



대학 캠퍼스용 로봇차량의 자율주행을 위한 실험환경 구축

Experimental Setup for Autonomous Navigation of Robotic Vehicle for University Campus

조성택 · 박영준 · 정 슬[†]

Sung Taek Cho, Young Jun Park, and Seul Jung[†]

*충남대학교 메카트로닉스공학과

[†]Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

요 약

본 논문은 대학 캠퍼스를 주행하는 차량의 자율주행을 위한 실험환경 구축에 대해 논한다. 이 차량은 대학이나 공원과 같은 특별한 장소에서 사용되고 근거리를 이동하기 위해 2인이 탑승한다. 정문에서 본부까지 자율주행을 수행하기 위한 실험 환경을 구축한다. 초기 단계로 카메라로 바닥의 색깔을 구별하여 선을 검출한다. 빨간색과 노란색의 경계선을 검출하여 로봇차량이 추종할 수 있도록 하였다. 일부 구간의 자율 주행 실험을 통해 가능성을 검증하였다.

키워드 : 로봇차량, 자율주행, 카메라 기반 주행

Abstract

This paper presents the experimental setup for autonomous navigation of a robotic vehicle for touring university campus. The robotic vehicle is developed for navigation of specific areas such as university campus or play parks. The robotic vehicle can carry two passengers to travel short distances. For the robotic vehicle to navigate autonomously the specific distance from the main gate to the administrative building in the university, the experimental setup for SLAM is presented. As an initial step, a simple method of following the line detected by a single camera is implemented for the partial area. The central line on the pavement colored with two kinds, red and yellow, is detected by image processing, and the robotic vehicle is commanded to follow the line. Experimental studies are conducted to demonstrate the performance of navigation as a possible touring vehicle.

Key Words : Robot vehicle, Autonomous driving, Camera-based navigation

Received: Mar. 11, 2016
Revised : Apr. 11, 2016
Accepted: Apr. 18, 2016
[†]Corresponding authors
jungs@cnu.ac.kr

1. 서 론

최근에 자동차는 자체 엔진에서 만든 동력을 바퀴에 전달하여 지상에서 승객이나 화물을 운반하는 교통수단이다. 자동차는 화석연료의 고갈, 환경오염에 상당 부분 영향을 미치고 있다. 이러한 영향을 줄이고자 에너지 효율이 높은 하이브리드 엔진이나 배기가스가 없는 전기자동차 등 친환경 이동수단에 대한 연구가 활발하다.

상기한 문제점을 해결할 미래형 교통수단의 하나로, 전기로 구동되는 Segway가 개발되었다 [1]. 앞·뒤로 바퀴가 구성되어 있는 자전거와는 달리 양 옆으로 구성된 두 개의 바퀴로 균형을 유지하면서, 원하는 위치로 이동할 수 있도록 개발되었다. 현재 공항경비, 레저스포츠 등의 분야에서 활용되고 있다. PUMA (Personal Urban Mobility and Accessibility)는 세그웨이와 GM(General Motors)이 합작하여 만든 미래형 도시교통수단이다 [2]. 이 차는 두 명을 태울 수 있고, 최고 속력은 56km/h, 최대주행거리는 56km 이다. Segway와 PUMA같은 두 바퀴의 이동로봇은 좁은 공간에서 회전이 자유롭고, 4륜형 차와 비교했을 때, 생산에 소요되는 자원이 적고, 연료효율이 좋은 장점이 있다.

최근에는 역진자 이동 로봇의 기술을 전기자동차 분야와 친환경 이동수단에 접목 시키는 연구가 많은 곳에서 진행 중에 있다 [3-10]. 미국의 구글카, 폭스바겐의 무인자동차 '셀리' 그리고 GM의 'EN-V' 등 다양한 형태의 전기차가 소개되었다 [6]. 'EN-V'는 통신 네트워크가 장착되어 있어 다른 차량과

본 논문은 2014년 충남대학교 자체지원과 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 지원을 받아 수행되었습니다.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정보를 교환할 수 있고, 자율주행이 가능한 미래형 개인화 차량이라 할 수 있다.

이러한 연구 동향에 따라 일인용[9]과 Entertainment용으로 사람이 탈 수 있는 이동로봇 AmuseTransBOT (ATB)을 개발하였다 [10]. 선행연구에서 균형제어와 주행 등의 실험을 성공적으로 수행하였다[10]. 또한 ATB가 엔터테인먼트 차량으로서의 바운스 제어성능을 실험하였다 [11].

본 논문에서는 ATB가 대학 캠퍼스에서 자율주행을 하기 위해 필요한 SLAM의 환경을 구축하였다. 대학 캠퍼스의 정문에서 대학 본부까지 특별한 환경에서의 자율주행을 위한 지도를 작성하고 실외자율주행의 가능성을 실험을 통해 확인하였다. 한 대의 카메라로 도로의 색을 구별하고 가운뎃 선을 검출하여 로봇 차량이 추종하도록 구현하였다. 초기 과정으로 일부 구간에서 카메라를 사용하여 선을 검출하고 사람의 조작 없이 로봇 스스로가 주행하는 것을 실험으로 검증하였다.

2. 차량로봇(AmuseTranBot)

2.1 로봇차량외관

엔터테인먼트 로봇차량은 두 사람이 탑승가능하며, 의자 아래편에 있는 2개의 구동바퀴로 움직이고 구동 바퀴 앞뒤에 높이를 변화시킬 수 있는 보조 바퀴가 있어 2접점 밸런싱 모드, 4접점 일반주행 모드로 구동할 수 있다.

그림 1은 ATB의 외형이다. 구동 바퀴에 의해서 ATB는 전진, 후진을 하고, 두 바퀴의 회전속도 차에 의해서 좌회전, 우회전이 가능한 차동 구동방식이다. ATB에 대한 균형제어와 주행 제어 실험은 이전의 논문에서 검증하였다[10].

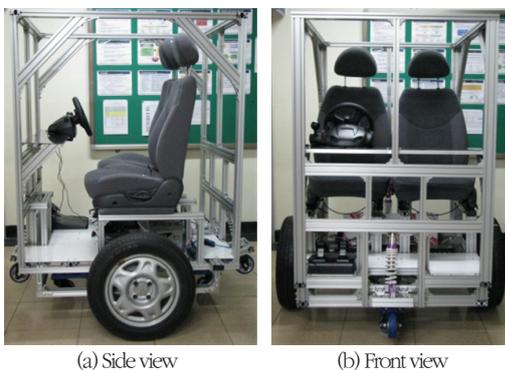


그림 1. AmuseTransBOT의 실제 모습 [10, 11]
Fig. 1. AmuseTransBOT [10, 11]

2.2 제어 알고리즘

ATB의 제어는 그림 2와 같다. 위치와 heading은 각각 PID제어기로

제어된다.

$$\begin{aligned} u_p(t) &= k_{pp}(q_{pd} - q_p) + k_{pI} \int (q_{pd} - q_p) dt + k_{pd}(\dot{q}_{pd} - \dot{q}_p) \\ u_h(t) &= k_{hp}(q_{hd} - q_h) + k_{hI} \int (q_{hd} - q_h) dt + k_{hd}(\dot{q}_{hd} - \dot{q}_h) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 q_p 는 위치, \dot{q}_p 는 선속도, q_h 는 heading, \dot{q}_h 는 heading속도, k_{pp} , k_{pd} , k_{pI} 는 위치 PID 이득값이고 k_{hp} , k_{hd} , k_{hI} 는 heading의 PID 이득값이다.

오른쪽, 왼쪽 바퀴의 토크입력은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_R(t) &= u_p(t) + u_h(t) \\ \tau_L(t) &= u_p(t) - u_h(t) \end{aligned} \quad (2)$$

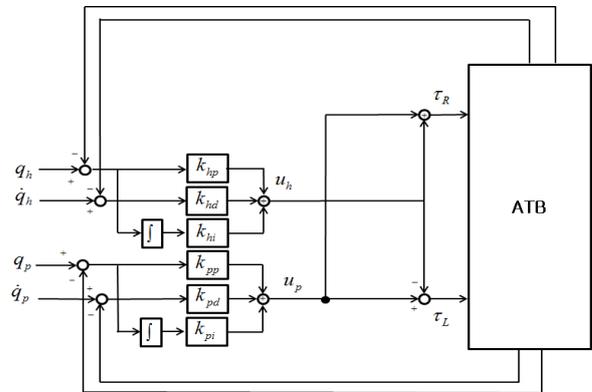


그림 2. AmuseTransBOT의 제어블록선도
Fig. 2. Control block diagram for ATB

3. 환경구축

3.1 지도생성

그림 3은 캠퍼스의 일부를 항공에서 촬영한 사진이다. 공대 4호관에서 대학본부까지 편도 약 800m의 구간을 자율주행을 하기 위해서 시점과 종점 사이에 16개의 경유 점을 그림 3과 같이



그림 3. 공대4호관에서 본부까지 경로 설정
Fig. 3. Trajectory from Engineering to main building

선택했다. 이 점은 구글어스는 프로그램을 사용하여 원하는 위치의 경도와 위도 값을 받았다. 표 1은 총 18개 지점의 위치를 구글어스에서 받은 값을 나타낸다. 그 값은 실험에 사용하는 Novatel GPS의 경도, 위도값의 형식과 사소한 차이를 보인다. 구글어스에서 받은 도, 분, 초 (°, ', ")로 되어 있는 형식을 Novatel사의 형식으로 바꾸는 식은 식 (3)과 같다. 이는 결국 초 단위를 분단위로 바꿔주는 것이다. 한 예로 36°21'53.17" 는 $3621 + 53.17 \times 100/100/60 = 3621.8862$ 이다.

$$a^\circ b'c'' = ab + c \times 100/100/60 \quad (3)$$

그림 4는 GUI상에서 항공 지도를 나타낸다.



그림 4. GUI상의 경로
Fig. 4. Trajectory on GUI

표 1. 포맷별 GPS 경로 좌표
Table 1. GPS coordinates

num ber	Google earth format		OEMSTAR format		C++ 픽셀	
	latitude(N)	longitude(E)	위도(N)	경도(E)	X axis	Y axis
1	36°21'53.17"	127°20'49.70"	3621.8862	12720.8283	273	582
2	36°21'53.25"	127°20'48.47"	3621.8875	12720.8078	241	579
3	36°21'53.55"	127°20'45.58"	3621.8925	12720.7597	165	569
4	36°21'53.65"	127°20'45.36"	3621.8942	12720.756	159	566
5	36°21'53.67"	127°20'44.62"	3621.8945	12720.7437	139	565
6	36°21'53.75"	127°20'43.36"	3621.8958	12720.7227	106	563
7	36°21'54.07"	127°20'43.35"	3621.9012	12720.7225	106	552
8	36°21'55.86"	127°20'43.69"	3621.931	12720.7282	115	491
9	36°21'56.71"	127°20'43.84"	3621.9452	12720.7307	119	463
10	36°21'59.00"	127°20'44.15"	3621.9833	12720.7358	127	385
11	36°22'01.46"	127°20'44.50"	3622.0243	12720.7417	136	302
12	36°22'03.59"	127°20'44.83"	3622.0598	12720.7472	145	231
13	36°22'05.18"	127°20'45.03"	3622.0863	12720.7505	150	177
14	36°22'06.69"	127°20'45.28"	3622.1115	12720.7547	157	126
15	36°22'08.38"	127°20'45.58"	3622.1397	12720.7597	165	69
16	36°22'09.74"	127°20'45.77"	3622.1623	12720.7628	170	23
17	36°22'09.32"	127°20'48.38"	3622.1553	12720.8063	239	37
18	36°22'07.88"	127°20'48.14"	3622.1313	12720.8023	232	86

3.2 GPS와 지도 맵핑

Novatel사의 형식으로 되어 있는 위도, 경도 정보를 C++프로그램 상에서 표현하기 위해 식 (4)를 적용한다.

$$x\text{축} : (OEM_x - 12720.6557) \times 10000 \times 0.1584$$

$$y\text{축} : 600 - (OEM_y - 3621.8773) \times 10000 \times 0.2024 \quad (4)$$

OEM_x 는 GPS 센서에서 받은 경도 값을, OEM_y 는 위도 값을 나타낸다. 12720.6557은 그림 5의 네 귀퉁이 값 중에 왼쪽 상단의 경도 값(OEMSTAR 형식)을 원점으로 잡기 때문에 넣는 값이고, 3621.8773은 왼쪽 하단의 위도 값(OEMSTAR 형식)을 기준점으로 잡기 때문에 넣은 값이다.

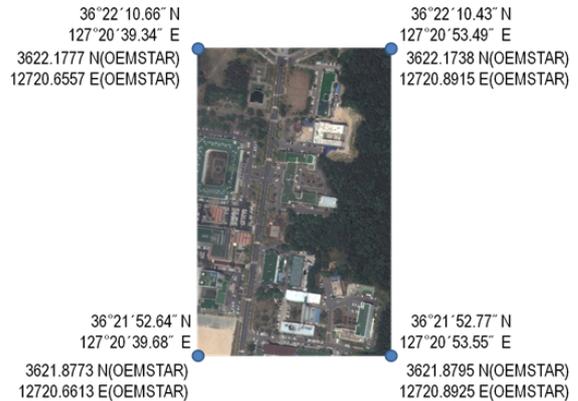


그림 5. 경로 구간 네 귀퉁이 좌표 값

Fig. 5. Coordinates of 4 corners

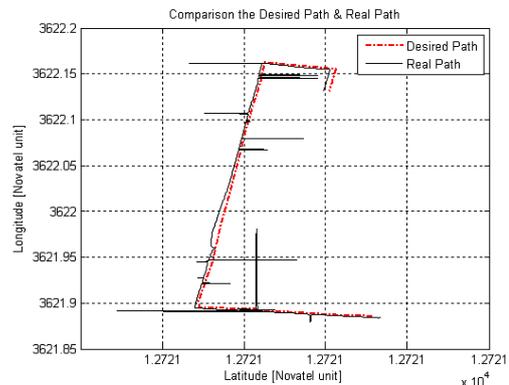


그림 6. GPS와 OEMSTAR 경로 비교

Fig. 6. Trajectory comparison between GPS and OEMSTAR

그림 5의 사진을 C++상으로 표현하면 375x600 픽셀이 된다. 0.1584는 가로 픽셀과 실제 거리상의 관계에 관한 계수로 $375 / (12720.8925 - 12720.6557) / 10000 \approx 0.1584$ 로 구할 수 있고 0.2024는 세로 픽셀과 실제 거리상의 관계에 관한 계수로 $600 / (3622.1738 - 3621.8773) / 10000 \approx 0.2024$ 로 구한다.

식(4)의 계산을 거치면 최종적으로 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 표 1의 c++ 픽셀의 값을 적용하면 그림 4와 같은 예상 경로를 생성하게 된다. 그림 6은 표 1의 OEMSTAR 포맷의 Desired Path와 실제 GPS로 받은 Real Path를 비교한 것이다. GPS로 받은 값은 그림 6에서와 같이 튀는 구간이 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 카메라 기반 자율주행

4.1 자율주행 환경

충남대학교 캠퍼스 안의 정문에서 본부까지는 그림 7과 같이 보도와 자전거도로가 서로 다른 색으로 구분되어 있다. 보도는 빨간색 계열(그림 7의 왼쪽 부분)이고 자전거 도로는 노란색 계열(그림 7의 오른쪽 부분)이다.

가장 쉬운 방법은 ATB가 두 색의 경계면 즉 가운뎃선을 추종하는 것이다. 선을 추종하기 위해서는 카메라로 정확한 선을 검출해야 한다.



그림 7. 충남대 교내 보도와 자전거 도로
Fig. 7. Pavement of CNU

4.2 영상처리를 통한 자율주행

영상처리를 통해서 주행하려고 하는 구간은 자전거 도로의 노란색과 보도의 빨간색의 경계를 검출해서 그 정보를 바탕으로 구동을 하게 된다.

색상 검출시 그림 8에 보여진 것과 같이 낮에는 해가 뜨기 때문에 그림자가 진다. 도로에도 나무나 건물로 인해 그림자가 있는 부분이 있고 없는 부분도 있다. 문제는 카메라가 같은 빨간색임에도 불구하고 이를 다른 색으로 인식한다는 점이다. 이를 보완하기 위해서 영상처리 시에 색을 검출하는 부분을 두 부분으로 나누었다.

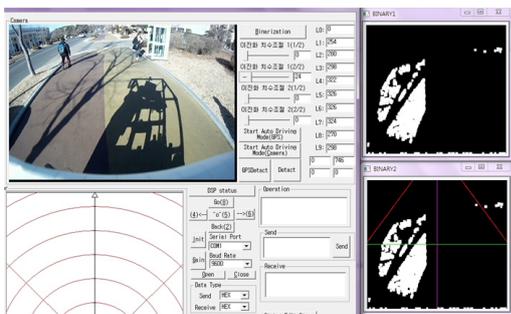


그림 8. 영상처리에서 그림자의 영향
Fig. 8. Shadow noise on image process

그림 8에서 이진화 구간을 0~24로 설정하였다. 도로의 빨간색 구간에서 햇빛 비치는 부분을 검출하지만 그림자가 있는 구간은 검출하지 못한다. 그림 9 (a)는 이진화 구간을 108~180 설정하였을 경우이고 빨간색 구간에서 그림자가 있는 구간만을 검출한다. 그림 9의 결과와 그림 9 (a)결과를 합하면 그림 9 (b)처럼 그림자에 상관없이 빨간색 영역을 검출할 수 있다.

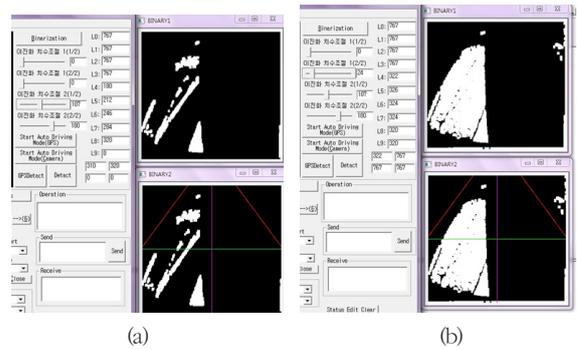


그림 9. 두 개의 이진화 구간으로 빨간색 검출
Fig. 9. Detection of red colour

영상처리를 통해 자율주행을 하다보면, 검출하고자 하는 도로 외에 주변 지형지물에 의한 외란으로 주행에 방해가 받게 된다. 대표적인 외란으로 꽃나무, 붉은 벽돌 건물, 자동차 브레이크 등, 영상처리 하고자 하는 도로외의 붉은색 포장 도로 등을 들 수 있다. 이를 차단하기 위해서 그림 10과 같이 외란 차단 구간을 설정했다. 도로에서의 영상처리가 상대적으로 정확하다는 가정 하에 도로 영역 외의 부분에 빨간색이 검출되더라도 자율주행에 영향을 주지 못하도록 했다.

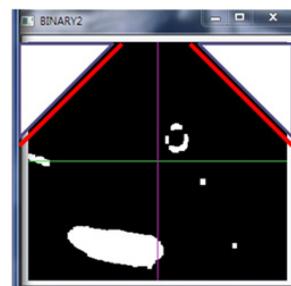


그림 10. 외란 차단구간 설정
Fig. 10. Boundary of segmentation

4.3 GUI

GUI(Graphic User Interface)는 Visual C++ 6.0 프로그램을 이용해서 만들었다. 그림 11을 보면 GUI가 크게 GPS, Camera, Laser Sensor, DSP의 네 부분으로 나누어져 있는 것을 볼 수 있다. 이번 실험에서는 영상 부분만 사용하였다.

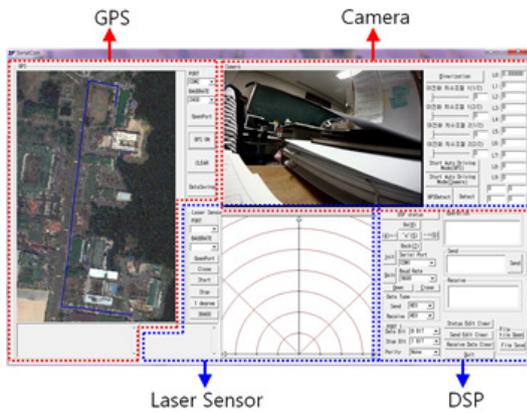


그림 11. GUI
Fig. 11. GUI

5. 실험연구

5.1 실외 주행 환경

실외주행의 경우 도로의 경사, 실내에 비해 거친 노면, 과속방지턱, 도로와 도로가 맞닿는 부분의 턱 등이 실내주행과 구분되는 다른 점이다. 그래서 실내 실험 때 보다 큰 토크가 필요하다. ATB를 안전한 4접점 상태로 놓고 실험을 수행했다.

그림 12는 전체 실외주행 구간을 나타낸다. 왕복 약 1.4km의 구간을 조이스틱을 이용해서 주행을 하였다. 이 실험을 통하여 주행용 배터리의 용량이 왕복을 할 수 있는 정도가 되는 것을 확인하였고, 실외주행에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 이 때, 구간별 경사와 시스템에 적용한 토크값은 표 2에 표기하였다. 또한 사용한 제어기 게인은 표 3에 표기하였고, 시스템의 제어주기는 100Hz이다.



그림 12. 실외주행 실험 구간
Fig. 12. Experimental trajectory

표 2. 실외주행 구간별 경사도와 토크
Table 2. Lean angle and torque values

Area	slope	Torque value
①	Flat	400~600
②	smooth uphill	600~700
③	steep uphill	약 1,000
④	flat	400~600
⑤	flat	400~600
⑥	smooth downhill	200~300
⑦	flat	400~600

표 3. 실외 주행 실험시 제어 게인
Table 3. Controller gains

Gains	Value
Position P gain	100
Position D gain	50
Position I gain	0.1
Heading P gain	3500
Heading D gain	350
Heading I gain	0.1

5.2 실외 주행 실험

그림 13은 급경사의 경우로 주행동영상을 캡처한 것이다.

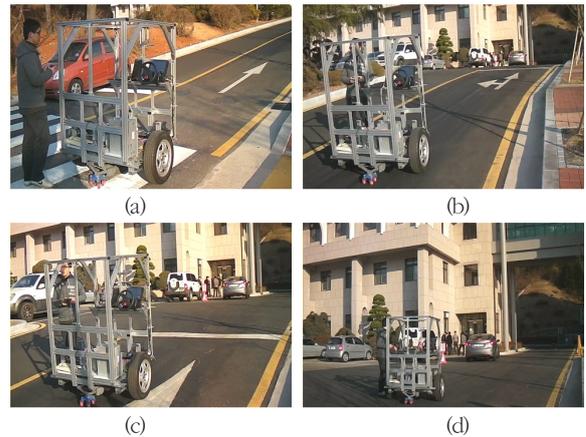


그림 13. 급경사지 편도 주행실험
Fig. 13. Driving experiment on slanted area

5.3 실외 자율주행 실험

자율주행은 그림 14에서처럼 일부 구간에 한 해 실험하였다. 실험에서 차도로 차단되는 구간은 전진한다는 간단한 알고리즘을 적용하여 자율주행을 수행하는 실험이다.

그림 15는 일정 구간에서 카메라를 이용한 자율주행 동영상을 캡처 것이다. 모터의 제어주기는 100Hz, 카메라에 의한 영상처리 제어주기는 1Hz이다.

그림 16은 실험결과를 그래프로 나타낸 것이다. (a)는 위치, (b)는 헤딩 각도, (c)는 토크를 나타낸다. (a)를 보면, 위치를 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 대략적으로 240초 동안에 62m를 이동했으므로



그림 14. 실제 자율주행 구간
Fig. 14. Autonomous navigation area

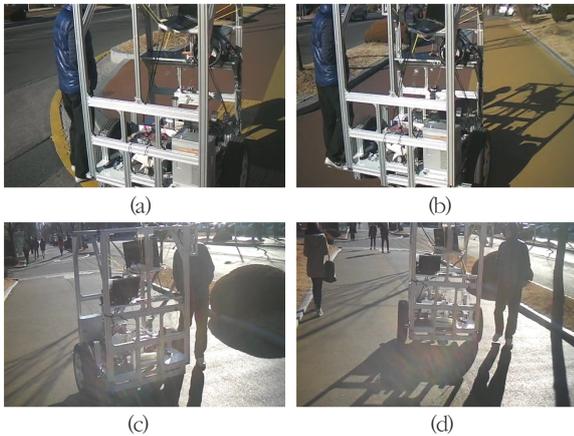
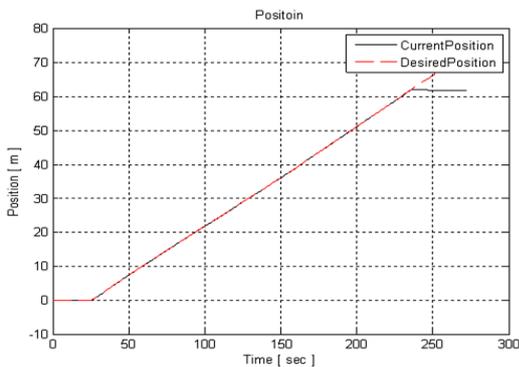


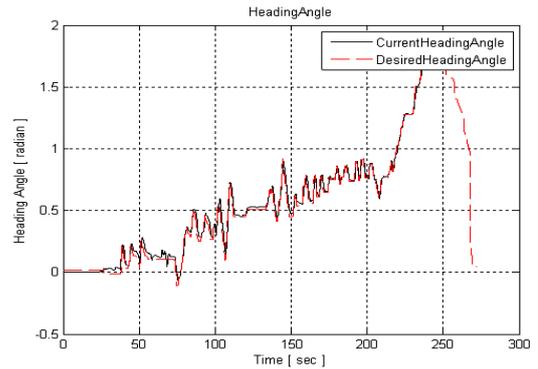
그림 15. 카메라를 이용한 자율주행
Fig. 15. Autonomous navigation using a camera

ATB의 속력은 약 25.8cm/s 이다.

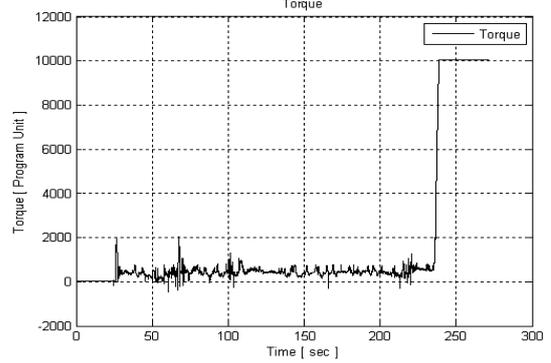
240초 이후는 전원을 내렸을 때의 결과이다. 자율주행 알고리즘 상으로는 빨간색의 오른쪽 경계를 따라가게 되어 있어서 Desired Position은 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. (b)는 헤딩 각도를



(a)



(b)



(c)

그림 16. 카메라를 이용한 자율주행 실험 결과
Fig. 16. Experimental results using a camera

나타내는 것으로, ATB의 헤딩 각도가 어떻게 변했는지 알 수 있다. 그림 14의 캡처한 사진을 보면 비슷하게 헤딩 각도가 변한 것을 알 수 있다. 그림 15 (c)는 토크를 나타내는 것으로 평상시에는 2000 이하이고 모터드라이버 전원을 끄게 되면 자율주행 알고리즘은 실행되지만 원하는 위치 값을 따라가지 못해서 토크 값이 커지게 되어 제한을 걸어둔 10,050까지 커지는 것을 확인할 수 있다.

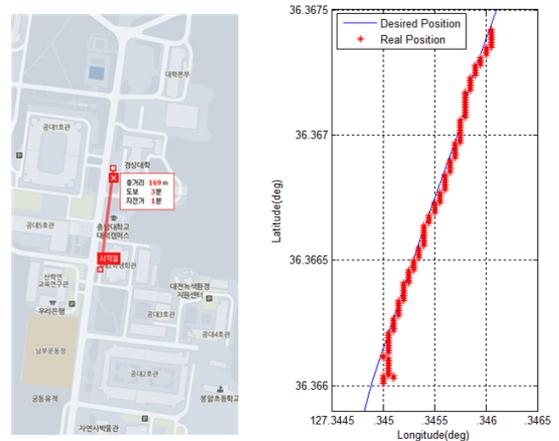


그림 17. 목표경로와 실제경로의 비교
Fig. 17. Comparison between real and desired path

그림 17은 목표경로 중 약 170m의 구간을 자율주행하고 ATB에 부착된 GPS의 정보와 목표경로를 비교하여 나타낸 그래프이다.

6. 결론

본 논문에서는 대학이라는 특수 환경에서 ATB가 자율주행을 할 수 있는 환경을 구축하였다. 구글 맵을 통하여 지도를 작성하였으며 GPS 데이터와 비교하였다. 실제 주행 가능성을 살펴보기 위해 ATB를 공대 4호관에서 출발하여 대학본부까지 왕복 1.4km의 주행을 제어하였다. 이를 통해서 로봇의 안정성, 실용성 및 배터리 용량이 충분함을 확인할 수 있었다. 또한 일부 구간에서는 카메라를 이용한 자율주행 실험을 수행하였다. 보도와 자전거도로가 구분된 곳을 햇빛이 비치는 것과 상관없이 색상을 검출하고 주행할 수 있는 것을 확인했을 뿐 아니라, 짧은 구간에 한해서 색상으로 도로를 구분할 수 없는 구간이 있는 경우에도 자율주행이 가능하다는 것을 보였다.

References

- [1] Segway, "http://www.segway.com"
- [2] PUMA, "http://www.segway.com"
- [3] K. Pathak, J. Franch, and S. Agrawal, "Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization", *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, pp. 505-513, 2005
- [4] S. H. Jeong and T. Takayuki, "Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Design Concept and Mobile Control", *IEEE IROS*, pp. 1932-1937, 2007
- [5] H. J. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors", *Mechatronics*, vol. 22, Iss. 1, pp. 95-105, 2012
- [6] "En-v", http://media.gm.com
- [7] H. J. Lee and S. Jung, "Development of two wheeled car-like mobile robot using balancing mechanism: BalBOT VII", *Journal of Korean Robotics Society*, vol. 4, no. 4, pp. 289-297, 2009
- [8] C. C. Tsai, H. C. Huang, and S. C. Lin, "Adaptive neural network control of self-balancing two-wheeled scooter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1420-1428, 2010
- [9] H. W. Kim and S. Jung, "Experimental Studies of Controller Design for a Car-like Balancing Robot with a Variable Mass",

Journal of Korea Institute of Intelligent Systems, vol.20, no. 4, pp. 469-475, 2010

- [10] H. W. Kim, S. T. Cho, and S. Jung, "Implementation and Balancing Control of a Robotic Vehicle for Entertainment," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 7, pp. 736-740, 2014.
- [11] S. T. Cho and S. Jung, "Experimental Studies on Bouncing and Driving Control of a Robotic Vehicle for Entertainment and Transportation", *Journal of Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 266-271, 2015

저자 소개



조성택 (Sung-Taek Cho)

2006년 : 경희대학교 토목공학과 졸업.

2014년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과
지능로봇 전공 석사졸업.

2014년~현재 : 한국과학기술연구원(KIST)
석사후 인턴 연구원

관심분야 : 두 바퀴 밸런싱 로봇, 제어 알고리즘, 모바일 로봇,
Optical tracking system.

Phone : +82-42-821-7232

Fax : +82-2-958-5759

E-mail : savagegard_n@nate.com



박영준 (Young-Jun Park)

2013년 : 충남대학교 전자공학과 졸업.

2016년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과
지능로봇 전공 석사졸업.

관심분야 : 두 바퀴 밸런싱 로봇, 제어 알고리즘, 모바일 로봇.

Phone : +82-42-821-7232

Fax : +82-2-958-5759

E-mail : lastcard-heart@hanmail.net



정 슬 (Seul Jung)

1988년 : 미국 웨인 주립대 전기 컴퓨터공학과
졸업.

1991년 : 미국 캘리포니아대 데이비스 전기
컴퓨터공학과 석사 졸업.

1996년 : 미국 캘리포니아대 데이비스 전기
컴퓨터공학과 박사 졸업.

1997년~현재 : 충남대학교 메카트로닉스 공학과 교수

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇, 밸런싱 시스템응용, 서비스
로봇, 미래형 지능형 운송시스템, 적정기술, 로봇교육.

Phone : +82-42-821-6876

Fax : +82-42-823-4919

E-mail : jungs@cnu.ac.kr