

능동비행제어기술에 기반한 자동차 횡방향 제어

Lateral Vehicle Control Based on Active Flight Control

서 영 봉, 최 재 원*, Duan Guang Ren

(Young Bong Seo, Jae Weon Choi, and Guang Ren Duan)

Abstract : In this paper, a lateral vehicle control using the concept of control configured vehicle(CCV) is presented. The control objectives for the lateral dynamics of a vehicle include the ability to command a chosen variable without significant motion change in other specified variables. The analysis techniques for decoupling of the aircraft motions are utilized to develop vehicle lateral control with advanced mode. Vehicle lateral dynamic is determined to have the steering input and control torque input. The additional vehicle modes are also defined to using CCV concept. We use right eigenstructure assignment techniques and command generator tracker to design a control law for an lateral vehicle dynamics. The desired eigenvectors are chosen to achieve the desired decoupling(i.e., lateral direction speed and yaw rate). The command generator tracker is used to ensure steady-state tracking of the driver's command. Finally, the developed design is utilized by using the lateral vehicle dynamic with four wheel.

Keywords : Active Control Technology(ACT), Control Configured Vehicle(CCV), flight control system, lateral vehicle control, 4WS, eigenstructure assignment, command generator tracker, motion decoupling

I 서론

첨단 항공기용 CCV(Control Configured Vehicle) 기술이란 종래의 단일입출력 체계에서 벗어나 다중 입출력 체계로의 확장을 위해서 새로운 루프를 추가함으로써 항공기의 성능 및 운동성을 현저히 개선하고자 하는 ACT(Active Control Technology) 기법을 비행체 설계 초기 단계에서부터 도입하여 원하는 비행운동을 정확히 구현할 수 있게 만드는 제어 방식이다[1]. 이는 비행체에서 승강타(elevator), 방향타(rudder), 보조익뿐만 아니라 카나드(canard)의 조작에 의한 3차원 공간에서의 고도, 방위에 따른 자세 유지 및 변경에 대한 새로운 자유도(횡방향 모드와 종방향 모드)를 부여하고 특정 방향으로의 비행운동을 신속하고 정확하게 실현할 수 있게 하였다[2-6]. 비행사의 조작능력을 초월한 이러한 운동 특성은 컴퓨터 제어를 병용하면서 실현 가능하게 되었고, 고장처리와 같은 안전성 문제도 제어기술에 의해 확보되고 있다.

한편, 차량의 운동 특성은 2차원 공간에서 핸들, 가속장치, 제동장치에 의한 가속, 감속, 주행, 차선변경, 선회, 정지의 기본동작을 수행한다. 자동차의 주행성과 승차감을 높이기 위한 노력이 많은 연구자들에 의해서 수행되었다[7-13]. 그러나, 이를 위해서는 차량의 동역학 모델이 정확하게 모델링되어야하고, 주행성과 승차감에 대한 각각의 제어 알고리즘을 설계해야만 한다. 최근에는 자동차에서는 운전자를 중심으로 하는 제어시스템이 적극적으로 검토 및 개발되고 있는 추세이다[14-21]. 이것은 차량 동역학에 대한

정확한 지식을 필요로 하지 않지만, 차량의 응답특성(상승 시간, 안정성 요소, 감쇠 등)을 나타내는 기본 모델과 운전자의 '제어 알고리즘'을 모사하는 제어기를 같이 설계해야만 한다. 그러나, 이전의 연구는 모두 자동차의 기본운동능력에 기반을 두고 수행되었기 때문에 기존의 차량과 다른 4WS 시스템에 대한 운동특성(천이운동, 회전운동)에 대한 연구가 미비하였다.

본 논문에서는 차량의 설계 파라미터와 CCV 모드 특성을 고려할 수 있는 모델을 설정하고 이를 이용하여 차량의 횡방향 제어에 효과적인 제어알고리즘을 제시한다. 기존의 비행체에 적용되었던 CCV 개념을 자동차에 적용하여 자동차의 새로운 운동모드(차선변경, 수평천이, 회전운동)를 정의한다.

이를 위해서 먼저 조향입력뿐만 아니라 제어토크 입력이 가능한 차량 횡방향 동역학 모델을 선정하여 차량 횡방향 동역학을 모델링하고, CCV 개념에 기반하여 새로운 운동모드를 정의한다. 그리고, 비행체 능동제어기술에 적용되었던 비행체 다중모드 고유구조 지정기법(eigenstructure assignment method)을 활용하여 차량 횡방향 모델에서 횡방향속도와 요변화율을 분리하고, 명령생성추종(command generator tracker) 기법을 사용하여 운전자의 조향입력을 상태변수가 추종하도록 한다. 마지막으로, 시뮬레이션을 통해서 본 제안한 기법의 유용성과 타당성을 고찰한다.

II 첨단 항공기의 CCV 모드

CCV(Control Configured Vehicle)는 종래의 단일입출력 체계에서 벗어나 다중 입출력 체계로의 확장을 위해서 새로운 루프를 추가함으로써 항공기의 성능 및 운동성을 현저히 개선하고자 하는 ACT(Active Control Technology) 기법을 비행체 설계 초기 단계에서부터 도입하여 원하는 비행운동을 정확히 구현할 수 있게 만드는 제어방식이다. 각 운동방

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 10. 22., 채택확정 : 2006 5. 29.

서영봉, 최재원 : 부산대학교 기계공학부

(ybseo@pusan.ac.kr/choijw@pusan.ac.kr)

Duan Guang Ren : 중국 하얼빈공대 제어시스템 및 항법기술 센터 (grduan@ieee.org)

항의 독립적인 제어가 가능하게 만들기 위해서는 먼저 운동방정식에서 변수분리가 선행되어야 하며, 필요에 따라 수평 카나드 또는 수직 카나드 등의 별도의 제어타면의 설계를 필요로 한다.

기존의 비행체는 승강타, 방향타, 보조익에 의한 x, y, z 에 대한 회전운동과 기체축 방향의 4자유도에 대한 운동을 수행해 왔으며, 기체의 회전을 동반한 간접제어에 의해서 유사 천이운동을 수행하였다. 한편, ACT에 의해 새로이 y, z 방향의 운동이 추가되어 그림 1과 같은 6 자유도의 운동이 독립적으로 가능해졌으며 이러한 추가자유도를 제어하기 위한 새로운 제어입력 장치의 설계가 선행되어야한다.

비행체에서의 CCV 제어모드는 표 1에 나타난 것과 같이 지시모드(pointing mode), 천이모드(translation mode), 직접입력모드(direct force mode)등이 있고, 이것은 각각 종방향과 횡방향 운동으로 나뉜다[1].

1. 지시모드

1.1 피치 지시 모드(pith pointing mode)

일정 고도를 유지하여 수평 비행을 하면서 기수를 상하 변화할 수 있도록 하는 것으로 비행 경로각의 변화없이 피치 자세만 변화시키는 모드

$$\Delta\theta = \Delta\alpha, \Delta\gamma = 0 \tag{1}$$

여기서 $\gamma = \theta - \alpha$, $\Delta\theta$ 는 피치각의 변화량, $\Delta\alpha$ 는 받음각의 변화량, $\Delta\gamma$ 는 비행경로각의 변화량.

1.2 요오 지시 모드(yaw pointing mode)

일정한 고도를 유지하여 수평비행을 하면서 기수 방위를 좌우로 변화할 수 있도록 하는 것으로 비행 경로각의 변화없이 기수 방위각만 변화시키는 모드

$$\Delta\psi = \Delta\beta, \Delta\psi_g = 0 \tag{2}$$

여기서 $\psi = \psi_g - \beta$, $\Delta\psi$ 는 요오 자세각 변화량, $\Delta\beta$ 는 미끄럼각의 변화량, $\Delta\psi_g$ 는 지면에 대한 비행 경로각의 변화량.

2. 천이모드

2.1 수직 천이 모드(vertical translation mode)

기체를 수평 자세로 유지하면서 수직으로 고도를 상하 이동할 수 있도록 하는 것으로 피치 자세각의 변화없이 비행경로를 변화시키는 모드

$$\Delta\gamma = \Delta\alpha, \Delta\theta = 0 \tag{3}$$

2.2 횡방향 천이 모드(lateral translation mode)

기수 방위를 일정하게 유지하면서 기체를 좌우로 이동할 수 있도록 하는 것으로 요오 자세각의 변화없이 지면에 대한 비행경로를 변화시키는 모드

$$\Delta\psi = \Delta\beta, \Delta\psi_g = 0 \tag{4}$$

3. 직접력모드

3.1 직접양력모드(direct lift mode)

받음각이 일정하게 유지하면서 직접 양력 제어를 하여

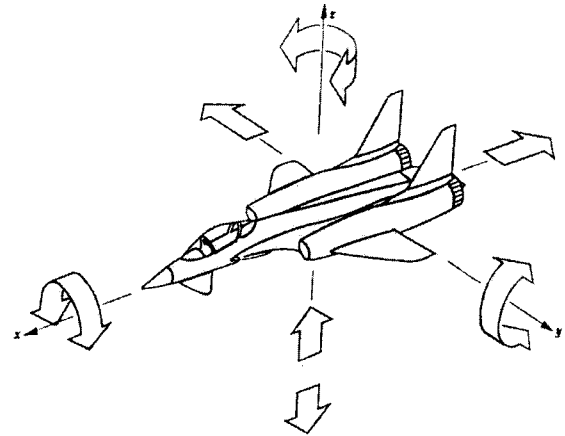


그림 1. CCV 비행체의 6 자유도 운동.
Fig. 1. The movement of 6-degree of freedom.

표 1. 비행체에서의 CCV 제어 모드.

Table 1. The longitudinal/lateral dynamics of CCV.

지시모드	천이모드	직접력모드
피치 지시모드	수직 천이모드	직접양력모드
요오 지시모드	횡방향 천이모드	직접횡력모드

수직방향의 비행경로 제어를 실현하는 것으로 받음각의 변화없이 비행경로와 자세를 변화시키는 모드

$$\Delta\theta = \Delta\gamma, \Delta\alpha = 0 \tag{5}$$

3.2 직접횡력모드(direct sideforce mode or flat turn mode)

주익을 수평자세로 유지하는 가운데 선회비행이 가능하게 한 것으로 옆 미끄럼각의 변화없이 요오자세와 지면에 대한 비행경로를 변화시키는 모드

$$\Delta\psi = \Delta\psi_g, \Delta\beta = 0 \tag{6}$$

III. 자동차 횡방향 동역학 모델링

1. 타이어 모델을 고려한 자동차 횡방향 모델

제동이나 구동을 배제한 순수한 횡방향 이동만을 고려하면, 타이어의 슬립각과 횡방향 힘의 관계가 선형일 경우에 가장 효과적인 제어방법은 차륜의 조향각(steer angle)을 제어하는 것이다. 이와 같은 횡방향 제어의 대표적인 시스템에 대해서 효과적인 제어를 위해서는 후륜의 토우 각(toe angle)만을 제어하거나 전/후륜의 토우 각을 능동적으로 제어할 수 있어야 한다. 그림 2는 차량 모델링에 사용된 차량에 대한 개략도이다.

이 개략도에 관련된 표기에 대한 의미는 다음과 같다.

- a : 무게 중심으로부터 전방 차축간의 거리
- b : 무게 중심으로부터 후방 차축간의 거리
- d : 차 중심선에서 각 바퀴에 대한 거리(1/2 the Track)
- X, Y : 고정좌표계
- U : 차량 종방향 속도
- V : 차량 횡방향 속도

Dugoff 타이어모델은 시뮬레이션에 이용되는 가장 간단한 모델중의 하나이다. 이 모델에 따르면 타이어에 작용하는 힘은 타이어의 미끄럼각에 비례한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 미끄럼각은 타이어가 움직이는 방향에 상대적으로 만들어진다. 바퀴에 작용하는 힘에 대해서 토크 입력은 각각의 바퀴 평면에 직접 작용하고, 조향력은 바퀴평면에 수직으로 작용한다. 타이어 힘은 입력과 상태에 대해 선형적이라고 가정한다.

차량 모델의 질량 중심의 횡 운동과 요 운동만을 포함하고, Dugoff 타이어모델을 고려한 횡방향 모델[15]의 횡방향 힘에 대한 상태공간식의 모델은 다음과 같다.

$$F = A_F \bar{x} + B_F \bar{u} \tag{7}$$

여기서, $F = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ y_f \ y_r]^T$, $\bar{x} = [V \ \theta]^T$, 그리고 $\bar{u} = [\delta_f \ \delta_r \ \Delta T_1 \ \Delta T_2 \ \Delta T_3 \ \Delta T_4]^T$.

$$A_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{2C_{af}}{U} & -\frac{2aC_{af}}{U} \\ -\frac{2C_{ar}}{U} & -\frac{2bC_{ar}}{U} \end{bmatrix},$$

$$B_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{r} \\ \frac{2T_{nom,l}}{r} + 2C_{a_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2T_{nom,r}}{r} + 2C_{a_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

차량의 선형상태방정식은 시스템 방정식(26)에 횡방향 힘을 삽입함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\dot{x}} &= A_X \bar{x} + B_X (A_F \bar{x} + B_F \bar{u}) \\ &= (A_X + B_X A_F) \bar{x} + B_X B_F \bar{u} \\ &= A \bar{x} + B \bar{u} \end{aligned} \tag{8}$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_{a_f} + C_{a_r}}{mU} & -U - 2 \frac{aC_{a_f} + bC_{a_r}}{mU} \\ -2 \frac{aC_{a_f} - bC_{a_r}}{I_z U} & -2 \frac{a^2 C_{a_f} + b^2 C_{a_r}}{I_z U} \end{bmatrix},$$

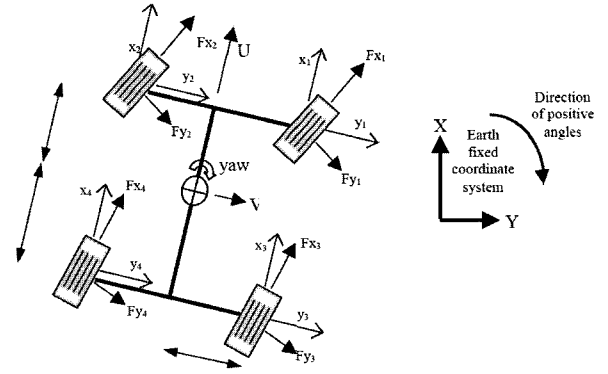


그림 2. 종방향과 횡방향 제어에 대한 차량의 개략도.

Fig. 2. A diagram showing the definition of the dimensions used to obtain vehicle lateral model.

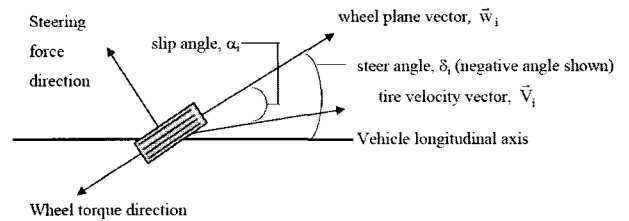


그림 3. 타이어의 미끄럼각 정의.

Fig. 3. A definition of the tire slip angle.

$$B^T = \begin{bmatrix} \frac{2}{m} \left(\frac{T_{nom,l}}{r} + C_{a_f} \right) & \frac{2a}{I_z} \left(\frac{T_{nom,l}}{r} + C_{a_f} \right) \\ \frac{2}{m} \left(\frac{T_{nom,r}}{r} + C_{a_r} \right) & -\frac{2b}{I_z} \left(\frac{T_{nom,r}}{r} + C_{a_r} \right) \\ 0 & -\frac{d}{I_z r} \\ 0 & \frac{d}{I_z r} \\ 0 & -\frac{d}{I_z r} \\ 0 & \frac{d}{I_z r} \end{bmatrix}$$

여기서 m , U , δ_i 는 각각 차량 무게, 차량 종방향 속도, 조향 입력이다. 또, a , b 는 무게중심으로부터 차량의 앞, 뒤축까지의 종방향 길이, r 은 타이어의 유효 반지름, d 는 각 바퀴에서 차 중심선까지의 거리, θ 는 차량의 요오(yaw) 각, I_z 는 z -축에 대한 관성모멘트, C_{a_f} , C_{a_r} 은 전륜, 후륜 코너링 강성(stiffness), $T_{nom,f,r}$ 는 앞, 뒤 타이어에 의해 생성되는 공칭 토크, 그리고 ΔT_i 는 i^{th} 타이어의 제어토크 입력이다. 만약 위 모델에서 토크 입력이 무시되면, 기존의 차량의 선형 상태공간 모델과 일치한다[16-18, 21]. 횡 운동과 요 운동에 대한 각각의 운동을 독립적으로 제어함으로써 원하는 운동 특성을 얻을 수 있다.

2. 수평천이, 사선, 선회 3개의 모드에 따른 입력 정의

CCV 자동차에서의 작동모드는 ‘네거티브(negative), 중립(neutral), 포지티브(positive)’의 3가지로 운용된다. 즉, 저속에서는 후륜이 전륜의 방향과 반대로 돌아가는 네거티브

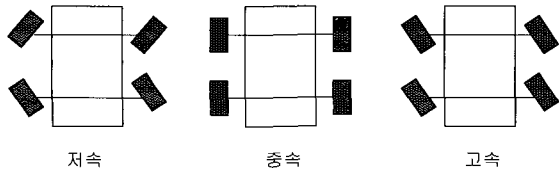


그림 4. CCV 자동차의 작동모드.
Fig. 4. The operate modes of vehicle.

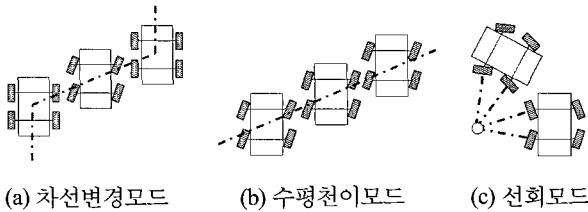


그림 5. 자동차의 새로운 운동 모드.
Fig. 5. CCV modes of the vehicle.

모드($\delta_f = -\delta_r = \alpha$), 보통의 속도에서는 후륜의 방향이 직선 또는 중립을 유지하는 중립모드($\delta_f = \delta_r = 0$), 고속에서는 후륜의 방향이 전륜과 같은 방향으로 돌아가는 포지티브 모드($\delta_f = \delta_r = \alpha$)로 운용된다.

그림 4의 각 작동모드들을 적절하게 운용함으로써 그림 5에 도시된 다음과 같은 새로운 운동을 가능하게 한다.

2.1 차선변경모드

차체가 수평을 유지하면서 요각을 변화시켜 차량의 경로를 변화시키는 모드

$$\delta_f = \delta_r = 0 \rightarrow \delta_f = \delta_r = \alpha \rightarrow \delta_f = \delta_r = 0 \quad (9)$$

2.2 수평천이모드

차체가 요각만 변화시킨 후 직진할 수 있는 모드

$$\delta_f = \delta_r = \alpha \quad (10)$$

2.3 선회 모드

전륜과 후륜을 다른 방향으로 조향함으로써 작은 회전반경으로 선회하는 모드

$$\delta_f = -\delta_r = \alpha \quad (11)$$

IV. 비행체의 다중모드에 대한 고유구조 지정기법

다음과 같이 주어지는 시불변 다변수 가제어 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) \quad (12)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (13)$$

여기서 $x(t)$, $u(t)$, $y(t)$ 는 각각 n , m , r 차원의 시스템 상태벡터, 제어입력, 그리고 출력 벡터이다. F , G , C 는 각각 시스템행렬, 입력행렬, 그리고 출력행렬이다. 이 시스템에 대한 제어입력은 다음과 같다.

$$u = G_{ff}u_m + G_{fb}y \quad (14)$$

여기서 G_{ff} 와 G_{fb} 는 각각 앞먹임 이득 행렬과 최적 되먹임 이득 행렬이다. 그림 8에서 되먹임 제어 이득 행렬 G_{fb} 는 고유구조 지정기법(eigenstructure assignment method)에 의해서 결정되고, 앞먹임 이득 행렬 G_{ff} 는 명령 생성 추종(command generator tracker)에 의해서 구해진다. 시스템 (12), (13)에 제어입력 (14)가 인가되면, 기준입력 u_m 을 추종하는 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{x}(t) = (F + GG_{fb}C)x(t) + GG_{ff}u_m \quad (15)$$

1. 출력 되먹임 고유구조 지정기법

우 고유구조 지정기법(고유치와 우 고유벡터의 동시 지정) 기법은 시스템 내부에서 외란 또는 모드 분리에 관계하므로 이러한 성질을 바탕으로 외란 분리 문제, 비행체의 모드 분리 문제 및 항공기 또는 유연(flexible) 우주구조물의 진동 억제 문제 등에 폭넓게 사용되어 왔다. 반면에, 시스템의 좌 고유구조는 제어력의 전달 능력과 외란의 억제 능력을 지배하므로 이를 바탕으로 제어력의 효과적인 전달 능력과 외란의 억제 능력을 동시에 요구하는 제어기 설계에 사용되어왔다. Andry 등[6]은 일반적인 비행체 제어 설계에 고유구조 지정기법을 사용하였다. Sobel과 Shapiro[4]는 분해된 비행체 운동을 획득하기 위해서 고유구조 지정기법을 사용하였다. 또한 Sobel과 Shapiro[3]는 고유구조 지정기법을 이용하여 다중모드 비행제어 시스템 설계에 응용하였다. 일반적인 외란 분리, 외란 억제, 제어효과 극대화 문제에서는 최소자승의 관점에서 고유구조 지정기법을 설계하는 것과 달리, 모드 분리 문제에 있어서는 고유벡터의 방향성에 관련된 성질보다는 고유벡터의 특징요소를 정확하게 지정하는 것이 요구된다. 모드 분리를 위한 고유벡터 지정기법을 자세히 기술하면 다음과 같다.

요구되는 고유치의 상이한 공액복소수의 집합 $\{\lambda_i\}$, $i=1, 2, \dots, r$ 과 이 고유치에 대응되는 요구되는 고유벡터 $\{\phi_i^a\}$, $i=1, 2, \dots, r$ 이 주어질 때, 페루프 시스템 $F + GG_{fb}C$ 의 r 개의 고유치가 상이한 공액복소수 $\{\lambda_i\}$ 로 정확히 지정되고, 페루프 시스템 $F + GG_{fb}C$ 의 대응되는 고유벡터가 공액복소수 집합 $\{\phi_i^a\}$ 의 각각의 요소에 가깝게 지정하는 $m \times r$ 의 실수 행렬 G_{fb} 를 구한다.

이는 출력 되먹임 이득을 사용한 모드 분리 문제이다. 여러 참고문헌[22-25]에서, 고유벡터 ϕ_i 가 $(F - \lambda_i I)^{-1}G$ 의 칼럼(column)에 확장된 부분집합, 즉 획득가능공간(achievability)에 놓여있으면, 고유벡터는 정확히 지정가능함을 제시하였다. 그러나 Andry 등[6]이 제시한 방법은 일부 시스템에서 선택된 고유벡터가 획득가능공간에 놓여있더라도 출력 되먹임 이득을 통해서 요구되는 고유벡터를 지정하지 못하는 문제가 발생되었기 때문에, 본 연구에서는 일반적인 고유구조 지정기법(general eigenstructure assignment)을 통해서 모드 분리를 수행하도록 한다. 다음의 정리는 중복된 고유치를 가지는 시스템에 대한 일반적인 고유구조 지정기법을 기술한다. 먼저 다음의 행렬을 정의한다.

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p], \Psi_0 = [\Psi_{p+1}, \Psi_{p+2}, \dots, \Psi_s] \\ W_0 &= [W_1, W_2, \dots, W_p], Z_0 = [Z_{p+1}, Z_{p+2}, \dots, Z_s] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 Φ_i 는 다음과 같은 형태를 갖는 $n \times d_i$ 부분행렬이다.

$$\Phi_i = [\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{id_i}] \quad (17)$$

그리고 행렬 Ψ_i, W_i 와 Z_i 도 같은 형태를 가진다.

정리 1 [26]: $A = A_1 \cup A_2$ 으로 주어졌을 때, $A_1 = \{\lambda_1, \dots, \lambda_p\}$ 과 $A_2 = \{\lambda_{p+1}, \dots, \lambda_s\}$ 은 대칭이고 $\sum_{i=1}^p d_i = r$, $\sum_{i=p+1}^s d_i = n - r$ 이라고 하자. 만약 $A = A_1 \cup A_2$ 에 다음 두 조건을 만족하는 벡터 $\phi_{ij}, i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, d_i$ 와 $\psi_{ij}, i = p+1, \dots, s, j = 1, \dots, d_i$ 가 존재하면, 페루프 시스템 $F + GG_p C$ 이 고유치 집합 Λ , 대응되는 일반화된 우 고유벡터와 좌 고유벡터 ϕ_{ij} 와 ψ_{ij} 를 가지도록 지정하는 실수 행렬 G_p 가 존재한다.

조건 1: $\Psi_0^T \Phi_0 = 0$

조건 2: $C\Phi_0$ 가 full 랭크이고, $\lambda_i = \lambda_k^*$ 가 공액복소수 관계를 가지면, 이에 대응하는 고유벡터들도 $\phi_{ij} = \phi_{kj}^*$ 와 같은 공액복소벡터 관계를 가져야 한다. 여기서,

$$[F - \lambda_i I \mid G] \begin{bmatrix} \phi_{ij} \\ - \\ w_{ij} \end{bmatrix} = \phi_{ij-1} \quad (18)$$

$$[F^T - \lambda_i I \mid C^T] \begin{bmatrix} \psi_{ij} \\ - \\ z_{ij} \end{bmatrix} = \psi_{ij+1} \quad (19)$$

여기서, $\phi_{i0} = \psi_{id_i+1} = 0$.

정리 1을 만족하는 출력 되먹임 이득행렬 G_p 를 구하는 과정을 기술하면 다음과 같다.

먼저 $i = 1, \dots, p, k = p+1, \dots, s$ 대해서 다음의 식을 정의한다.

$$[F - \lambda_i I \mid G][S_i \mid N_i] = [I \mid O] \quad (20)$$

$$[F^T - \lambda_k I \mid G][\bar{S}_k \mid \bar{N}_k] = [I \mid O] \quad (21)$$

여기서 $N_i \in C^{(n+m) \times m}, S_i \in C^{(n+m) \times n}, \bar{N}_k \in C^{(n+r) \times r}, \bar{S}_k \in C^{(n+r) \times n}$.

(20), (21)을 만족하는 최대 랭크 행렬 N_i, S_i, \bar{N}_k 와 \bar{S}_k 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$N_i = \begin{bmatrix} N_{1i} \\ N_{2i} \end{bmatrix}, \quad S_i = \begin{bmatrix} S_{1i} \\ S_{2i} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\bar{N}_k = \begin{bmatrix} \bar{N}_{1k} \\ \bar{N}_{2k} \end{bmatrix}, \quad \bar{S}_k = \begin{bmatrix} \bar{S}_{1k} \\ \bar{S}_{2k} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$i = 1, \dots, p, k = p+1, \dots, s$ 에 대해서 다음과 같이 일반화된 우 및 좌 고유벡터를 구성한다.

$$\phi_{ij} = S_{1i} \phi_{ij-1} + N_{1i} p_{ij}, \quad j = 1, \dots, d_i \quad (24)$$

$$\psi_{ki} = \bar{S}_{1k} \psi_{ki+1} + \bar{N}_{1k} p_{ki}, \quad j = 1, \dots, d_k \quad (25)$$

여기서 $\phi_{i0} = \psi_{kd_k+1} = 0$ 과 $p_{ij}(i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, d_i)$ 는 일반화된 출력 되먹임 정리의 조건과 원하는 고유벡터를 만족하도록 선택한다.

다음 식과 같이 연쇄벡터를 계산하고, 행렬 W_0 를 구성한다.

$$w_{ij} = S_{2i} \phi_{ij-1} + N_{2i} p_{ij}, \quad i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, d_i \quad (26)$$

$$W_0 = [w_{11} \mid \dots \mid w_{ij} \mid \dots \mid w_{pd}] \quad (27)$$

마지막으로 출력 되먹임 이득 행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$G_p = W_0(C\Phi_0)^{-1} \quad (28)$$

모드 분리(mode decoupling) 문제에 대해서는 우 고유벡터만 고려된다. 그러므로 원하는 우 고유벡터의 구조를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\phi_{ij}^d = [\phi_{ij}, x, x, x, x, \phi_{ik}, x, x, x, \phi_{ij}]^T \quad (29)$$

여기서, ϕ_{ij} 는 설계자가 명시한 요소들이고, x 는 명시하지 않은 요소들이다. 그러면, 선형조합계수벡터 p_{ij} 는 원하는 고유벡터의 명시된 요소만 만족시키도록 선택하면 된다. 이 때, 고유구조 지정 설계에 이용가능한 자유도는 다음 정리와 같이 주어진다.

정리 2 [22]: 시스템 (C, A, B) 에 대해서 $\max(m, r)$ 개의 고유치가 정확히 지정가능하다. $\max(m, r)$ 개의 고유벡터 또는 쌍대성에 의한 상호(reciprocal) 벡터는 각 벡터의 $\min(m, r)$ 개의 요소가 부분적으로 지정가능하다.

정리 2에서 m 과 r 은 각각 입력행렬 B 와 출력 행렬 C 의 차원을 나타낸다. 출력 되먹임을 사용하는 경우 좌 · 우 페루프 고유벡터 사이의 일정한 수직조건을 희생한다면 $\max(m, r)$ 개 보다 더 많은 페루프 고유치를 지정할 수 있는 자유도를 가지는 것도 가능하다. 고유벡터의 경우에는 고유벡터의 $\min(m, r)$ 개의 요소보다 더 많이 지정하기 위해서는 허용가능한 고유벡터의 공간이 어떤 확실한 영역에 따라 정확히 선택되어야 한다. 이것은 원하는 고유벡터를 허용가능한 고유벡터의 부분공간에 투영(projection)함으로써 얻어질 수 있다. 허용가능한 고유벡터의 부분공간은 페루프 고유치의 구체적인 선택에 따라 상태와 입력 행렬의 함수로 구성된다[23-25]. 상태 되먹임의 경우는 N 개의 고유치와 이에 대응하는 고유벡터의 m 개의 요소를 정확히 지정할 수 있다.

2. 명령 생성 추적기

원하는 경로를 추종하기 위한 앞먹임 이득 행렬 G_{ff} 를 구하는 과정은 다음과 같다. 차량의 원하는 거동을 나타내는 확정 모델을 다음과 같이 가정한다.

$$\dot{x}_m = F_m x + G_m u_m \quad (30)$$

$$y_m = C_m x + D_m u_m \quad (31)$$

차량의 제어되는 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$y_i = T x \quad (32)$$

차량 횡방향 제어의 목적은 제어되는 차량의 변수가 확정모델의 출력에 최대한 가깝도록 제어하는 것이다. 명령 생성 추적기를 간략히 요약하면 다음과 같다.

먼저 어떤 시간 $t = t_0$ 에서 $y_i = y_m$ 이라고 하자. 그리고 모든 시간 $t > t_0$ 에 대해서 $y_i = y_m$ 을 보장하는 차량의 입력을 u^* 이라고 하자. 또한 x^* 와 u^* 는 각각 대응되는 차량 상태, 이상적인 차량 입력이라고 하면, 다음과 같이 차량의 상태방정식을 만족한다.

$$\dot{x}^* = F x^* + G u^* \quad (33)$$

$$y^* = C x^* \quad (34)$$

$$y_i^* = T x^* \quad (35)$$

이상적인 차량의 제어 변수는 위 모델의 출력과 같다. 따라서,

$$y_i = y_m \quad (36)$$

x^* 와 u^* 는 다음과 같이 주어진다고 가정한다.

$$x^* = V_{11} x_m + V_{12} u_m + \text{HOD}(u_m) \quad (37)$$

$$u^* = V_{21} x_m + V_{22} u_m + \text{HOD}(u_m) \quad (38)$$

여기서 x^* 와 u^* 는 확정 모델의 상태와 입력에 대해서 선형이다. 행렬 V_{ij} 와 $\text{HOD}(\cdot)$ 는 상수와 고차항으로 가정한다. 만약 모델의 입력을 스텝입력으로 제한한다면, u_m 은 스텝함수, 모든 $t > t_0$ 에 대해서 $\text{HOD}(u_m) = 0$ 이다. 차량제어 문제에 있어서, u_m 은 간단히 운전자의 명령이다. 이 경우 이상적인 차량의 상태와 입력은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} x^* \\ u^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ u_m \end{bmatrix} \quad (39)$$

따라서, u_m 이 스텝함수일때 이상적인 차량의 입력 u^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$u^* = V_{21} x_m + V_{22} u_m \quad (40)$$

여기서

$$\begin{aligned} V_{11} &= \Omega_{11} V_{11} F_m + \Omega_{12} C_m \\ V_{12} &= \Omega_{11} V_{11} G_m + \Omega_{12} D_m \\ V_{21} &= \Omega_{21} V_{11} F_m + \Omega_{22} C_m \\ V_{22} &= \Omega_{21} V_{11} G_m + \Omega_{22} D_m \end{aligned} \quad (41)$$

그리고 Ω_{ij} 는 다음과 같이 주어진다[26].

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & G \\ H & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (42)$$

차량제어 문제는 차량 제어변수가 운전자의 명령을 추종하도록 하는 것이다. 이것은 차량의 거동을 나타내는 확정 모델을 단위 모델(identity model)로 선택함으로써 가능해진다. 이 모델의 출력은 입력과 같다. 즉,

$$y_m = u_m \quad (43)$$

그러므로, 이 모델의 출력 y_m 은 운전자 명령 u_m , 즉 차량 궤적의 제어변수 y_i 이다.

차량의 거동을 나타내는 단위모델은 다음과 같이 기술된다.

$$F_m = 0, G_m = 0, C_m = 0, D_m = I \quad (44)$$

(41)과 (44)를 이용하면,

$$\begin{aligned} V_{11} &= 0 \\ V_{12} &= \Omega_{12} \\ V_{21} &= 0 \\ V_{22} &= \Omega_{22} \end{aligned} \quad (45)$$

그리고, 단위 차량 상태와 입력은 다음과 같다.

$$x^* = \Omega_{12} u_m \quad (46)$$

$$u^* = \Omega_{22} u_m \quad (47)$$

위 식에 의하면 단위 차량 상태 x^* 와 단위 차량 입력 u^* 는 운전자 명령 u_m 과 앞먹임 이득 Ω_{12} 와 Ω_{22} 에만 의존한다. 또한, Ω_{12} 와 Ω_{22} 는 차량 행렬 F 와 G , 그리고 추종행렬 T 에 의해 결정된다.

앞서 기술한 출력 되먹임과 결합하기 위해서 다음의 상태들을 정의한다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x - x^* \\ \bar{u} &= u - u^* \\ \bar{y} &= y - y^* \end{aligned} \quad (48)$$

그러면, 위 상태들로 이루어진 시스템은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\bar{x}} = F \bar{x} + G \bar{u} \quad (49)$$

$$\bar{y} = C \bar{x} \quad (50)$$

(46)과 (47)에 대한 되먹임 이득은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{u} = G_{fb} \bar{y} = G_{fb}(y - y^*) \quad (51)$$

또는

$$\begin{aligned} u &= u^* + \bar{u} \\ &= u^* + G_{fb}(y - y^*) \\ &= u^* + G_{fb} C(x - x^*) \end{aligned} \quad (52)$$

(42)와 (43)을 (52)에 대입하면 다음과 같다.

$$u = [\Omega_{22} - G_{fb} C \Omega_{12}] u_m + G_{fb} y \quad (53)$$

앞먹임 계인은 앞서 기술한 고유구조 지정기법으로 계산된 되먹임 이득에 따라 결정된다. 최종적으로 위의 앞먹임과 되먹임으로 구성되는 페루프 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [F + GG_{fb}C]x(t) + G[\Omega_{22} - G_{fb}C\Omega_{12}]u_m \\ &= Fx(t) + GG_{ff}u_m \end{aligned} \quad (54)$$

V. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서 제시한 제어기법의 설계과정 및 유용성과 타당성을 고찰하기 위하여 앞서 기술한 차량 횡방향 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} F &= \begin{bmatrix} 4.8627 & -29.1797 \\ -0.9382 & 7.1743 \end{bmatrix} \\ G &= \begin{bmatrix} -73.7465 & -62.3693 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -58.0596 & 84.3173 & -0.0012 & 0.0012 & -0.0012 & 0.0012 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

시뮬레이션에 사용된 변수값은 표 2와 같다.

페루프 시스템의 요구되는 고유치는 각각 $\Lambda^d = (-1, -3)$ 로 선정하였고, 원하는 우 고유벡터는 횡방향 속도와 요변화율을 분리하기 위해서 다음과 같이 선정하였다.

$$\phi^d = \begin{bmatrix} \times & 0 \\ 0 & \times \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, 상태변수를 분리하기 위해서는 각 고유벡터의 0인 부분을 정확하게 지정해야하고, \times 는 크기에 상관없다. 그러나, \times 의 크기는 고유벡터 민감도[27]에 영향을 끼치기 때문에 민감도를 최소화하는 값으로 설정되었다.

위의 설계조건을 만족하는 되먹임 이득은 다음과 같다.

$$G_{fb} = \begin{bmatrix} -0.0443 & 0.1856 \\ -0.0416 & 0.2484 \\ +0 & -0 \\ -0 & +0 \\ +0 & -0 \\ -0 & +0 \end{bmatrix}$$

표 2. 시뮬레이션에 사용된 변수값[20].

Table 2. The parameter values of a vehicle.

변수	값	단위
m	1670	kg
I_z	2100	kg · m ²
a	0.99	m
b	1.7	m
C_{a_f}	-61595	N/rad
C_{a_r}	-52095	N/rad
$T_{norm, f}$	5	kg · m ² /sec ²
$T_{norm, r}$	5	kg · m ² /sec ²
r	0.3	m
d	0.76	m

여기서, ± 0 은 10^{-7} 이하의 극히 작은 값을 나타내며, 각 값은 부호에 따라서 양과 음으로 표시하였다. 되먹임 제어 입력 $u(t)$ 에 대한 페루프 시스템 (7)의 응답을 모든 초기조건을 0으로 가정하고 모드 분해(modal decomposition)를 이용하여 제어대상이 되는 상태변수에 대하여 분해하면 다음과 같다.

$$y(t) = C\phi^a \int_0^t e^{\Lambda^a(t-\tau)} \{ \psi^a{}^T GG_{ff} u(\tau) \} d\tau \quad (55)$$

여기서, ϕ^a , ψ^a , Λ^a 와 GG_{ff} 는 각각 페루프 시스템의 우 고유벡터, 좌 고유벡터, 고유값, 그리고 입력행렬이다. 또한, 운전자의 입력을 나타내는 확정모델은 앞서 기술한 바와 같이 단위 모델(identity model)로 선택하였다. 제어기 설계 조건을 만족하는 변환행렬 T , Ω_{12} , Ω_{22} , 그리고 앞먹임 이득은 다음과 같다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Omega_{12} = \begin{bmatrix} 1.0000 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Omega_{22} = \begin{bmatrix} 0.0357 & -0.2046 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0357 & -0.2260 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & -0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & -0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G_{ff} = \begin{bmatrix} -0.0086 & -0.0190 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0059 & 0.0225 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

6개의 입력에 대해서 4WS에 관해서 제어기를 설계하고, 수평천이모드, 사선모드, 선회모드에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 입력에 대한 제어기는 위의 고유구조 지정기법과 명령생성추종기법을 사용하였다. 또한 기존의 모드분해를 고려하지 않은 고유구조 지정기법과 명령생성추종기법에 대한 시뮬레이션 결과와 비교하여 제시하였다.

차선변경모드와 수평천이모드에서는 고속에서 전륜과 후륜이 각각 같은 방향으로 움직이고, 선회모드에서는 저속에서 반대방향으로 움직이므로 다음과 같이 시나리오를 구성하였다. 차선변경모드에서는 주행 중, 5초에서 10초 사이에 횡방향속도와 요변화율을 각각 1m/sec와 1rad/sec로 변화시킨 것으로 설정하였다. 수평천이모드에서는 모든 시간에서 횡방향속도와 요변화율을 각각 1m/sec와 1rad/sec로 고정하였다. 선회모드에는 횡방향속도와 요변화율을 각각 1m/sec와 1rad/sec로 유지한 상태로 전륜과 후륜을 반대방향으로 조향하였다. 선회모드에서는 전륜과 후륜이 반대방향이므로 입력행렬의 후륜입력의 부호가 반대부호로 바뀌게 되므로 되먹임입력과 앞먹임 입력 또한 반대부호로 다음과 같이 바뀐다.

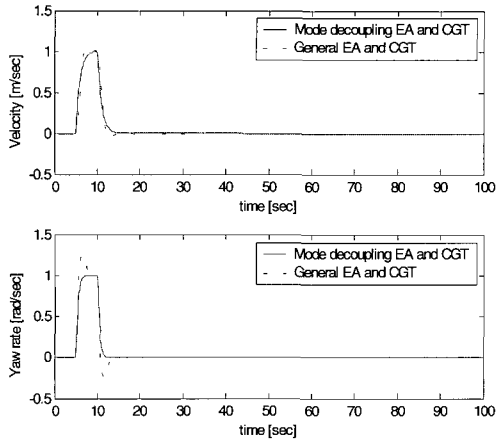


그림 6. 차선변경모드의 출력 응답.
Fig. 6. The output responses of lane change mode.

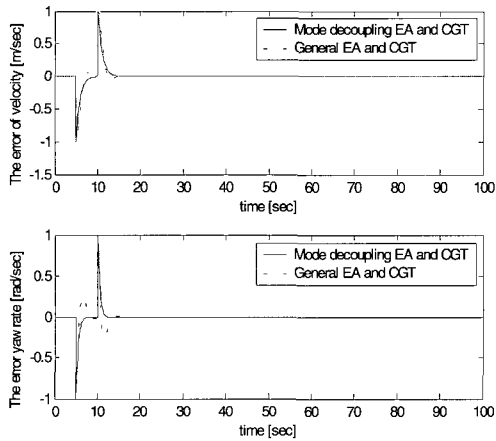


그림 7. 차선변경모드의 오차.
Fig. 7. The output errors of lane change mode.

$$G_{fb} = \begin{bmatrix} -0.0443 & 0.1856 \\ 0.0416 & -0.2484 \\ +0 & -0 \\ -0 & +0 \\ -0 & +0 \\ +0 & -0 \end{bmatrix}$$

$$G_{ff} = \begin{bmatrix} -0.0086 & -0.0190 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0059 & -0.0225 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0 & +0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & -0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

그림 6은 차선변경모드의 출력응답을 나타낸다. 실선은 모드 분해 고유구조 지정기법과 명령생성추종기법의 결과를 나타내고, 점선은 모드 분해를 고려하지 않은 일반적인 고유구조 지정기법과 명령생성추종기법의 결과를 나타낸다. 각각 모드 분해 고유구조 지정기법을 적용하였을 때 기준 입력을 더 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 차선변경모드의 기준입력에 대한 출력의 오차를 나타낸다. 오차의 크기는 본 논문에서 제시한 기법이 더 작으며, 기준입력을 추종한 후에는 발생하지 않는다. 그림 8은 차선변경모드의 입력을 나타낸다. 입력 또한 본 논문에서 제시한 기법이 크

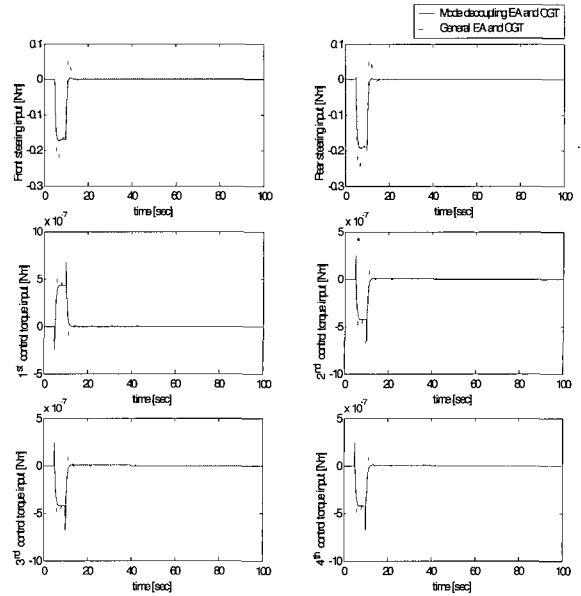


그림 8. 차선변경모드의 입력.
Fig. 8. The inputs of lane change mode.

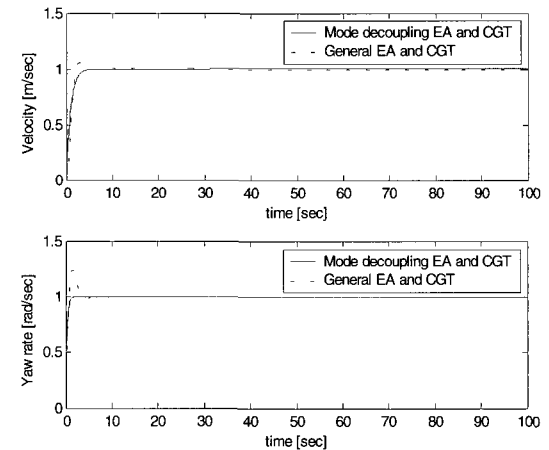


그림 9. 수평천이모드의 출력 응답.
Fig. 9. The output responses of lateral translation mode.

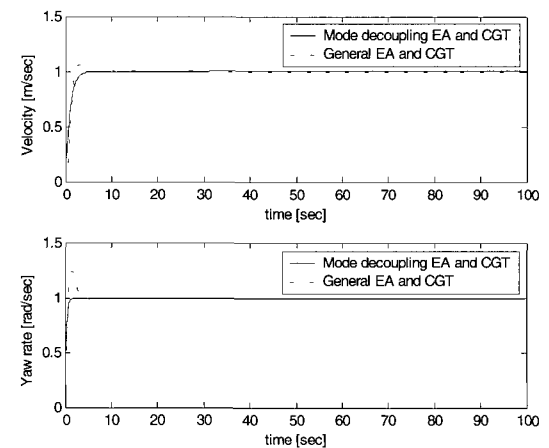


그림 10. 선회모드의 출력 응답.
Fig. 10. The output responses of rotation mode.

기가 작은 것을 볼 수 있다.

수평천이와 선회모드 또한 차선변경모드의 결과와 유사하게 나타났다. 그림 9와 10은 수평천이와 선회모드의 출력 응답을 도시한 것으로서 기존의 고유구조 지정기법과 비교한 결과를 같이 도시하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 기존의 CCV 비행체 제어기술에서 운동분리를 위해 널리 사용되었던 고유구조 지정기법을 중심으로 하여 자동차 모델의 운동분리에 대한 제어알고리즘을 연구하였다. CCV 비행체뿐만 아니라 자동차 모드 또한 여러 개의 제어타면의 복합적인 제어로 구현가능하므로 차량 운동 분리 및 다변수 제어 개념이 적용되어 다중 명령이 여러 개의 제어타면을 통해 이루어지도록 하였다.

본 논문의 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저 조향입력 뿐만 아니라 제어토크 입력이 가능한 차량 횡방향 동역학 모델을 선정하여 4개의 입력을 독립적으로 조정가능하도록 차량 횡방향 동역학을 모델링하고, CCV 개념에 기반하여 새로운 운동모드를 정의하였다. 그리고, 비행체 능동 제어기술에 적용되었던 비행체 다중모드 고유구조 지정기법을 활용하여 차량 횡방향 모델에서 횡방향속도와 요변화율을 분리하고, 명령생성추종기법을 사용하여 명령입력을 상태변수가 추종하도록 하였다. 고유구조 지정기법을 사용하여 종향방속도와 요변화율을 분리하여 두 상태변수가 서로 연관되지 않게 하였으므로, 사용자의 명령입력을 정확히 추종하게 된다.

참고문헌

- [1] 金井喜美雄, フライトコントロール, 横書店, 1986년.
- [2] G. M. Siouris, J. G. Lee, and J. W. Choi, "Design of a modern pitch pointing control system," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 730-738, April 1995.
- [3] K. M. Sobel and E. Y. Shapiro, "Eigenstructure assignment for design of multimode flight control systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 9-15, May 1985.
- [4] K. M. Sobel and E. Y. Shapiro, "A design methodology for pitch pointing flight control systems," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 8, no. 2, pp. 181-187, March-April 1985.
- [5] 김도현, 김유단, "고성능 항공기의 CCV 비행운동을 위한 앞막입/뒤막입 이득의 최적화," *한국항공우주학회지*, 제23권, 제2호, pp. 96-103, 1995.
- [6] A. N. Andry, E. Y. Shapiro, and J. C. Chung, "Eigenstructure assignment for linear systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 19, pp. 711-729, 1983.
- [7] P. Kachroo and M. Tomizuka, "Vehicle control for automated highway systems for improved lateral maneuverability," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1, pp. 777-782, October 1995.
- [8] N. Matsumoto, H. Kuraoka, and M. Ohba, "An experimental study on vehicle lateral and yaw motion control," *International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 113-118, vol. 1, 1991.
- [9] A. Alleyne and M. DePoorter, "Lateral displacement sensor placement and forward velocity effects on stability of lateral control of vehicles," *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 3, pp. 1593-1597, 1997.
- [10] J. Y. Wang and M. Tomizuka, "Reachability analysis of hybrid lateral control problem for automated heavy-duty vehicles," *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, vol. 1, pp. 1-6, 2001.
- [11] J. H. Park and Y. S. Kim, "Decentralized variable structure control for active suspensions based on a full-car model," *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 383-387, 1998.
- [12] 장주섭, 이상호, "승용차의 차량 롤 제어를 위한 시스템 구현," *한국자동차공학회논문집*, 제5권, 제5호, pp. 20-26, 1997.
- [13] 이장무, 윤중락, 강주석, 배상우, 탁태오, "롤 운동을 고려한 차량의 정상상태 선회주행에 관한 연구," *한국자동차공학회논문집*, 제5권, 제6호, pp. 89-102, 1997.
- [14] L. Segel, "Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control," *Proceedings of the Automobile Division of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 7, pp. 310-330, 1956.
- [15] D. W. Whitcomb and W. F. Milliken, "Design implications of a general theory of automobile stability and control," *Automobile Division, The Institute of Mechanical Engineers*, pp. 83-107, 1956.
- [16] A. B. Will and S. W. Zak, "Modeling and control of an automated vehicle," *Vehicle System Dynamics*, no. 27, pp. 131-155, 1997.
- [17] Y. H. Cho and J. Kim, "Stability analysis of the human controlled vehicle moving along a curved path," *Vehicle System Dynamics*, no. 25, pp. 51-69, 1996.
- [18] A. Alleyne, "A comparison of alternative obstacle avoidance strategies for vehicle control," *Vehicle System Dynamics*, no. 27, pp. 371-392, 1997.
- [19] H. Dugoff, P. S. Fancher, and L. Segel, "An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamics performance," *SAE Transactions 79 (SAE Paper No 700377)*, pp. 341-366, 1970.
- [20] A. Alleyne, "A comparison of alternative intervention strategies for Unintended Roadway Departure (URD) control," *Vehicle System Dynamics*, no. 27, 157-186,

1997.

[21] D. E. Smith and J. M. Starkey, "Effects of model complexity on the performance of automated vehicle steering controllers: Model development, validation and comparison," *Vehicle System Dynamics*, no. 24, pp. 163-181, 1995.

[22] J. W. Choi, "A simultaneous assignment methodology of right/left eigenstructures," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 625-634, April 1998.

[23] J. W. Choi and Y. B. Seo, "LQR design with eigenstructure assignment capability," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 700-708, April 1999.

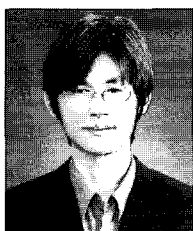
[24] 최재원, 이장규, "동시고유구조 지정법 및 비행제어 시스템에서의 응용," 한국항공우주학회지, 제23권, 제6호, pp. 147-158, 1995.

[25] 최재원, 이장규, 김유단, 강태삼, "상태퇴먹임에 의한 동시고유구조 지정 기법," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제1권, 제1호, pp. 4-12, 1995.

[26] B. H. Kwon and M. J. Youn, "Eigenvalue-generalized eigenvector assignment by output feedback," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 32, no. 5, pp. 417-421, 1987.

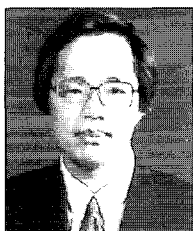
[27] M. J. O'Brien and J. R. Broussard, "Feedforward control to track the output of a forced model," *Proceedings of the 17th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1149-1155, 1978.

[28] Y. B. Seo and J. W. Choi, "Eigenstructure assignment for linear systems with probabilistic uncertainties," *KSMIE international journal*, vol. 18, no. 6, pp. 933-945, 2004.



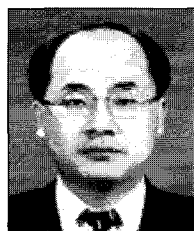
서 영 봉

1997년 부산대학교 기계설계공학과 졸업. 1999년 부산대학교 기계공학부 대학원 석사. 2003년 부산대학교 기계공학부 대학원 박사. 2004년~2005년 중국 하얼빈공대 PostDoc. 현재 부산대학교 기계공학부 대학원 PostDoc. 1998년 5월 부산대학교 대학원 공학계열 학술상 수상. 관심분야는 고유구조 지정 및 응용, 개방형 제어 플랫폼 응용, 수중로봇 복합항법 시스템 설계, 홈네트워크용 미들웨어 설계 등.



Duan Guang Ren

1983년 하얼빈공대 응용수학과 졸업. 1986년 하얼빈공대 제어시스템이론학과 석사. 1989년 하얼빈공대 제어시스템이론학과 박사. 1989년~1991년 하얼빈공대 PostDoc. 1991년~1996년 하얼빈공대 제어시스템이론학과 교수. 1996년 12월~1998년 3월 영국 University of Hull EPSRC 방문교수. 1998년 4월~2002년 10월 영국 University of Sheffield, Queen's University 방문교수. 2000년 8월~현재 Cheung Kong Scholars Program의 Yangzi Scholar 수상. 1994년~현재 IEEE Control Systems Society, Senior Member. 1998년~현재 Institute of Electrical Engineers(IEE), Fellow. 2001년 8월~현재 하얼빈공대 제어시스템이론학과 교수, 제어시스템 및 항법기술센터 소장. 관심분야는 전실제어, 고유구조 지정, Descriptor 시스템, 자기 배어링 제어 및 미사일 항법 및 제어 등.



최 재 원

1987년 서울대학교 제어계측공학 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 제어계측공학 석사. 1995년 서울대학교 대학원 제어계측공학 박사. 1995년 2월~3월 일본 NASDA/TKSC 방문 연구원. 1995년 9월~1996년 2월 미국 USC PostDoc. 1998년 1월~2월, 1999년 12월~2000년 1월 미국 LSU 방문 교수. 1999년 8월~현재 IFAC Technical Committee on Aerospace 및 Technical Committee on Linear Systems 위원. 2000년 1월~현재 IEEE Control Systems Society Conference Editorial Board, Associate Editor. 2000년 1월~현재 제어·자동화·시스템공학 논문지 편집위원. 대한기계학회 동역학 및 제어부분 운영위원. 1996년~현재 부산대학교 기계공학부 전임강사, 조교수, 부교수. 2000년 5월 한국과학기술단체총연합회 수여 제10회 과학기술우수논문상 수상. 2003년 8월~현재 미국 MIT 방문 교수. 관심분야는 네트워크 차량의 통신, 항법 및 유도제어와 ITS에의 응용, 초소형 비행체의 항법 및 유도제어, 다중표적 추적필터 설계, 고장진단기반 제어기 재구성 등.