

시간 및 가속도 정보를 이용한 열차 위치 추정 정확성 향상 방안

김 정 태[◦]

Method for the Accuracy Improvement of the Train Localization Using Time and Acceleration Information

Jungtai Kim[◦]

요 약

열차제어시스템에서 열차의 위치를 정확하게 추정하는 것은 열차를 제어하는데 필수적이다. 열차 이동 중에는 타코미터로 측정된 열차의 속도에 시간을 곱하여 이동거리를 계산하는데 이 때 속도 정보를 받는 시간과 이동 거리를 계산하는 시간에 시간차가 존재하며 이 시간차도 균일하지 않아 실제 이동 거리와 계산한 이동 거리 간에 오차가 발생하게 되며 이는 결국 정확하지 않은 위치 추정 결과를 초래한다. 본 연구에서는 속도 수신과 이동 거리 계산 프로세스가 실행되는 시점간의 시간차 정보와 함께 이전 속도로 추정한 열차 가속도를 이용하여 계산 프로세스 중간 시점에서의 속도를 추정하고 이를 바탕으로 이동 거리를 계산하는 방법을 제안한다. 등속 운동과 등감속 운동에 대한 시뮬레이션과 시험선에서 실제 열차에 탑재하여 시험을 수행함으로써 제안하는 방법의 효과와 우수성을 보인다.

Key Words : Train Displacement, Speed estimation, Train control, Timestamp, Localization

ABSTRACT

It is necessary to localize train accurately for the train control in the train control system. In the train movement, the displacement is calculated by multiplying time by the train speed measured by tachometer. In this process, there exists the time difference between the reception of speed information and the calculation of the displacement. Moreover, this time difference (deviation) is not uniform. Hence, error in the calculated displacement occur and this results in inaccurate localization. In this study, we propose a displacement calculation method with the estimated speed at the half-time point using the time difference information and the estimated train acceleration. Computer simulation for the constant speed movement and constant deceleration movement is performed, and the real track test where both conventional and proposed method are executed in the real train is performed as well. The simulation and the real test show the effectiveness and the superiority of the proposed method.

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

◦ First Author and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0085-7261)Korea Railroad Research Institute, jtkim@krii.re.kr, 정회원
논문번호 : KICS2017-12-388, Received December 18, 2017; Revised March 6, 2018; Accepted March 7, 2018

I. 서 론

열차제어시스템은 열차 간 간격을 제어하고 열차의 진로를 결정하는 시스템이다^[1]. 간격을 알맞게 제어하기 위해서는 열차의 위치를 정확히 추정하는 것이 중요하다. 특히 도시철도에서는 스크린도어와의 간섭 방지를 위해 정위치 정차가 필수적이며 이를 위해서는 정차제어 알고리즘과 함께 정확한 위치 검지가 필수적이다. 열차에서는 자신의 위치를 차륜의 회전을 측정하는 타코미터를 통해 얻은 속도에 경과 시간을 곱하여 추정한다. 그리고 주행 중에 발리스^[2]나 PSM(Precision Stop Marker)^[3]과 같이 절대 위치 정보를 갖고 있는 장치를 지나게 되면 통신을 통해 그 정보를 받아 위치 추정값을 보정하게 된다. 그러나 발리스나 PSM의 중간 지점에서는 오직 타코미터를 통하여 받은 속도만으로 위치를 추정하게 되며 여기에는 다음과 같은 오차의 요인이 존재한다. 먼저 타코미터의 양자화 값에 따른 오차가 있다. 즉 타코미터를 이용한 속도 추정에는 주어진 시간 동안 회전한 펄스의 수를 세는 M 방식이 있고 펄스 간 클럭의 수를 세는 T 방식이 있으며 이를 보완한 M/T 방식이 있다^[4]. 그러나 이들 모두 이산화 값(펄스 수 또는 클럭 수)으로 측정하므로 실제 회전수와는 오차가 발생할 수 있다. 다음은 차륜경 측정값 오차에 의한 오차이다. 측정 오차 또는 차륜의 마모 등으로 차륜경의 실제값과 속도 계산에 사용하는 값에는 차이가 발생하게 되며 이는 결국 실제 속도와 추정 속도 간 차이를 만들게 된다. 셋째로 속도 측정 시간과 이동거리 계산 시간과의 불일치에 의한 오차가 있다. 타코미터로 측정된 차륜 회전속도는 여러 장치를 거쳐 열차 속도로 변환되어 열차자동운행장치(ATO: Automatic Train Operation)로 전달된다. ATO는 이 속도 정보와 이전 이동거리 계산 프로세스 실행 시점부터의 경과시간을 곱하여 이동 거리를 계산하게 된다. 이렇게 정보의 생성과 전달이 각기 다른 장치에서 이루어지므로 동기화가 어려우며 이에 따라 정보 전송에 시간이 소요되고 그 시간 또한 일정하지 않게 된다. 이러한 시간차는 실제 속도와 측정된 속도 간의 오차를 발생시키며 이는 결국 위치 추정 오차로 이어진다. 이외에도 차륜의 슬립, 곡선구간에서 차륜 간 회전정보의 불일치 등에 의한 오차가 있다.

다양한 오차의 원인 중 세 번째 시간 불일치에 의한 오차는 기계적인 요소 없이 전자 및 통신 요소에 의해 발생하는 오차이며 따라서 여러 가지 신호처리 기법으로 완화시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 방

법으로 이동거리 계산 오차를 줄이는 방법에 대하여 기술한다. 이를 위한 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 본론의 1절에서 기존의 위치 추정 방법에 대하여 기술하고 2절에서 제안하는 위치 추정 방법을 기술한다. 3절에서는 여러 가지 열차 이동 상황에서 시물레이션을 통해 기존 방법과 제안하는 방법의 계산 결과를 비교한다. 4절에서는 실제 시스템에 적용한 결과를 기술한다. 기존 방법과 제안하는 방법에 대하여 각각 시물레이션을 수행하고 실제 시스템에도 적용한 후 그 결과를 비교함으로써 제안하는 방법의 효과와 우수성을 보인다.

II. 본 론

2.1 기존 위치 추정 방법

위치 추정 방법에 대하여 기술하기 전에 먼저 대상 열차 시스템에서의 각 장치의 구성과 위치 추정을 위한 각 장치의 역할에 대하여 설명한다. 그림 1은 열차 제어시스템의 구성과 열차 제어 및 열차 위치 추정과 관련된 정보 전달의 과정을 나타낸 것이다. 먼저 타코미터는 차륜의 회전량을 측정하여 그 정보를 TCMS(Train Control and Monitoring System)로 전달한다. TCMS는 이 정보와 차륜값을 가지고 열차의 속도를 추정한 후 열차자동운행장치(ATO: Automatic Train Operation)로 전달한다. ATO는 이 속도 정보와 경과시간을 곱하여 이동 거리를 계산한다. 이 때, 이전 속도를 사용하는 방법, 최종 속도를 사용하는 방법, 이전 속도와 최종 속도의 평균값을 사용하는 방법이 있으나^[5] 일반적으로 속도 측정에서 계산 프로세스까지의 정보전달 지연시간을 고려하여 최종 속도를 사용하는 방법을 사용한다. ATO는 이렇게 추정된 열차 위치와 ATC에서 받은 제한 속도 정보를 가지고 가속

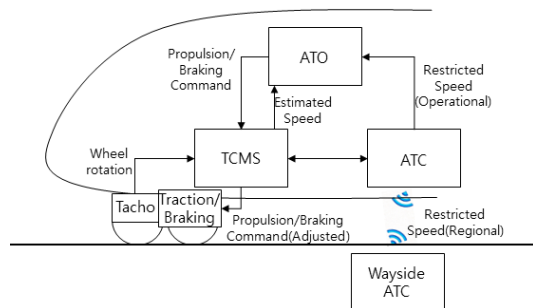


그림 1. 열차제어시스템의 구성과 열차 위치 추정 및 열차 제어와 관련된 정보 전달
Fig. 1. Essential parts of the train control system and composition for the train localization and train control

또는 제동 명령을 발행한다.

예전의 마이컴 방식의 ATO^[6]와는 달리 근래의 ATO에서는 실시간운영체제를 탑재하고^[7,8] 위치 계산 프로세스를 주기적으로 실행시켜 위치 추정을 수행한다. 또한 각 장치와의 통신도 별도의 프로세스에서 수행된다. 이 때 통신 프로세스의 경우 일정한 주기로 실행되도록 설계는 되어 있으나 각 장치의 소프트웨어 실행 상태 혹은 장치 간 통신 선로 상태에 따라 그 주기의 변동이 발생하게 된다. 이상적인 경우는 계산 프로세스의 각 실행 주기의 중간 시점에서 통신 프로세스가 실행되어 이때의 속도를 가지고 위치를 추정하는 것이지만, 실제로는 위와 같은 원인으로 인하여

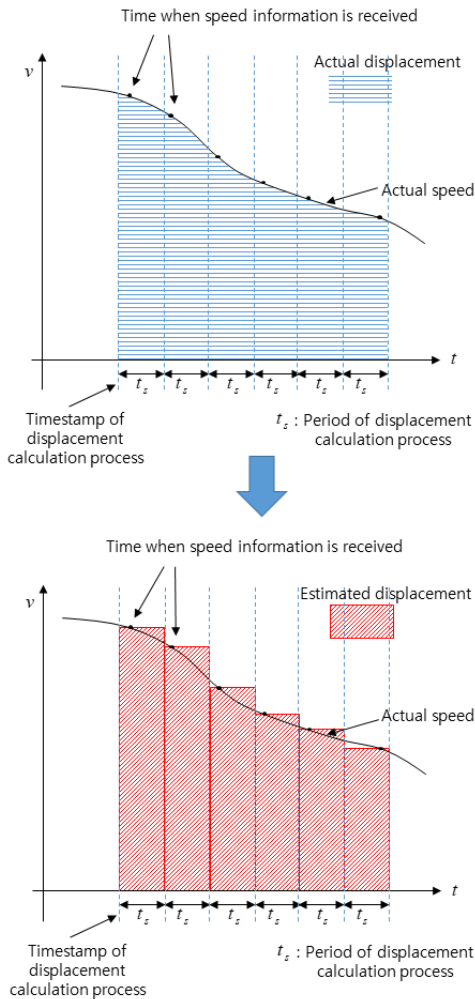


그림 2. 열차의 실제 속도 및 이동 거리와 속도 수신 시간 편이에 의한 계산상 이동거리 추정값의 오차 발생 과정
Fig. 2. Actual train speed and displacement, and the process of error occurrence in the estimated displacement due to the reception time deviation of train speed

속도 측정 시각과 위치 계산 시각 사이의 시간적 간격이 일정하지 않으며 편이 또한 발생하게 된다. 따라서 기존의 방법으로 위치를 계산하게 되면 그 결과는 그림 2와 같이 오차가 발생한다.

2.2 제안 위치 추정 방법

앞에서 기술한 바와 같이 거리계산 시점과 속도정보를 받는 시점과의 차이가 일정하지 않으므로 이동 거리 계산 시 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 속도 수신 시각과 이동 거리 계산 프로세스가 실행되는 시각을 이용하여 특정 시점에서의 속도정보를 추정하여 이 정보를 가지고 거리계산을 수행하는 것이다. 특정 시점은 이전 계산 프로세스와 현재 계산 프로세스의 중간 지점이다. 이를 통해 보다 실제 이동 거리에 가깝게 추정을 수행할 수 있다. 그림 3은 이동 거리 계산을 위한 각각의 정보와 그 계산 과정을 나타낸다.

먼저 TCMS에서 주기적으로 속도 정보를 받게 되는데 현재 이동 거리 계산프로세스를 기준으로 직전에 받았을 때의 시각과 속도를 (t_{m1}, v_1) 라 하고 그 이전에 받았을 때의 시각과 속도를 (t_{m0}, v_0) 라 하자. 그러면 두 속도 수신 시간 동안의 평균 가속도 계산값 a_{est} (estimated acceleration)는 다음과 같이 표현된다.

$$a_{est} = \frac{v_1 - v_0}{t_{m1} - t_{m0}} \quad (1)$$

이 때 가속도 계산 시 $t_{m1} - t_{m0}$ 가 작은 경우에는

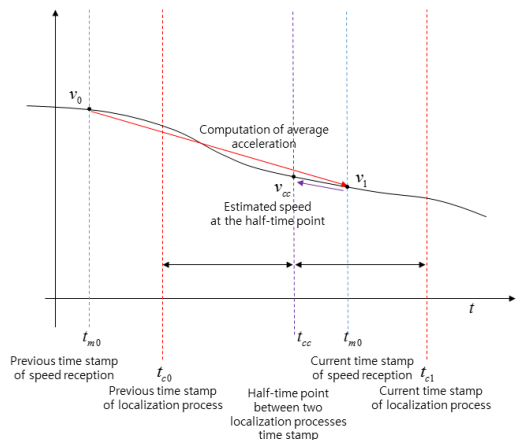


그림 3. 이동 거리 계산을 위한 시간 정보와 이동 거리 계산 과정
Fig. 3. Time information for the displacement calculation and process of the displacement calculation

속도 측정 오차가 조금만 나더라도 가속도 오차는 크게 발생할 수 있다. 이 경우 가속도 추정값의 상한, 하한을 설정함으로써 오차가 커지는 것을 방지할 수 있다. 즉,

$$a_{est} = \min(a_{est}, a_{max}) \quad (2)$$

$$a_{est} = \max(a_{est}, a_{min}) \quad (3)$$

가 되도록 하며 여기서 a_{max} , a_{min} 은 각각 해당 전동차의 최대 가속도, 감속도이다. 또한 만약 이동 중에 본 알고리즘을 적용하는 등의 이유로 인하여 이전 속도 v_0 정보가 없을 경우 a_{est} 는 0으로 가정한다.

다음에는 속도 추정을 수행해야하는데 이전 계산 프로세스가 실행된 시각을 t_{c0} 라 하고 현재 계산 프로세스가 실행된 시각을 t_{c1} 이라 하며 이 두 시각의 중간점(t_{cx} : center time of calculation process)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_{cx} = \frac{t_{c1} + t_{c0}}{2} \quad (4)$$

본 논문에서 제안하는 방법에서는 이 중간점 t_{cx} 에서의 열차 속도를 추정하고 이를 가지고 거리를 계산함으로써 거리 추정 오차를 줄이는 것이다. 중간점 t_{cx} 에서의 열차 속도를 추정하기 위해 먼저 직전 수신 시각과 중간점과의 시간차 t_{md} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_{md} = t_{m1} - t_{cx} \quad (5)$$

따라서 중간점에서의 속도 v_{cx} 는 앞에서 추정된 가속도 값 a_{avg} 과 시간차 t_{md} 를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{cx} = v_1 - a_{est} \cdot t_{md} \quad (6)$$

따라서 이동 거리 계산(추정)값 d_{est} 는 다음과 같이 표현된다.

$$d_{est} = v_{cx} \times (t_{c1} - t_{c0}). \quad (7)$$

그림 4는 제안한 방식으로 이동 거리를 계산하는 것을 나타내었다. 매 위치계산 프로세스 마다 추정된

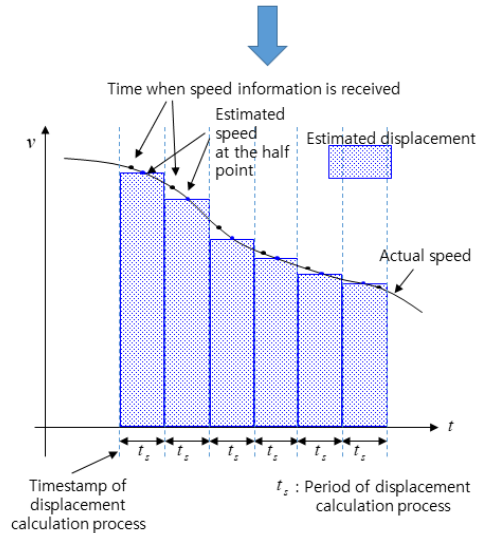
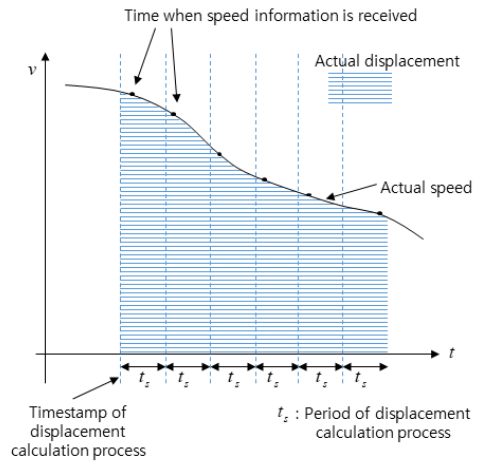


그림 4. 열차의 실제 속도 및 이동거리와 제안하는 동거리 계산 방법
Fig. 4. Actual train speed and displacement, and the proposed displacement calculation method

중간 속도를 가지고 이동 거리를 계산하므로 계산 이동 거리와 실제 이동 거리와의 차이를 줄일 수 있다. 그림에서 A영역과 B영역의 크기 차이가 이전 방식보다 작아지게 된다.

2.3 시뮬레이션

이 절에서는 열차가 등속으로 주행할 때와 감속할 때 두 가지의 경우에 대하여 기존 방법과 제안 방법 각각을 수행하여 위치를 추정하고 그 결과를 기술한다. 먼저 열차가 20m/s로 등속 주행할 경우에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 주행 시 제한 속도가 걸리면 열차는 마진을 고려하여 그 아래에서 정속 주행을 한다. 이 때 에너지와 승차감을 고려하여 가속과 타행을

변갈아 가며 수행한다. 이 때 저크(가속도의 변화율)의 제한으로 인하여 가속도 및 속도의 변화가 부드럽게 되며 이는 정현파 모양의 속도로 나타난다. 여기에서는 $\pm 1\text{m/s}$ 진폭의 정현파로 열차가 주행한다고 가정하였다. 주기는 5초로 가정하였다. 또한 속도 측정 오차와 속도 측정 프로세스 실행 시각의 시간적 분포는 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. 이 밖에 이동 거리 계산 프로세스와 속도 전송을 위한 통신 프로세스의 실행 주기 및 실행 시간 간격의 차이 등 시스템 특성은 대상 노선(서울 도시철도 5호선)의 열차를 참고로 하여 측정 및 계산하였으며 표 1에 정리하였다.

그림 5는 기존 방법과 제안 방법으로 수행한 이동 거리 계산 결과의 분포를 나타낸 것이다. 총 1,000,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 시뮬레이션에 사용한 열차 및 프로세스(계산, 통신) 관련 파라미터

Table 1. Parameters regarding to the train and processes (calculation, communication used in the simulation)

Parameter	Symbol	Value
Period of displacement calculation process	t_s	50ms
Mean of time deviation of communication process (speed reception) from the calculation process	M_{dt_m}	15ms
Standard deviation of invoke time of communication process	σ_{dt_m}	15ms
Mean speed measurement error	M_{e_v}	0km/h
Standard deviation of speed measurement error	σ_{e_v}	0.02km/h

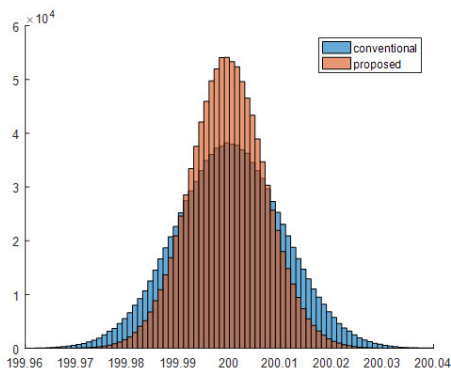


그림 5. 기존 방법과 제안하는 방법을 사용하여 계산한 열차 이동거리 분포 (열차 속도가 정현파 형태로 변할 경우)
Fig. 5. Distributions of displacement calculation using conventional method and proposed method (Sinusoidal train speed variation)

평균 속도 20m/s로 10초 운행을 하였으므로 정확한 이동 거리는 200m이며 제안한 방법의 추정 값이 200m 가까운 곳에서 많이 분포하는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 10m/s에서 등감속도로 정지하는 열차에 대한 이동 거리 계산 결과를 나타낸 것이다. 등속 주행과는 달리 두 경우 모두 편이가 발생하나 특히 기존 방법에서의 편이가 더 크다. 이는 속도 측정 시간과 이동 거리 계산 시간과의 차이가 있으며 감속 시에는 실제보다 더 큰 속도로 이동 거리를 계산하기 때문이다. 제안 방법의 경우에도 이 편이가 있으나 1/10로 줄었으며 편차도 약 15% 감소되었다. 제안 방법에서의 편이는 가감속 추정값에 제한을 둔 것에 기인한다.

표 2는 기존 방법과 제안 방법으로 수행한 결과의 통계적 분석값을 나타낸 것이다. 등속 주행, 감속 주행 모두 제안 방법이 우수함을 확인할 수 있다.

표 2. 기존 방법과 제안하는 방법으로 열차 이동거리 계산 수행한 결과에 대한 통계적 분석

Table 2. Statistical analysis of displacement calculation results using conventional method and proposed method

	Constant speed movement		Constant deceleration movement	
	Conventional method	Proposed method	Conventional method	Proposed method
Mean	200.0001	199.9997	100.1099	100.0096
Standard Dev.	0.0105	0.0075	0.0093	0.0080
Maximum	200.0595	200.0418	100.1444	100.0512
Minimum	199.9479	199.9515	100.0542	99.9729

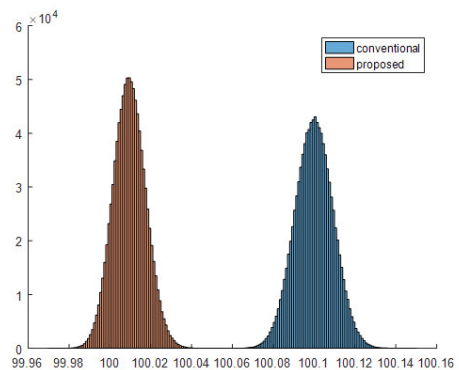


그림 6. 기존 방법과 제안하는 방법을 사용하여 계산한 열차 이동거리 분포 (등감속도로 열차가 이동 후 정지하는 경우)
Fig. 6. Distributions of displacement calculation using conventional method and proposed method (Constant deceleration train movement)

2.4 차량탐재 시험

이 절에서는 제어를 실제 차량에 탑재하고 기존 방법과 제안 방법 각각을 적용하여 시험한 결과를 기술한다. 서울시철도 5호선 열차에 탑재하였으며 방화차량기지의 시험선로에서 시험을 수행하였다. 그림 7의 (a)와 (b)는 각각 방화차량기지 시험선의 항공사진과 PSM 배치도를 나타낸다. 그림 7의 (b)에서는 설계상 PSM 위치가 아닌 실제 측정 후 위치를 나타내어 정확한 비교가 될 수 있도록 하였다. PSM을 지날 때 열차는 절대 위치 정보를 알게 되며 이를 통해 위치 계산값과의 오차를 확인하고 보정할 수 있다. 여기에서는 출발 후 PSM3를 지날 때 이동 거리 계산 값을 비교하고 다음 이를 보정한 후 PSM2를 지날 때의 이동 거리 계산 값을 비교한다. 전자는 가속 및 등속 구간에서의 위치 추정 정확도를 확인할 수 있고 후자는 감속 구간에서의 위치 추정 정확도를 확인할 수 있다.

표 3은 각각 가속 및 등속 구간과 감속 구간에서의 차량 탐재 실험 결과와 분석 내용을 정리한 것이다. 여기서 이동 거리 계산값은 실제 계산된 값에 차륜경 오차를 고려하여 보정한 것이다. 시험 대상 차량의 경우 정차 성능 보안을 위해 실제 보다 5mm 작은 값으로 차륜 속도가 설정되어 있었으며 이는 약 6%정도 속도와 이동거리가 적게 나오게 하므로 이를 보정하여야 한다. 기존 방법을 사용한 시험 중 4번째 시행에

표 3. 실제 차량 탐재 시험 결과 및 분석(단위: m)
Table 3. Results and analysis of real track test(unit: m)

Trial and Analysis	Acceleration + Constant speed		Deceleration	
	Conventional	Proposed	Conventional	Proposed
1st trial	317.01	317.53	88.36	88.08
2nd trial	319.08	317.60	88.04	88.09
3rd trial	318.92	317.67	88.09	88.12
4th trial	317.30	317.59	-	88.17
5th trial	317.37	317.00	88.27	87.97
6th trial	317.32	317.17	88.09	88.09
Mean	317.833	317.427	88.172	88.087
Error Mean	-0.367	-0.773	0.672	0.587
Std. Dev.	0.914	0.274	0.138	0.066

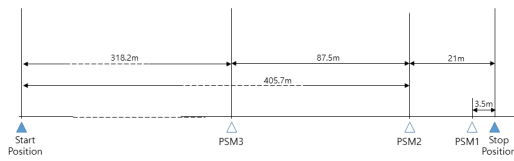
서는 감속도 구간에서 PSM2 검지가 되지 않아서 이를 제외하고 나머지 데이터를 가지고 분석을 수행하였다. 평균(오차의 평균)의 경우 기존 방법과 제안하는 방법 모두 실제보다 적은 값으로 이동거리를 계산하게 되는데 이는 차륜경 및 속도 측정값에 추가적인 오차 성분이 있기 때문이라 사료된다. 실제 차량에 오차 측정을 위한 추가 장치를 부착하는 것이 어려운 관계로 표준편차 비교를 통해 정확성을 판별하고자 하는데 표준편차의 경우 제안하는 방법에서 기존 방법보다 50~70%가 감소된다. 이는 위치 계산을 수행하는 기준 속도의 지점을 일정하게 함으로써 보다 정확한 속도 및 위치 추정을 가능하게 하기 때문이다.

III. 결론

열차 차상에서 위치 추정의 정확성을 높이기 위해 속도 수신 정보와 함께 속도 수신 시간, 이동 거리 계산 프로세스의 실행 시각을 이용하는 방법을 제안하였다. 열차의 가속도 변화가 크지 않다는 점을 이용하여 이동 거리 계산 프로세스 실행 중간 지점에서의 속도값을 추정하고 이에 대한 이동 거리를 계산한다. 등속도로 이동하는 상황과 등감속도로 이동하는 상황에 대하여 시뮬레이션과 실제 열차 탐재 시험을 수행하였다. 여러 번의 시행에 대한 통계적 분석을 통하여 제안하는 방법이 보다 더 안정적인 결과를 도출하는 것을 보였다. 실제 시험에 있어서 차륜경 입력값 및 속도 오차 등으로 기존 방법과 제안 방법의 정확성에 대한 비교는 수행하지 못하였는데 추후 면밀한 측정



(a)



(b)

그림 7. (a)시험선(방화차량기지) 항공사진 (b) 시험선에서의 PSM 위치
Fig. 7. (a) Sky view of test track (Banghwa maintenance depot) (b) Location of PSMs in the test track

과 비교를 통해 보완할 계획이다.

References

- [1] S. H. Hong, "The recent trends and prospects of the train control system," *Mag. IEIE*, vol. 34. no. 11, pp. 18-28, 2007.
- [2] Balise, Retrieved on Nov. 23, 2017, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Balise>.
- [3] J. H. Kim and R. T. Kang, "A study for automatic train speed regulation algorithm of ATO," in *Proc. 1998 the Korean Soc. for Railway Autumn Conf.*, Seoul, pp. 210-218, Nov. 1998.
- [4] H. Wang and J. Pu, "An improved variable M/T method based on speed estimation for optical incremental encoders," in *Proc. 2012 3rd IEMI2012*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [5] D. Levy, *Introduction to Numerical Analysis*, Department of Mathematics and Center for Scientific Computation and Mathematical Modeling (CSCAMM) University of Maryland, pp. 97-117, 2010.
- [6] Seoul metropolitan rapid transit co., *Maintenance Manual of Electric Rail Cars for Seoul Subway Line5 (242 CARS)*, vol. 7, chap. 13-16, 1996.
- [7] J. K. Kim, et. al., *Final report of the research project for the standardization of metro signalling system*, Korea Railroad Research Institute, pp. 1-183, 2008.
- [8] J. Kim, et. al., *Final report of the research project: development of a renovated and modularized automatic train operator considering backward compatibility*, Korea Railroad Research Institute, pp. 90-111, 2016.

김 정 태 (Jungtai Kim)



1997년 2월 : 서울대학교 전기공학부 졸업

1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사

2011년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 박사

2012년 8월~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야> 열차제어, 신호처리, 임베디드 시스템