

자율주행차량을 위한 비전 기반의 횡방향 제어 시스템 개발

노 광 현^{*1)} · Bruno Steux²⁾

한국전자통신연구원¹⁾ · Ecole des Mines de Paris²⁾

Development of Vision-based Lateral Control System for an Autonomous Navigation Vehicle

Kwanghyun Rho¹⁾ · Bruno Steux²⁾

¹⁾Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

²⁾Robotic Center of Ecole des Mines de Paris, 60 boulevard Saint-Michel F-75272 Paris Cedex 06, France

(Received 24 March 2005 / Accepted 27 May 2005)

Abstract : This paper presents a lateral control system for the autonomous navigation vehicle that was developed and tested by Robotics Centre of Ecole des Mines de Paris in France. A robust lane detection algorithm was developed for detecting different types of lane marker in the images taken by a CCD camera mounted on the vehicle. ^{RT}Maps that is a software framework for developing vision and data fusion applications, especially in a car was used for implementing lane detection and lateral control. The lateral control has been tested on the urban road in Paris and the demonstration has been shown to the public during IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2002. Over 100 people experienced the automatic lateral control. The demo vehicle could run at a speed of 130km/h in the straight road and 50km/h in high curvature road stably.

Key words : Autonomous navigation vehicle(자율주행차량), Intelligent vehicle(지능형 차량), Lane detection(차선 인식), Lateral control(횡방향 제어), ^{RT}Maps

Nomenclature

- P_0 : zero point in a world coordinate
- P_1, P_2 : mid-point of a front axle in a world coordinate
- l : length between front & rear wheel axles
- θ : camera tilt angle
- h : camera height from the bottom
- ϕ : steering angle
- f : camera focal length
- (x_s, y_s) : target point in a screen coordinate
- $V_w(x_w, y_w, z_w)$: target point in a world coordinate

1. 서론

최근, 승객 안전, 정보화 사회로의 대응, 대기 오염 감소 등의 여러 측면에서 미래형 자동차 개발을 위한 폭넓게 연구가 수행되고 있다. 그 중 자동차 스스로 도로 주행 환경을 인식하여 운전자의 운전 능력을 돕거나 대신하기 위한 지능형 차량(Intelligent Vehicle) 개발에 관련된 연구는 유명 자동차업체들과 여러 연구 기관들에서 추진되고 있다. 지능형 차량 개발이 ITS (Intelligent Transportation System)의 한 연구 분야로 자리 잡게 되면서 연구의 활기를 띠기 시작했고, 최근에는 연구 결과를 학술대회에서 발표함과 동시에 실제 연구, 개발한 지능형 차량을

*To whom correspondence should be addressed.
khrho@etri.re.kr

일반인에게 선보이고 있다.¹⁾ 대표적인 학술대회인 IEEE Intelligent Vehicle Symposium은 미국, 일본, 유럽을 번갈아가며 매년 개최되고 있으며 대회 기간 중 연구 중인 지능형 차량을 전문가와 일반인들에게 선보이고 있다.

지능형 차량 응용 분야인 자율주행차량을 개발하기 위해서는 횡방향 제어(lateral control)와 종방향 제어(longitudinal control)가 필수적이다.

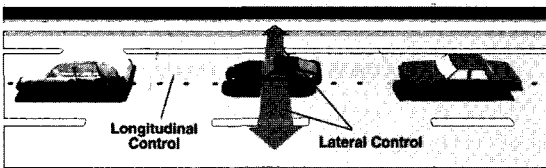


Fig. 1 Lateral control and longitudinal control

· 횡방향 제어는 Fig. 1과 같이 차량이 차선에서 벗어남이 없이 자동 조향을 할 수 있도록 제어하는 것으로 대부분의 연구에서 일반 운전자처럼 기존 도로상에 있는 흰색 차선을 인식하여 차선을 유지하는 것을 목표로 하고, 종방향 제어는 차량 주변에 위치하는 다양한 장애물을 인식하여 차량의 주행 속도를 제어하는 것을 목표로 한다.

위의 두 기능을 구현하기 위해서는 주행환경 인식 기술, 센서 기술, 제어 기술 등 여러 분야의 기술들이 필요하고, 실용화를 위해서는 운전자의 운전 능력을 대신할 정도의 신뢰성 있는 기술 개발이 필수적이기 때문에 많은 연구가 수행되고 있고, 일부 기술은 상용화되어 사용되고 있다.

본 논문은 프랑스 Ecole des Mines de Paris의 Robotic Center(CAOR)에서 연구, 개발된 자율주행 차량을 위한 횡방향 제어시스템을 소개한다. 연구 결과는 2002년 6월 프랑스 파리 근교에 위치한 베르사이유시에서 개최된 Intelligent Vehicles Symposium 2002와 함께 개최된 Demo'2002에서 시연되었다.

2장에서 시험 차량의 특징과 횡방향 제어 시스템의 전체적인 구성을 설명하고, 3장에서는 횡방향 제어 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 설명하고, 5장은 결론이다.

2. 횡방향 제어 시스템 구성

일반적으로 연구되고 있는 횡방향 제어 시스템은 차량 내부에 카메라를 설치하여 전방 도로 영상을 입력 받고, 차선 인식 알고리즘으로 입력 영상에서 차선을 인식한 후, 차량이 차선 중앙으로 주행하기 위한 조향각을 계산하여 제어하는 과정을 거친다. 본 장에서는 실험에 사용된 차량 특징과 횡방향 제어 시스템의 구성에 대해 설명한다.

2.1 시험 차량의 특징

자율주행차량은 차량 내부에 다수의 센서, 컴퓨터, 모니터, 입력 장치 등을 설치해야 한다. 이러한 측면에서 Ecole de Mines de Paris 실험 차량의 장점을 소개한다. Fig. 2는 횡방향 제어 실험에 사용된 차량인 Renault사의 Espace로서 'Lara'라고 불린다.



Fig. 2 Test vehicle for lateral control

본 차량의 계기판은 디지털화되어 Fig. 3과 같이 4개의 LCD로 구성되어 있다. CAN 통신을 통해 얻어지는 차량 속도, 연료 잔량 등의 정보들이 모두 디지털 계기판에 표시된다. 차량 후미에 설치된 차량 영상처리 및 횡방향 제어용 컴퓨터의 LCD 모니터가 계기판 내부에 장착되어 있어 차량 주행 시험시 편리하다.

또한, 좌우 사이드 미러 위치에 미러 대신 소형 CCD 컬러 카메라를 장착하고, 카메라에서 획득한 측방 도로 영상을 계기판내의 좌우측에 설치된 LCD에 각각 출력한다. 차량 내부의 룸미러를 대체하기 위해서는 차량 후방에 컬러 카메라를 장착하

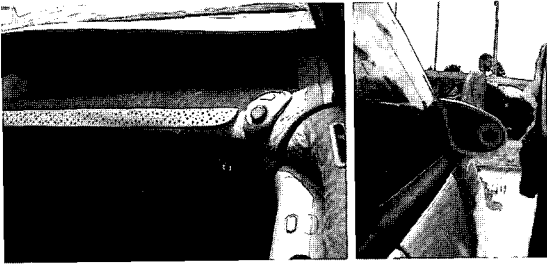


Fig. 3 Digital instrumental panel and a side view camera

였고, 이 카메라에서 획득된 후방 도로영상을 계기판 중앙에 있는 LCD에 출력하여 룸미러 기능을 대신하도록 설계되었다.

2.2 시스템 구성

Lara의 횡방향 제어 시스템은 도로 영상 입력을 위한 카메라, 차선인식 및 횡방향 제어 알고리즘, 핸들 제어부, 기타 기계 장치 등으로 구성되며, Fig. 4와 같다.

횡방향 제어 시스템의 구성 요소를 차례로 설명하면 다음과 같다.

- 1) 도로 영상 입력부 : 운전자가 시각 인지 능력을 기반으로 횡방향 제어를 수행하는 것과 마찬가지로 자율주행차량에는 전방 도로 영상을 입력받기 위해서 PAL 방식의 CCD 컬러 카메라를 Fig. 4의 ①위치(룸미러 위치)에 전방을 향하도록 장착하였다. 카메라의 아날로그 출력 영상은 횡방향 제어용 컴퓨터에 설치된 영상처리보드 전달되어 디지털 영상으로 변환된다.
- 2) 차선인식 및 횡방향 제어부 : 차선 인식 알고리즘을 이용하여 디지털 도로 영상에서 흰색 차선을 탐지하고 차량이 주행하고자 하는 차선 중앙 위치를 계산한다. 이 위치로 차량이 이동하기 위해 필요한 핸들 조향각을 계산한다. 차선인식 알고리즘과 횡방향 제어 알고리즘은 Windows OS에서 multisensor fusion application 개발 용도로 제작된 RTMaps 기반하에서 Visual C++로 프로그램되었다. RTMaps에 대해서는 2.3절에서 소개된다.
- 3) 핸들 조향 제어부 : 엔코더로부터 핸들 조향각을 읽어내고, DC 모터를 구동하여 핸들을 제어할 수 있는 마이크로컨트롤러가 포함된 하드웨어로서, 횡방향 제어부로부터 시리얼통신을 통해 핸

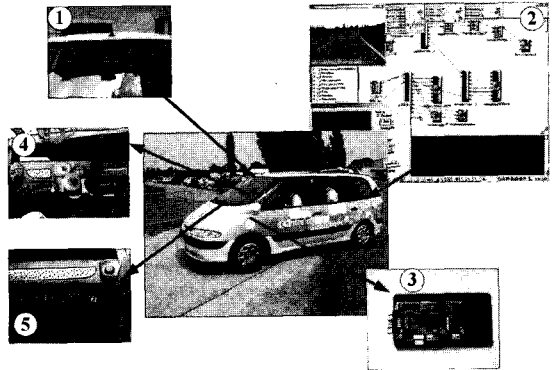


Fig. 4 Lateral control system configuration

들 조향각을 전송 받아 핸들을 제어한다.

- 4) 핸들 조향 기계부 : 핸들을 회전시키기 위한 DC 모터와 핸들 조향각을 읽어내기 위해 엔코더가 그림과 같이 기어로 연결되었다.
- 5) 인터페이스 : 횡방향 제어 실험을 편리하게 하기 위해 핸들 조향부의 작동 상태를 쉽게 확인할 수 있는 LED (핸들 구동 모터의 CW/CCW 회전 방향 알림 LEDs), 모터구동 보드 전원 공급스위치, 일반 주행시나 위급 상황시 핸들을 수동으로 제어하는데 필요한 스위치를 보조석 전방에 설치하였다.

횡방향 제어 시스템의 전체적인 흐름을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 룸미러 위치에 장착된 PAL 방식의 SONY CCD 컬러 카메라가 전방 도로 영상을 출력한다.
- 2) 입력 영상은 Ellips사의 RIO 프레임 그래버로 전달되어 디지털 영상으로 변환된다.
- 3) RTMaps 기반의 Lane Detection Component에 구현된 차선 인식 알고리즘을 이용하여 전방 도로 영상에서 흰색 차선을 탐지하고 차량이 주행하고자 하는 차선 중앙 위치를 계산한다.
- 4) RTMaps 기반의 Vehicle Model Component에서는 2차원 영상 좌표계에서의 차선 중앙 위치를 3차원 실제 좌표계에서의 좌표로 변환하고, 이 위치까지 차량이 주행하기 위한 조향각을 계산한다.
- 5) RTMaps 기반의 Steering Wheel Control Component에서는 계산된 조향각 위치까지 핸들이 회전하기 위한 명령을 핸들제어보드에 전달한다.
- 6) Microcontroller PIC16F876 기반의 핸들제어보드

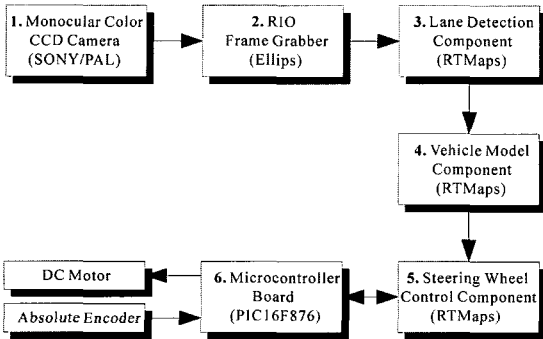


Fig. 5 Lateral control process

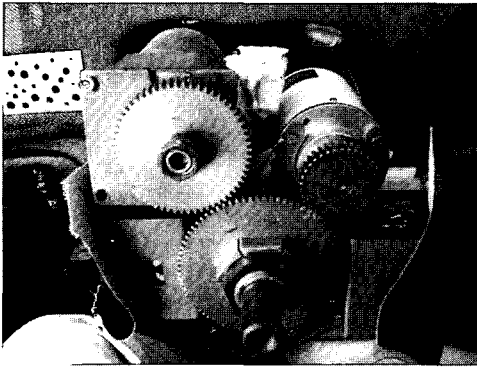


Fig. 6 Mechanical linkage between a steering wheel, a motor and an encoder

는 Fig. 6과 같이 제작된 핸들, 모터, 엔코더간의 기계적인 연결을 통해 핸들의 조향각을 측정하며 전단계에서 결정된 핸들의 목표 조향각까지 회전시킨다.

2.3 RTMaps

횡방향 제어 시스템에서 차선인식, 차량 조향각 계산 및 핸들제어보드와의 통신에 관련된 소프트웨어는 모두 'RTMaps' 기반하에서 구현되었다. RTMaps는 멀티 센서를 필요로 하는 차량 관련 연구에 사용하기 편리하도록 개발된 소프트웨어로 특히, frame grabber로 디지털화된 영상을 하드디스크에 동영상 파일로 저장하고, 이후에 이 파일을 재생하며 동시에 개발된 영상 처리 알고리즘을 적용할 수 있도록 개발되었다. 따라서, 도로 영상을 이용한 지능형 차량 관련 영상 처리 알고리즘 개발시 유용하다. 이 소프트웨어는 프랑스의 Intempola라는 회사에서 판매

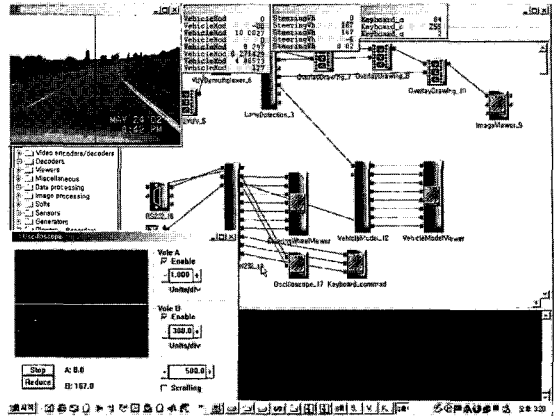


Fig. 7 Lane detection and lateral control on RTMaps

되고 있으며,^{2,5)} 프랑스의 르노자동차 연구소, 푸조 자동차와 독일의 다임러크라이슬러 자동차 연구소 등에서 사용되고 있다. Fig. 7은 RTMaps의 기반하에서 구현된 차선인식을 포함한 횡방향 제어 알고리즘을 컴포넌트간 연결 관계와 입력된 도로 영상의 차선 인식 결과도 보이고 있다. 좌측 상단에 있는 윈도우는 전방 도로 영상에서 차선을 인식한 결과이고, 우측에 있는 여러 윈도우는 횡방향 제어에 필요한 여러 변수들의 값을 나타내고 있다.

3. 차선 인식 및 횡방향 제어

3.1 차선인식 알고리즘

비전 기반의 횡방향 제어에 있어서 중요한 기술 중 하나는 강인한 차선 인식 알고리즘이다. 다양한 도로 환경에서의 흰색 차선을 인식하기 위해서 Pierre Coulombe에 의해 제안된 차선인식 알고리즘³⁾을 응용하여 사용하였고, 시험 차량 데모시 차선 변경 기능을 구현하기 위해 차선 인식 수평 영역을 좌우로 확대하여 주행 차선뿐만 아니라 옆차선을 인식할 수 있도록 차선 인식 알고리즘을 개선하였다.

횡방향 제어를 수행하기 위해 차선인식 알고리즘은 차선인식 결과로부터 차량이 주행할 전방 도로의 중앙값을 계산하였다. Fig. 7의 도로 영상 중간에 차선을 연결한 수평선이 나타나 있는데 이것은 양쪽 차선을 탐지한 후 차선을 연결한 것으로 수평선의 중앙 지점이 차량 주행의 목표점이다. 이 과정은

2.2절의 Fig. 5에서 설명된 바와 같이 RTMaps 기반의 Lane detection component에서 수행된다.

3.2 횡방향 제어 방법

Lane detection component에서 2차원 도로 영상에서의 주행 차선의 중앙 좌표가 추출되면, 이 값은 차량이 차선 중앙으로 주행하기 위한 목표점이 된다. 차선 중앙값은 영상 좌표계에서 2차원 좌표계로 표시되므로 차량의 횡방향 제어를 위해서는 2차원 영상 좌표를 3차원 실세계 좌표로 변환하여 차량이 이동할 도로상의 위치를 계산해야 한다. 이것은 차량의 현재 위치로부터 목표 지점으로 이동하는데 필요한 핸들 조향각 계산이 3차원 좌표계에서 수행되기 때문이다. 이러한 처리 절차는 Fig. 5의 Vehicle model component에서 수행된다.

2차원 영상 좌표계의 차선 중앙 좌표를 3차원 실세계 좌표로 변환 계산은 차량에 설치된 카메라와 전방 도로 목표점의 기하학적 관계에 의해 산출될 수 있다. 도로가 평평하다는 가정하에 도로면 기준의 카메라의 높이, 기울어진 각도(tilt), 초점거리(focal length) 등을 알면 전방 도로면의 특정한 좌표를 모노 비전으로 측정할 수 있다. Fig. 8은 실세계 좌표계에서 도로상의 차선 중앙점에 해당하는 한 점과 이 점이 영상 좌표계에 나타나는 점과의 관계를 나타내고 있다. 영상 좌표계상의 좌표 (x_s, y_s)

가 차선의 중심 좌표라고 가정하면, 아래 그림의 기하학적 관계를 이용하여 실세계좌표계상의 좌표인 $V_w(x_w, y_w, z_w)$ 를 계산할 수 있고, 계산 과정은 다음과 같다.

우선, $V_w(x_w, y_w, z_w)$ 는 도로상의 한 점이므로 z_w 는 0이 된다. 따라서, x_w, y_w 의 값을 구하면 된다. y_w 는 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

$$y_w = h \cdot \tan(\theta - \alpha) \tag{1}$$

where $\alpha = \tan^{-1} \frac{y_s}{f}$

x_w 는 식 (2)에 의해 구해진다.

$$\sqrt{f^2 + y_s^2} : \sqrt{h^2 + y_w^2} = x_s : x_w$$

$$x_w = \frac{\sqrt{h^2 + y_w^2}}{\sqrt{f^2 + y_s^2}} \cdot x_s \tag{2}$$

다음 단계는 앞에서 계산한 3차원 좌표로 차량이 이동하기 위한 조향 각도를 계산하는 것이다. 이를 위해 Fig. 9와 같이 차량을 단순화시킨 Bicycle Model을 사용한다. 차량의 전방 바퀴가 P_1 에 위치한 상황에서 P_2 지점까지 이동하기 위한 차량의 조향 각인 ϕ 는 식 (3)에 의해 계산된다.

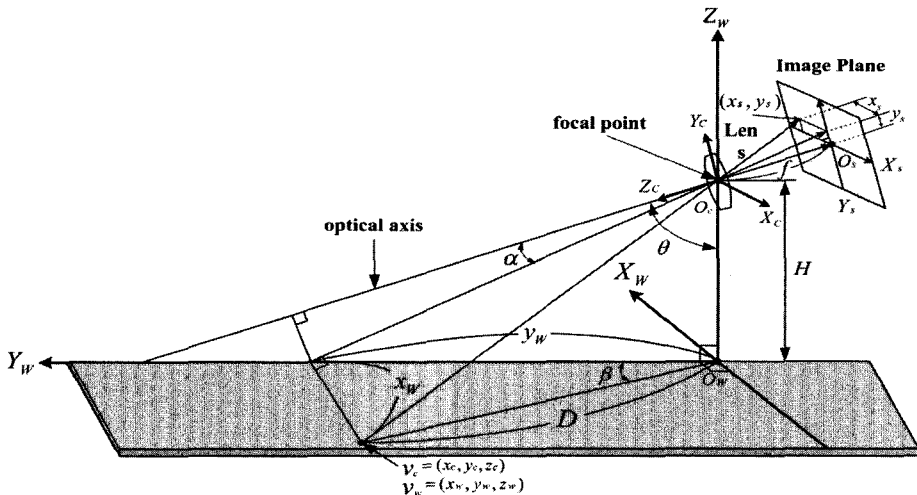


Fig. 8 Geometrical relationship between screen coordinate system and world coordinate system

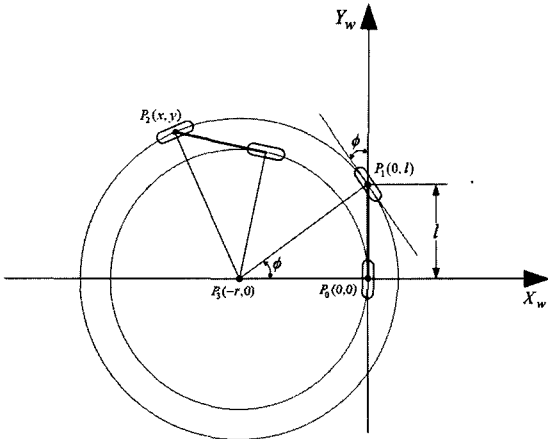


Fig. 9 Bicycle Model

$$\sqrt{r^2 + l^2} = \sqrt{y^2 + (x - r)^2}$$

$$r = \frac{x^2 + y^2 - l^2}{2x} \quad (3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{l}{r}$$

ϕ 가 결정되면 Fig. 6의 핸들과 엔코더의 기어비를 고려하여 ϕ 값을 목표 엔코더값으로 변환한다. 이 값은 Fig. 5의 Steering wheel control component로 입력되고, 이 component에서는 RS232C 시리얼 통신으로 핸들제어보드에 목표 엔코더값까지 핸들이 회전하도록 명령을 전달한다.

PIC16F876 기반의 핸들 제어 보드에서는 핸들의 엔코더값과 시리얼 통신으로 전달 받은 목표 엔코더값을 비교하여 PID 제어를 사용해 DC 모터를 제어한다.

4. 실험 결과

실험 차량인 Renault사의 Espace의 차축간 길이인 l 은 270cm, 도로면으로부터 카메라 렌즈의 초점까지 높이 h 는 150cm, 카메라 틸트각 θ 는 85°, 초점 거리 f 는 8mm였다.

차선 인식 기반의 횡방향 제어 실험은 파리 시내 도로에서 수행되었고, 최종 시연회는 IV'2002 심포지엄이 진행된 베르사이유시 근교의 주행 도로에서 3일간 수행되었다. 시연 주행은 다양한 형태의 차선이 있는 2차선으로 이루어진 3.4km 도로로서 직선

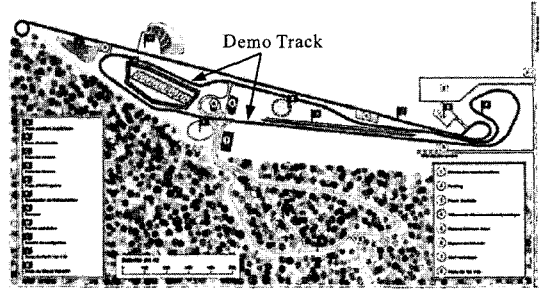


Fig. 10 Map of a demonstration track

도로와 최대 30m 반경의 곡선도로로 이루어졌다. Fig. 10은 시험 주행장 지도이다.

시험 차량은 직선 도로에서 최대 130Km/h, 30m 반경의 곡선 도로에서 50Km/h의 속도로 안정적인 횡방향 제어가 가능하였다. 차량의 종방향 제어(속도 제어)는 일반 주행시와 동일하게 운전자의 가속/제동 페달 수동 제어로 조절되었다. IV'2002 지능형 차량 주행 시연회에서는 시연 차량 내부와 시험 주행장 주변에 여러 대의 카메라를 설치하여 이 카메라들에서 무선으로 전송되는 실시간 동영상은 회의실에서 많은 참석자들에게 직접 보였고, 100명이상의 전문가들이 차량에 직접 시승하여 횡방향 제어 시스템의 성능을 확인하였다. 본 논문에서 소개한 CAOR Lara의 횡방향 제어 시스템 데모 동영상은 IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2002의 홈페이지⁴⁾에 등록되어 있으므로 웹상에서 시험 결과를 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 자율주행차량 개발에 필요한 비전 기반의 횡방향 제어 시스템을 개발하고 시험한 결과를 설명하였다. 차선인식 알고리즘과 횡방향 제어 알고리즘은 RTMaps 기반하에서 구현되었다. 개발된 횡방향 제어 시스템의 실험 결과는 IV'2002 학술대회 지능형 차량 시연회에서 선보여졌고, 직선 도로에서 최대 130Km/h, 30m 반경의 곡선 도로에서 50Km/h의 속도로 안정적인 제어가 가능하였다. 향후에는 본 연구소에서 종방향 제어 시스템을 개발할 계획이다.

References

- 1) M. H. Han and G. H. Noh, "Development Trend for an Autonomous Navigation Vehicle," Journal of KSAE, Vol.20, No.6, pp.24-30, 1998.
- 2) B. Steux, P. Coulombeau and C. Laugeau, "RT-MAPS : A Framework For Prototyping Automotive Multi-Sensor Applications," Proceedings of the 7th World Congress on Transportation Systems, Torino, 2000.
- 3) P. Coulombeau and C. Laugeau, "Vehicle Yaw, Pitch, Roll and 3D Lane Shape Recovery by Vision," Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transportation Systems, Torino, 2000.
- 4) <http://www-rocq.inria.fr/imara/pages/videos.html>
- 5) <http://www.intempora.com>