따라 모델링 된다.

- SAE에서 정의하는 기본적인 Dynamic Driving Task (DDT)를 수행한다. DDT의 목록은 다음과 같다.
 - 스티어링 (steering)을 통한 횡방향 차량 움직임 제어
 - 가속 및 감속을 통한 종방향 차량 움직임 제어
 - 주행 환경 모니터링
 - 주행 환경에 대한 응답
 - 기동 (maneuver) 계획
 - 조명, 경적 소리, 제스처 등을 통해 눈에 띄는 기능 (conspicuity)을 강화

- Operational Design Domain (ODD) 제한 내에서는 차량이 자체적으로 판단을 내려 동작하고, 제한을 넘어서는 경우에는 운전자에게 차량의 제어를 요청한다. 본 연구에서 ODD는 다음과 같이 제한한다.
 - 고속도로와 일반 도로 환경으로 제한한다. 비포장 도로나 차선이 없는 환경 등은 고려하지 않는다.
 - 날씨가 꺾어서 센서로 차선을 감지할 수 없거나 도로에 문제가 발생하는 경우는 고려하지 않는다.
 - 도로 상에서의 주행만 고려하며, 주차 상황은 고려하지 않는다.
- 시스템에 문제가 발생하여 제어가 불가능한 경우 운전자에게 차량의 제어를 요청한다.
- 운전자가 요청하는 경우, 즉시 자율 주행을 해제하고 운전자에게 권한을 넘긴다.

IV. Modeling and Validation Using Statecharts

1. Modeling

Itemis Create (기존 Yakindu Statechart Tools) [5]를 통해서 분석 대상 시스템에 대한 모델링을 수행한다. Interface는 외부에서 보이는 entity로 본 시스템에서는 엔진, 운전자, Automated Driving System (ADS)의 세 가지 interface로 구성하였다. 엔진 interface는 엔진의 on/off를 event로 가지며, 운전자 interface는 가속/감속 및 방향 제어, 자율 주행 요청 등을 할 수 있다. ADS interface는 운전자 interface와 거의 동일한 동작을 하며, 각종 환경에 대한 값을 input으로 받는다.

State는 기본적으로 엔진이 꺼진 상태에서 시작하며, 운전자가 시동을 걸면 엔진이 켜진 상태로 전이된다. 엔진이 켜진 상태에서도 ADS가 동작 중인 상태와 그렇지 않은 상태로 구분하여, 기본적으로 처음 시동을 걸어 엔진이 켜진 후에는 운전자가 차량을 제어하는 상태에서 시작한다. 운전자의 차량 제어는 본 연구에서 관심을 가지는 대상이 아니므로 모델링하지 않는다. ADS가 차량을 제어하는 상태에서는 외부 환경 정보의 변화를 토대로 스티어링과 가속 및 감속을 통해 차량의 움직임을 제어한다. 이 외에도 차량의 좌우 방향 지시등과 제동 시에 점등되는 제동등을 제어한다. 생성된 모델은 <그림 1>과 같다.

2. Validation

Statecharts를 통해 모델링을 하고 나면, 생성한 모델에 대한 시뮬레이션을 통해 제어 로직을 검증할 수 있다. 예를 들어, 차량의 감속 시에 제동등이 켜고 꺼지는지 확인할 수 있고, 차선 변경을 원하는 경우에 좌우 방향 지시등이 점등되는지를 확인할 수 있다. 차선 변경에 5초가 걸린다고 하면, 5초 이후에 좌우 방향 지시등이 소등되면서 차선 안에서 좌우 여유 폭을 계산해 가면서 움직이는지를 확인할 수 있다.

3. Evaluation

대상 시스템의 제어 로직이 간략화 되어 있기 때문에 다양한 기능이나 상황에 대하여 검증을 진행할 수는 없었으나, 변화하는 환경에 대응하여 동작하는 자율 주행 차량에 대한 모델을 생성하고 이를 검증할 수 있었다. 추후 다양한 상황의 발생을 고려하여 모델을 수정한다면 좀 더 현실에서 운용 가능한 수준에 가까운 모델을 만들 수 있을 것이다.

ware], <https://www.itemis.com/en/products/itemis-create/>, 2023.

V. Conclusion

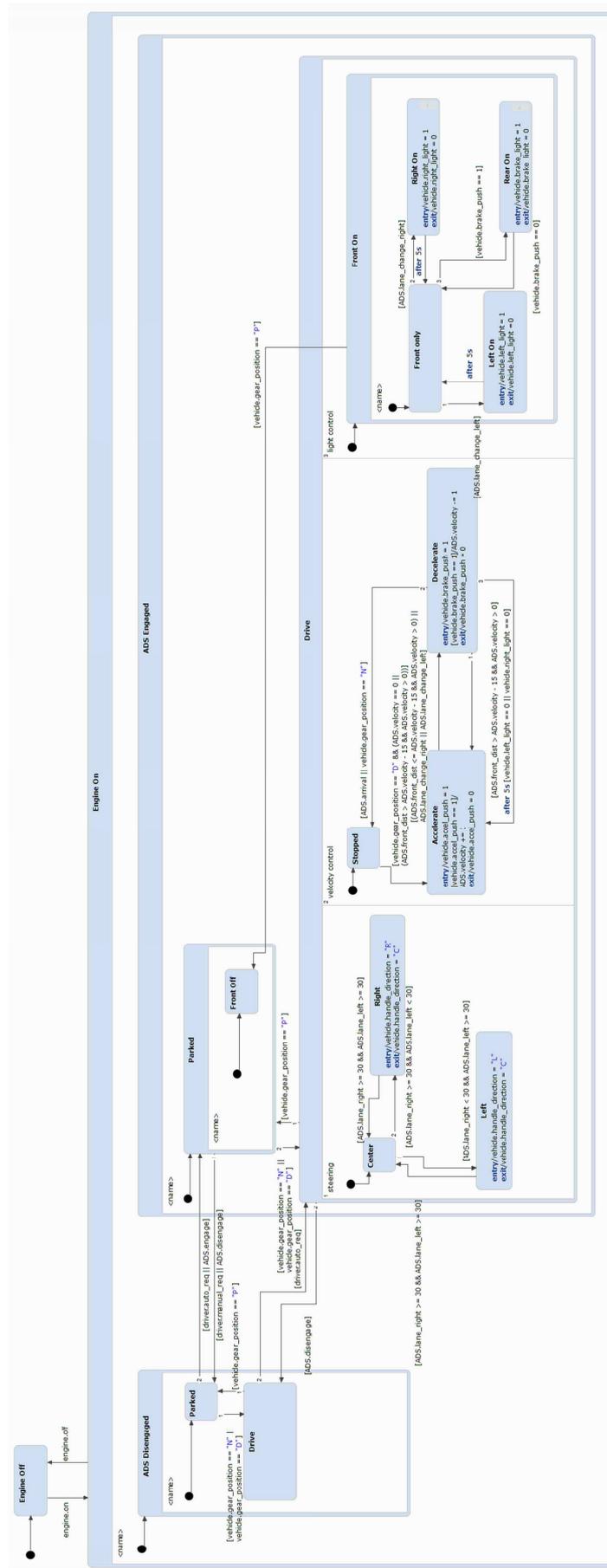
간략화된 자율 주행 레벨 3 차량에 대해서, 본 연구에서는 Statecharts를 통해 대상 시스템의 제어 로직에 대하여 모델링하고 검증을 진행하였다. 기본적으로 자동화 레벨 0인 차량에서 운전자가 수행하던 DDT를 차량이 수행하도록 하였으며, 고속도로와 일반 도로 주행 상황에서 모든 센서가 정상적으로 동작한다는 전제 하에 모델링을 진행하였다. 다양한 상황에 대해 고려하지 못했고, 연구의 초기 단계이기 때문에 많은 연구를 진행하지는 못하였으나, 추후 모델의 보완을 통하여 심도 있는 연구가 가능할 것으로 기대된다.

서사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT혁신인재 4.0사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2023-2020-0-01834)

참고문헌

1. A. Faisal et al., "Understanding Autonomous Vehicles: A Systematic Literature Review on Capability, Impact, Planning and Policy," *Journal of Transport and Land Use*, vol. 12, no. 1, 2019, pp. 45 - 72.
2. SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles," J3016 Revision April 2021, 2021.
3. D. Harel, "Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems," *Science of Computer Programming*, vol. 8, no. 3, 1987, pp. 231-274.
4. M. Ben-Ari, F. Mondada, "Finite State Machines," In: *Elements of Robotics*, Springer, 2018, pp. 55-61.
5. Itemis, "Itemis CREATE (version 5.1.1)," [Computer Soft



<그림 1> 자율 주행 레벨 3 차량에 대한 Statecharts 다이어그램