

위성항법시스템을 이용한 연결식 차량의 잭나이핑 현상 예방을 위한 축소차수 상태관측기 설계

Reduced Order Luenberger State Observer Design for the Jackknifing Phenomenon Prevention of Articulated Vehicles using GPS

이 병 석*, 허 문 범
 (ByungSeok Lee¹ and Moon-Beom Heo¹)
¹Korea Aerospace Research Institute

Abstract: This paper deals with ROLSO (Reduced Order Luenberger State Observer) design to prevent jackknifing phenomenon of articulated vehicles consisting of the tractor and semi-trailer by using GPS. In addition, by applying the regulator system using ROLSO feedback system, simulation's result presents that articulated vehicle's states are stabilized than the human's PR time (Preception Response time) rapidly. This simulation verifies that the automatic control of articulated vehicle's can be applied for the accident prevention for the time that the driver is unable to manage with the sudden accident. For this simulation, by using the equation of planar motion, the modeling of the articulated vehicle was performed. This modeling was expressed in the state space model. And FOLSO (Full Order Luenberger State Observer), ROLSO were designed by using the state space model of an articulated vehicle's dynamics.

Keywords: GPS (Global Positioning System), FOLSO (Full Order Luenberger State Observer), ROLSO (Reduced Order Luenberger State Observer), equation of planar motion, jackknifing phenomenon, articulated vehicle

NOMENCLATURE

m_t	tractor's mass
m_{st}	semitrailer's mass
I_t	inertial moment of the tractor
I_{st}	inertial moment of the semitrailer
a_1	dist. from tractor's c.g. to tractor's front axle
a_2	dist. from tractor's c.g. to tractor's rear axle
b_1	dist. from semitrailer's c.g. to tractor's rear axle(5th wheel)
b_2	dist. from semitrailer's c.g. to semitrailer's rear axle
c_1	dist. from tractor's c.g. to the front axle
δ	steering angle of the front wheel
$\dot{\psi}_t$	yaw rate of at the c.g. of the tractor
$\ddot{\psi}_t$	yaw acceleration of at the c.g. of the tractor
$\dot{\psi}_{st}$	yaw rate of at the c.g. of the semitrailer
$\ddot{\psi}_{st}$	yaw acceleration of at the c.g. of the semitrailer
V_{tx}	the longitudinal velocity at the c.g. of the tractor
V_{stx}	the longitudinal velocity at the c.g. of the semitrailer

V_{ty}	the lateral velocity at the c.g. of the tractor
V_{sty}	the lateral velocity at the c.g. of the semitrailer
$\theta_{V_{1f}}$	angle that the velocity vector at the front wheel
$\theta_{V_{1r}}$	angle that the velocity vector at the rear wheel
$\theta_{V_{str}}$	angle that the velocity vector at the semitrailer's wheel
C_{tf}	cornering stiffness of tractor's front tire
C_{tr}	cornering stiffness of tractor's rear tire
C_{str}	cornering stiffness of semitrailer's tire
F_{tf}	lateral force of tractor's front tire
F_{tr}	lateral force of tractor's rear tire
F_{str}	lateral force of semitrailer's rear tire
F_{fw}	side force on 5th wheel by the Newton's third law

I. 서론

소량, 중량화물(heavy cargo) 운송에 적합한 자동차운송은 화물수송량을 증가시키고 특수한 형태의 적재물을 이동시키는 작업을 필요로 한다. 이를 위해 화물자동차의 동력부(tractor)에 의해 견인되는 여러 형태의 트레일러가 사용된다. 이 때, 트레일러(trailer)는 보통 형상에 따라 6가지로 나뉘어 평상식, 저상식, 중저상식, 스케레탈, 벤형, 오픈탑 트레일러로 구분된다[23]. 이를 크게 중저상형 세미트레일러(semitrailer), 플랫(flat)형 세미트레일러, 풀(full) 트레일러, 폴(pole) 트레일러로 분류할 수 있다[24]. 특히, 세미트레일러는 트레일러 하중의 일부를 트랙터가 부담하는 형태의 차량을 지칭한다. 그러므로 후방에만 타이어가 있으며, 전

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 4. 24., 수정: 2012. 5. 29., 채택확정: 2012. 6. 26.

이병석, 허문범: 한국항공우주연구원 위성항법팀

(bslee@kari.re.kr/hmb@kari.re.kr)

※ 본 논문은 기초기술연구회 “재난예방 및 국민안전제고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구”과제로 수행되었음.

방에는 5th(fifth) wheel이나 특수 연결장치 등(lunette ring, pintle hook, tow hitch, etc.)으로 연결된다.

이와 같이 트랙터와 트레일러 혹은 트랙터와 세미트레일러로 구성된 연결식 차량(articulated vehicle)은 장척화물(lengthy cargo)이나 중량화물을 운송하기에 적합하기 때문에 국내에서도 3축에서 6축 혹은 그 이상까지 다양한 축수의 조합으로 된 차량을 볼 수 있으며 2012년 2월 현재 세미트레일러를 포함한 트레일러 형태의 차량인 피견인차는 56,606대가 등록되어 있는 상황이다[21,23]. 이러한 연결식 차량들은 실려진 화물이 음료나 식수인 경우도 있지만 대개 항공유나 휘발유, 압축가스, 화공약품 등을 싣고 운행하는 차량들이므로 사고로 인한 도로상에서의 전복이나 트랙터와의 연결각 이상증대 현상과 같은 잭나이핑 현상(jackknifing phenomenon) 시 막대한 인명 및 재산 피해를 유발할 수 있다.

잭나이핑은 5th(fifth) wheel과 같은 연결부를 사이에 두고 견인차량(트랙터)과 피견인차량(세미트레일러)의 불안정한 상태를 의미하는데 크게 두 가지 형태가 존재하며 트랙터 잭나이핑(tractor jackknifing)과 트레일러 스윙(trailer swing)으로 나뉠 수 있다. 트랙터 잭나이핑은 급정지와 이어 나타나는 바퀴 잠김에 따른 방향 제어력 상실의 결과로 나타난다. 이와 달리 트레일러 스윙은 세미트레일러의 타이어가 견인력(traction)을 잃거나 연결부(5th wheel)에서 제어력을 상실하여 나타나는 현상을 말한다[3,22].

이러한 위험물을 운반하는 연결식 차량이 일으킬 수 있는 사고를 방지하기 위해 모델링과 제어에 대한 연구가 진행되어져 왔다. 그 예로 입/출력 선형화법(input/output linearization method)과 역진제어(backstepping control)를 이용하여 AHS (Automated Highway Systems)에서 연결식 차량의 조향(steering) 및 독립적인 제동제어(independent braking control)를 설계[1]하였으며, [2]는 4개의 조향축(four steerable axles)을 가진 연결식 차량이 도로의 곡률(road curvature)과 갑작스런 돌풍(sudden wind gust)에도 불구하고 제한적인 측면 편차(lateral deviation)를 보이는 강인제어(robust control)를 소개하고 있다. 또한, 잭나이핑에 대한 분석을 위해 [3]에서 연결식 차량의 가상 모형(virtual prototype)과 Kalman filter를 사용하여 트랙터-세미트레일러의 잭나이핑을 예측하고 감지하는 방법[4], PID 제어기와 MATLAB 및 ADAMS를 이용한 co-simulation 기법을 통한 차등제동 제어(differential-braking control)로 연결식 차량의 안정성 검증[5], 잭나이핑을 예방하기 위한 차등제동 제어를 위해 트랙터와 세미트레일러의 스케일 모델(scale model)과 모델참조 적응제어(MRAC: Model Reference Adaptive Control) 기술을 통한 실험[6] 등의 연구가 진행되었다.

이 외에도 연결식 차량의 사고를 예방하거나 줄이는 방법으로 피견인차량인 세미트레일러의 후방 타이어를 조향 가능하게 하는 방법이나 트랙터와 연결되어지는 접속부에 특별한 장치를 고안하는 방법[32,33], 그리고 차량의 속도와 미끄러짐을 감지해 브레이크와 엔진을 제어하는 전자식 주행안전 시스템(ESC: Electronic Stability Control)과 같은 기술을 통해 차량의 안정화를 향상시키고 있다.

하지만 이와 달리 현재 무상으로 항법 데이터를 제공하는 위성항법시스템(GNSS: Global Navigation Satellite System) 중 하나인 GPS (Global Positioning System)를 이용하여 연결식 차량(트랙터와 세미트레일러) 각각의 위치, 속도, 가속도와 각 차량들의 자세각, 자세각속도, 자세각가속도 등을 보다 정확하게 알 수 있다면 복잡한 전자식 장치 결합이나 고가의 부속물 장착 없이 위성 항법정보를 이용하여 차량을 더욱 안전하게 제어할 수 있으며, 향후 위험물 운반 차량과 같은 대형 차량의 관리·감독 활동이 원활할 것으로 예상된다.

한편, 본 논문은 차량 주행 시 갑작스런 전방 장애물 돌출이나 도로상의 이물질로 인한 급격한 연결식 차량의 자세 변화 등은 제외하고 있다. 다만 트랙터와 세미트레일러 각각의 초기 횡방향 속도 및 도리각속도(yaw rate)를 가정하여 이 값들이 “0” 값 근처로 안정화 되어 잭나이핑 현상이 일어나지 않도록 하는 상황에 대해 다루고 있다.

본 논문의 구성은 II 장에서 연결식 차량의 모델링을 통해 평면상의 운동방정식(equation of planar motion)을 유도하고 이 식을 상태변수들(state variables)에 관한 상태공간 모델(state space model)로 나타냈다. III 장은 연결식 차량의 상태를 관측할 수 있는 상태 관측기를 설계하는데 전차수 루엔버거 상태관측기(FOLSO: Full Order Luenberger State Observer)와 차수를 낮춘 축소차수 루엔버거 상태관측기(ROLSO: Reduced Order Luenberger State Observer)를 설계하고, IV 장과 V 장에서 축소차수 상태관측기와의 결합을 통한 상태피드백시스템(state feedback system) 형태를 갖는 조정기시스템(regulator system)의 MATLAB 시뮬레이션 결과를 통해 운전자의 인지반응시간 내의 제어 결과를 살펴볼 수 있다. 끝으로 부록에서는 상태방정식에 사용된 수식들의 주요 변수값과 주요 행렬들의 원소에 대한 수식을 나타내고 있다.

II. 연결식 차량 모델링

1. 트랙터-세미트레일러(tractor-semitrailer)

연결식 차량은 세미트레일러를 정차시키고 트랙터의 별도 운행이 가능하여 트랙터를 효율적으로 사용할 수 있으며, 복수개의 트레일러를 연결하여 물동량을 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. 그 형태는 적재되는 화물의 종류에 따라 3축에서 6축 혹은 그 이상까지 다양하게 존재하게 된다. 그림 1은 세미트레일러의 체원에서 국내 설계기준 자동차는 4축이므로 이에 의한 치수를 표기한 4축 연결식 차량

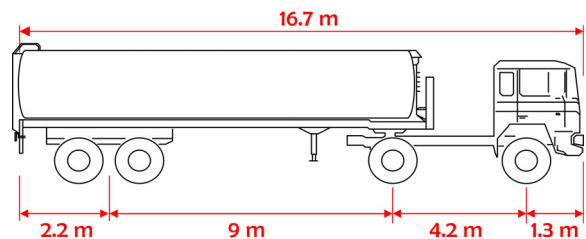


그림 1. 4축 연결식 차량 예시.

Fig. 1. 4-axes articulated vehicle.

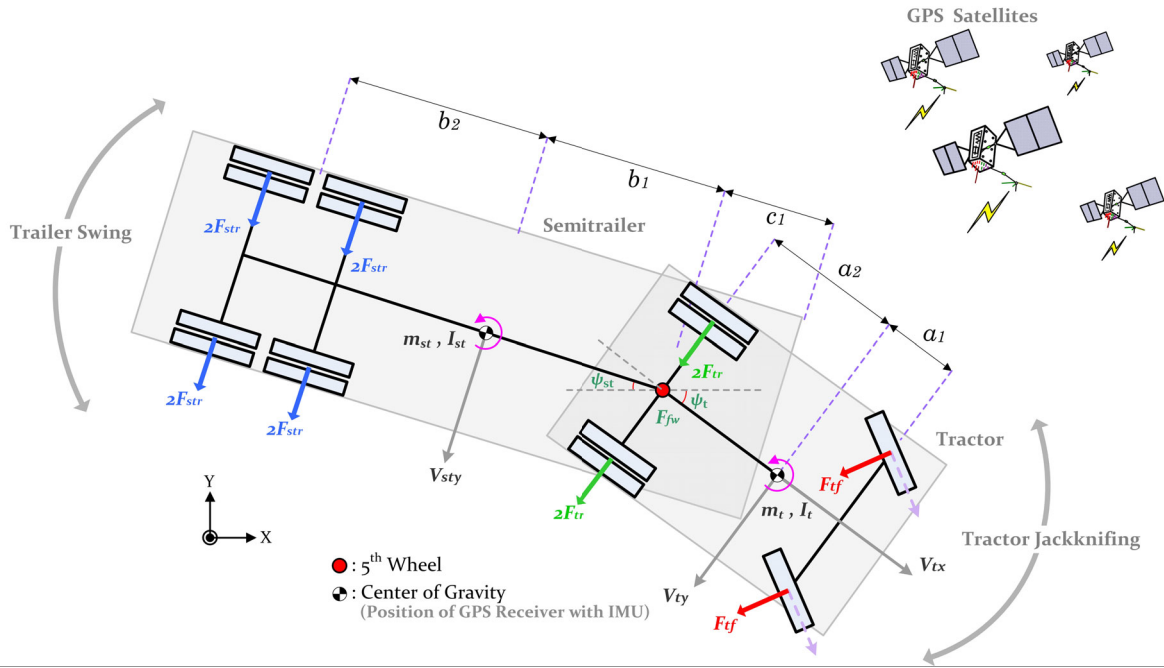


그림 3. 연결식 차량 모델.
Fig. 3. Model of an articulated vehicle (tractor-semitrailer).

Angular Momentum :

$$I_t \ddot{\psi}_t = 2a_1 F_{tf} - 4a_2 F_{tr} + c_1 F_{fw} \quad (8)$$

▶ 세미트레일러(semi trailer)의 운동방정식

Force :

$$m_{st} (\dot{V}_{sty} + V_{tx} \dot{\psi}_{st}) = 8F_{str} + F_{fw} \quad (9)$$

Angular Momentum :

$$I_{st} \ddot{\psi}_{st} = b_1 F_{fw} - 8b_2 F_{str} \quad (10)$$

▶ 연결부(5th Wheel)에서의 운동방정식

Force :

$$F_{fw} = m_{st} (\dot{V}_{ty} - c_1 \ddot{\psi}_t - b_1 \ddot{\psi}_{st} + V_{tx} \dot{\psi}_t) - 8F_{str} \quad (11)$$

위의 연결식 차량에 대한 3가지 분류의 운동방정식에 각각 식 (1) ~ 식 (3)을 대입한 타이어 횡력에 관한 식 (4) ~ 식 (6)을 대입하여 식 (12)와 같은 상태방정식과 출력방정식으로 나타낼 수 있다[부록 참조].

$$\begin{aligned} M\dot{x} &= \bar{A}x + \bar{B}u \\ y &= \bar{C}x \end{aligned} \quad (12)$$

III. 상태 관측기 설계

D. G. Luenberger는 처음 관측기(observer)라는 것을 제안했다. 관측기는 상태벡터(state vector)를 재구성(reconstruct)하는 장치(device)를 말한다[11]. 결정론적(deterministic) 환경에서 관측기는 상태벡터의 근사값(approximation)을 만드는 시스템이다. 다시 말해 상태가 근사화되는 시스템의 입력과 이용할 수 있는 출력을 그 시스템의 입력으로 하며 원하는

근사값과 상태벡터가 선형관계를 갖는 시스템으로 칼만 필터(Kalman filter)와 구분하여 루엔버거 관측기(Luenberger observer)라 한다[12].

1. 전차수 상태관측기(full order Luenberger state observer)

상태변수를 재구성 혹은 추정(이하 추정)하는 장치를 상태관측기(state observer) 또는 관측기(observer)라 하는데, 특히 시스템의 모든 상태변수를 추정하는 관측기를 전차수 상태관측기라고 한다[11,15]. 이러한 상태관측기를 설계하기 위해 앞서 II 장에서 살펴본 연결식 차량의 모델링을 이용한다.

시스템의 전체 상태벡터가 측정을 통해 이용 가능하며, 앞먹임(feedforward) 행렬 D 를 고려하지 않고, 선형시불변(linear time-invariant) 시스템을 고려하면 아래와 같은 상태방정식(state equation)과 출력방정식(output equation)으로 표현할 수 있다[12-14].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서 x 는 상태벡터, u 는 입력벡터, A 는 시스템 행렬, B 는 입력행렬, C 는 출력행렬을 나타내며, 상태벡터는 $x = [V_{ty} \ V_{sty} \ \dot{\psi}_t \ \dot{\psi}_{st}]^T$ 와 같이 정의하고, 상태관측기에 의해 추정된 상태벡터는 \tilde{x} 로 정의한다.

또한, 식 (1) ~ 식 (6)을 식 (7) ~ 식 (11)에 대입하고 정리하여 얻을 수 있는 미분방정식의 변수에 대한 계수(coefficient) 부분인 M, \bar{A}, \bar{B} 로 이루어진 식 (12)의 상태방정식에서 양변에 M^{-1} 를 곱하여 식 (13)로 나타낼 때 A 와 B 행렬, C 행렬은 다음과 같다.

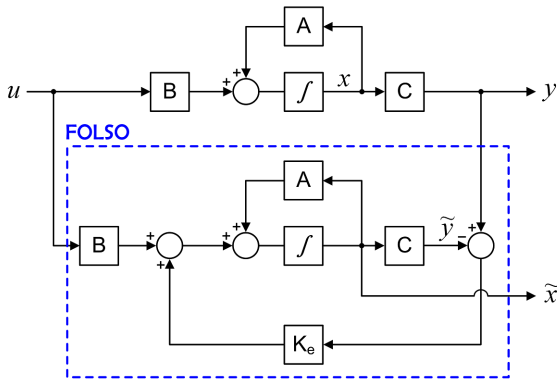


그림 4. 전차수 상태관측기.

Fig. 4. Full order luenberger state observer.

$$A = \begin{bmatrix} -27.0987 & 17.1047 & 63.9692 & -116.4267 \\ -36.2445 & 59.6135 & 111.1067 & -523.2382 \\ -3.2529 & 10.1620 & 8.7642 & -82.1564 \\ -0.8395 & -2.1835 & 3.1252 & 30.8051 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 48.9856 \\ 102.3867 \\ 14.8321 \\ -0.2065 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이를 통해 전차수 상태관측기의 동역학식(state observer dynamics)을 나타낸 식 (14)에서 알 수 있듯이 상태 관측기는 측정된 출력 y 와 시스템의 입력 u 를 입력으로 가지며, 측정된 출력 y 와 추정된 출력 $\tilde{y} (= C\tilde{x})$ 의 차이를 조절할 수 있는 가중치 이득 행렬(weighted gain matrix) K_e 로 구성되어 있다. 이 때, K_e 는 실제 시스템과 상태관측기의 A 와 B 행렬의 차이의 영향을 감소할 수 있다[15]. 실제 시스템과 상태관측기의 A 와 B 행렬이 같을 때 전차수 상태관측기는 그림 4와 같다. 여기에서 상태벡터와 추정된 상태벡터 사이의 차이($e = x - \tilde{x}$) 즉 오차(error)에 대한 오차 동역학식(error dynamics)은 식 (15)로 나타내진다.

▶ State observer dynamics of FOLSO :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \\ &= (A - K_eC)\tilde{x} + Bu + K_e y \end{aligned} \quad (14)$$

▶ Error dynamics of FOLSO :

$$\begin{aligned} \dot{x} - \dot{\tilde{x}} &= Ax + Bu - A\tilde{x} - Bu - K_e(y - C\tilde{x}) \\ &= Ax - A\tilde{x} - K_eCx + K_eC\tilde{x} \\ &= (A - K_eC)(x - \tilde{x}) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 알 수 있듯이 주어진 시스템이 완전 가관측 이면 $(A - K_eC)$ 행렬에서 적절한 K_e 의 선정으로 시스템의 특성을 목표에 부합하게 설계할 수 있다. 대체로 계산의 편의상 단일 입력(single input)일 때 상태벡터의 차수가 4 이상이면 K_e 값을 계산하기 위해 애커만 공식(Ackermann's formula)을 이용하여 구할 수 있으며, 다중 입력(multi-input) 시스템의 경우에는 [17]에 기반을 두고 만들어진 MATLAB

의 Control Toolbox에서 지원하는 place 함수를 사용하여 구할 수 있다.

2. 축소차수 상태관측기(reduced order Luenberger state observer)

시스템의 출력은 측정가능한 부분과 측정하기 어려운 부분으로 나눌 수 있다. 이들 중 측정할 수 있는 출력은 상태 변수들의 선형조합으로 나타낼 수 있다. 따라서 이러한 출력은 추정할 필요가 없으며, 나머지 측정할 수 없는 부분의 상태변수를 추정하는 관측기를 축소차수 상태 관측기라 한다[15,20]. 축소차수 상태관측기는 전차수 상태관측기보다 차수가 작아 관측기의 가중치 이득행렬(weighted gain matrix) K_e 를 구하는데 계산량을 줄일 수 있으며, 시변시스템(time-varying system), 이산시스템(discrete systems), 확률론적 시스템(stochastic systems) 그리고 로봇제어계에서의 적용 등 다양한 분야에서의 연구가 계속되고 있다[12,20]. 이러한 축소차수 상태관측기 설계에 있어서 알고 있는 상태 벡터를 x_p 라 하고, 추정하려는 상태를 x_q 라 하면 아래와 같이 상태방정식과 출력방정식으로 분리할 수 있다. 식 (16)의 0_2 과 I_2 는 각각 (2×2) 크기의 영행렬과 단위행렬을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{pp} & A_{pq} \\ A_{qp} & A_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ B_q \end{bmatrix} u \quad (16)$$

$$y = \begin{bmatrix} I_2 & 0_2 \\ 0_2 & 0_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_q \end{bmatrix} = x_p$$

식 (16)의 상태방정식에서 측정되어 알고 있는 부분과 측정할 수 없는 부분에 대한 식은 아래와 같다.

$$\dot{x}_p = A_{pp}x_p + A_{pq}x_q + B_p u \quad (17)$$

$$\dot{x}_q = A_{qq}x_q + A_{qp}x_p + B_q u \quad (18)$$

위에서 식 (18)은 축소차수 상태관측기의 상태방정식이 되며, 축소차수 상태관측기의 출력방정식은 식 (17)을 이용하여 식 (19)가 된다.

$$\dot{x}_p - A_{pp}x_p - B_p u = A_{pq}x_q \quad (19)$$

또한, 식 (14)에서 나타낸 전차수 상태관측기 동역학식과 식 (16)의 측정가능 및 측정불가능한 부분의 분리를 통해 나타낸 상태방정식을 이용하여 각 상태벡터와 행렬, 출력 등을 $\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_q$, $A \rightarrow A_{qq}$, $Bu \rightarrow (A_{qp}x_p + B_q u)$, $C \rightarrow A_{pq}$, $y \rightarrow (\tilde{x}_p - A_{pp}x_p - B_p u)$ 로 치환하면 아래와 같은 축소차수 상태관측기가 설계된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_q &= (A_{qq} - K_e A_{pq})\tilde{x}_q + (A_{qp}x_p + B_q u) \\ &\quad + K_e(\tilde{x}_p - A_{pp}x_p - B_p u) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)에서 K_e 는 출력 즉, 측정 가능한 개수만큼의 행이 줄어든 차원을 갖는다. 반면, 식 (20)에는 출력 $y (= x_p)$ 의 미분값이 포함되어 잡음(noise)을 증폭할 수 있으므로 임시 상태벡터 z 를 도입하여 식 (20)의 축소차수

상태관측기 동역학식과 오차동역학식($\dot{e} = \dot{x}_q - \dot{\tilde{x}}_q$)을 식 (24) ~ 식 (25)와 같이 다시 정의할 수 있다[14,15].

$$z = x_q - K_c y = x_q - K_c x_p \quad (21)$$

$$\tilde{z} = \tilde{x}_q - K_c y = \tilde{x}_q - K_c x_p \quad (22)$$

$$\dot{\tilde{z}} = \dot{\tilde{x}}_q - K_c \dot{y} = \dot{\tilde{x}}_q - K_c \dot{x}_p \quad (23)$$

▶ State observer dynamics of ROLSO :

$$\dot{\tilde{z}} = (A_{qq} - K_c A_{pq})\tilde{z} + [(A_{qq} - K_c A_{pq})K_c + (A_{qp} - K_c A_{pp})]x_p + (B_q - K_c B_p)u \quad (24)$$

▶ Error dynamics of ROLSO :

$$\dot{e} = \dot{x}_q - \dot{\tilde{x}}_q = \dot{z} - \dot{\tilde{z}} = (A_{qq} - K_c A_{pq})e \quad (25)$$

식 (24)를 간단하게 정리하기 위해 아래 식 (26) ~ 식 (28)과 같이 정의하여 축소차수 상태관측기를 식 (29)와 같이 정의할 수 있다.

$$\tilde{A} = A_{qq} - K_c A_{pq} \quad (26)$$

$$\tilde{B} = \tilde{A}K_c + A_{qp} - K_c A_{pp} \quad (27)$$

$$\tilde{L} = B_q - K_c B_p \quad (28)$$

$$\dot{\tilde{z}} = \tilde{A}\tilde{z} + \tilde{B}x_p + \tilde{L}u \quad (29)$$

한편, 식 (16)을 이용하여 \tilde{z} 를 \tilde{x} 로 변환할 수 있다. 즉, 추정된 상태변수 \tilde{x} 는 측정 가능하여 알 수 있는 상태벡터 x_p 와 추정한 상태벡터 \tilde{x}_q 로 구성되므로 연결식 차량 모델링을 통한 상태공간 모델에서 (4×1)크기의 상태벡터 $x = [V_{ty} \ V_{sty} \ \dot{\psi}_t \ \dot{\psi}_{st}]^T$ 중 트랙터와 세미트레일러의 횡방향 속도인 V_{ty} , V_{sty} 는 지리정보데이터, GPS 위성 항법 정보 및 관성측정장치 등을 통해 측정 가능할 때 \tilde{x} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} x_p \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_2 \\ I_2 \end{bmatrix} [\tilde{x}_q - K_c x_p] + \begin{bmatrix} I_2 \\ K_c \end{bmatrix} x_p \quad (30)$$

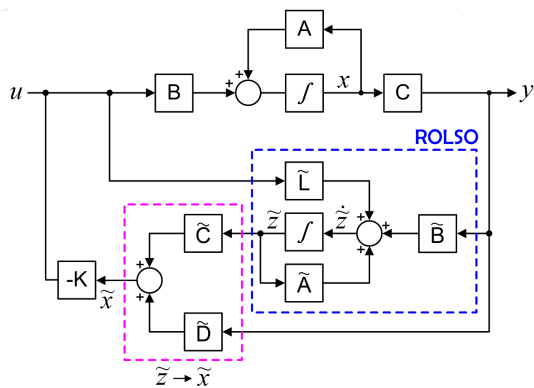


그림 5. 축소차수 상태관측기 피드백 시스템.
Fig. 5. Reduce order luenberger state observer feedback system.

또한, 식 (30)에서 $\begin{bmatrix} 0_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$ 를 \tilde{C} , $\begin{bmatrix} I_2 \\ K_c \end{bmatrix}$ 를 \tilde{D} 라고 정의하여,

축소차수 관측기를 사용하고 식 (31)과 같이 \tilde{z} 에서 \tilde{x} 로의 변환을 통해 그림 5와 같이 관측상태 피드백 시스템을 구성할 수 있게 된다[14,15].

▶ Conversion \tilde{z} to \tilde{x} :

$$\tilde{x} = \tilde{C}\tilde{z} + \tilde{D}x_p \quad (31)$$

본 논문에서 다룬 연결식 차량의 LTI 시스템 모델에서 축소차수 상태관측기는 식 (16)의 출력행렬에서 볼 수 있듯이 상태벡터 $x = [V_{ty} \ V_{sty} \ \dot{\psi}_t \ \dot{\psi}_{st}]^T$ 중 V_{ty} 와 V_{sty} 는 출력벡터로 추정 가능하므로 축소차수 상태 관측기는 2차의 차수를 갖는다.

3. 가중치 이득행렬 설정(weighted gain matrix)

제어가능성(controllability)과 가관측성(observability) 성립 하에 연결식 차량의 상태를 이용하여 피드백 제어(feedback control)를 구현할 때, 극점배치(pole placement) 설계와 축소차수 관측기의 페루프 극점을 적절하게 정의하였다. 이 때, K 와 K_c 는 극점배치 설계의 페루프 극점과 축소차수 상태 관측기의 페루프 극점 설계 시 사용되는 가중치 이득행렬이다. 즉 상태관측기를 이용한 피드백 시스템은 전차수 상태관측기와 같이 축소차수 상태관측기도 이 두 가중치 이득행렬이 포함되어 이루어진 특성방정식으로 나타내어지 식 (32)와 같이 주어진다[15].

$$|sI - A + BK| |sI - A_{qq} + K_c A_{pq}| = 0 \quad (32)$$

여기에서 연결식 차량의 관측상태 피드백 제어를 위해 적절하게 정한 극점(S_{K1})과 축소차수 상태 관측기의 극점(S_{K2})을 다음과 같이 정하였다.

$$S_{K1} = [-8 + 3\sqrt{2}i \quad -8 - 3\sqrt{2}i \quad -5 \quad -20],$$

$$S_{K2} = [-215 \quad -215]$$

이 때, 가중치 이득행렬은 MATLAB Control Toolbox 내 장 함수인 place를 이용하여 구하면 K 와 K_c 는 아래와 같다.

$$K = [-0.16372 \quad 1.1239 \quad 0.20509 \quad -14.495],$$

$$K_c = \begin{bmatrix} 5.257 & -1.0127 \\ 1.4096 & -0.78342 \end{bmatrix}$$

IV. 시뮬레이션 결과

위성항법시스템(GNSS) 중 하나인 GPS의 항법정보는 이온층 및 대기층의 상태(ionospheric and tropospheric condition), 위성의 기하학적인 배치(satellite geometry), 기저선의 길이(baseline length), GPS 신호의 다중경로 효과(multipath effect) 등에 의해 그 정확도에 차이를 보이지만 현재 반송파(carrier) 기반의 DGPS인 CDGPS (Carrier-phase Differential GPS) 경우 정확도가 미터급 이하인 sub-meter 수준으로 향상되었다[30].

또한 GPS 기준국의 데이터를 라디오(FM DARC: FM

Data Radio Channel), 와이브로(WiBro: Wireless Broadband), HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), DMB (Digital Multimedia Broadcasting) 등을 이용하여 실시간으로 획득하려는 연구개발이 이루어지고 있다[27]. 이러한 실시간 GPS 데이터 전송기술이 발전하여 실용화 된다면 이를 통한 sub-meter급 항법정보를 편리하게 수신할 수 있으며, 연결식 차량의 트랙터와 세미트레일러에 GPS 수신기를 장착한다면 각 차량의 위치, 속도 등에 대한 정보를 더 정밀하게 알아낼 수 있다.

더 나아가 지리정보 데이터 혹은 도로 폭이나 곡률반경과 같은 도로 실측 데이터를 이용[28,29]하여 도로 상에서 연결식 차량의 실시간 위치와 속도 데이터를 알 수 있으며, 추가적으로 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit)를 통한 차량의 종방향 및 횡방향의 속도, 가속도, 자세 관련 데이터 등을 보다 더 자세히 획득할 수 있다. 이 때 GPS 항법정보 및 차량의 자세 관련 데이터는 50 Hz 이상의 출력율(data rate)을 보이는 수신기[30]를 사용한다면 연결식 차량과 유사한 대형트럭 및 화물차량의 최고속도인 90 Km/h로 직선 이동 시 0.02초에 50 cm 마다 위치, 속도, 가속도 및 자세 관련 데이터를 갱신할 수 있게 된다. 또한, 트랙터와 세미트레일러가 5th wheel을 중심으로 요(yaw) 운동을 할 때의 속도는 직선 이동 속도보다 매우 낮고 현재 상용품인 중·저급 IMU가 100 Hz 이상으로 데이터를 출력하기 때문에 더 세밀한 자세 관련 데이터를 획득할 수 있게 된다[19,31].

하지만 본 논문에서는 연결식 차량의 트랙터와 세미트레일러의 각 무게중심에 GPS 수신기만을 장착하여 횡방향 속도 V_{ty} , V_{sty} 를 획득할 수 있다는 가정 하에 그림 5와 같은 축소차수 상태관측 되먹임 시스템을 고려하였다. 그리고 시뮬레이션을 위한 초기값 설정에 있어 GPS를 통하여 측정할 수 있는 V_{ty} 와 V_{sty} 및 이 값들의 추정값과의 차이 즉 오차(error)에 대하여 아래와 같이 설정하였다.

▶ Initial value of state variables and errors :

$$[V_{ty} \ V_{sty} \ \dot{\psi}_t \ \dot{\psi}_{st} \ e_1 \ e_2] = [8.33 \ 5.56 \ 0 \ 0 \ 1.39 \ 0.83]$$

초기값의 결정에 있어 각 차량의 횡방향 속도 V_{ty} 와 V_{sty} 의 값을 각각 시속 30 Km/h, 20 Km/h로 가정하였고 트랙터와 세미트레일러의 횡방향 속도 측정값과 추정값의 차이 즉, 오차를 각각 5 Km/h, 3 Km/h로 가정한 후 이 값들을 m/s단위로 환산하여 위와 같이 초기값을 정하였다.

이러한 초기값을 사용하여 제어 대상이 되는 연결식 차량의 상태 출력을 0 혹은 어떤 임의의 상수가 되도록 하는 시스템인 조정기 시스템을 구현하였다. 즉 상태관측 되먹임 시스템에 의한 상태변수들과 오차들이 “0” 값 근처로 몇 초 이내에 수렴 가능한지 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 수렴 값의 범위는 10^{-2} 이내로 설정하였다.

그림 6 ~ 9는 각각 트랙터와 세미트레일러의 횡방향 속도 V_{ty} , V_{sty} 와 도리각속도 $\dot{\psi}_t$, $\dot{\psi}_{st}$ 의 초기값에 대한 반응 추이를 나타낸다. 또한 그림 10~11은 각각 GPS 신호의 측

표 1. 상태변수들과 오차들의 수렴시간.

Table 1. Convergence time of state variables and errors.

구분	V_{ty}	V_{sty}	$\dot{\psi}_t$	$\dot{\psi}_{st}$	e_1	e_2
수렴 시간 (초)	1.27	1.17	1.28	0.83	0.03	0.03

정을 통해 알 수 있는 V_{ty} , V_{sty} 값과 축소차수 상태관측기를 통한 V_{ty} , V_{sty} 추정값과의 오차들의 초기값에 대한 반응 결과를 나타내고 있다. 이러한 각 상태변수들과 오차들의 “0” 값 근처(10^{-2})로의 수렴 시간을 정리하면 표 1과 같다.

위 표에서 볼 수 있듯이 모든 상태변수들과 오차들의 수렴시간이 [18]의 실험 결과를 통해 측정된 운전자의 인지반응시간(perception response time)인 2.5초 보다 짧은 1.5초 이내에 “0” 값 근처로 수렴하여 운전자의 즉각적인 반응보다 짧은 시간을 보이고 있다. 이러한 결과는 트랙터와 세미트레일러에 횡방향 속도가 생겨 잼나이프가 일어날 수 있는 상황에서 축소차수 상태관측기를 이용한 제어를 통해 운전

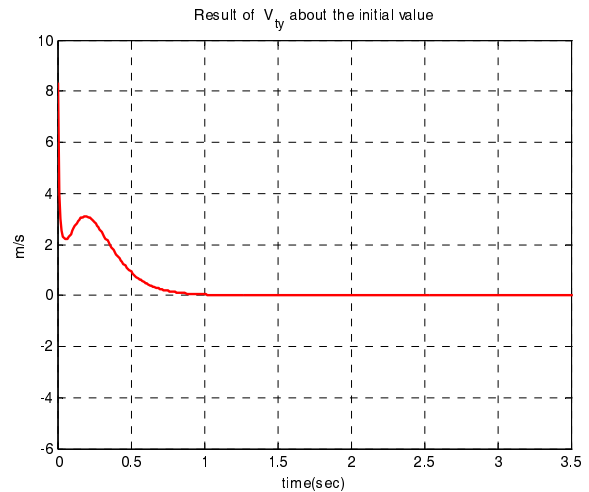


그림 6. 트랙터 횡방향 속도의 추이.

Fig. 6. Progress of tractor's lateral velocity.

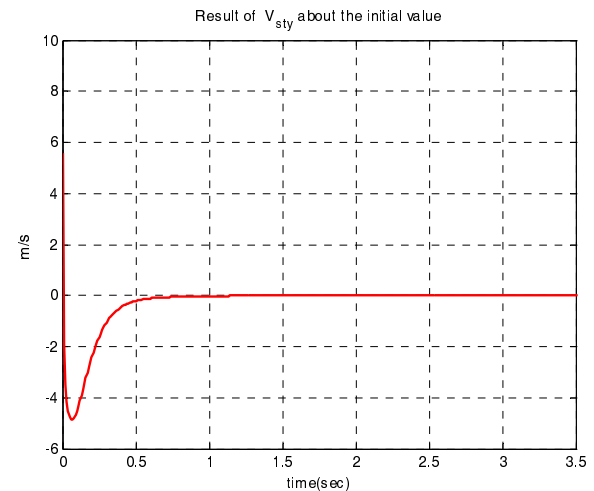


그림 7. 세미트레일러 횡방향 속도 추이.

Fig. 7. Progress of semitrailer's lateral velocity.

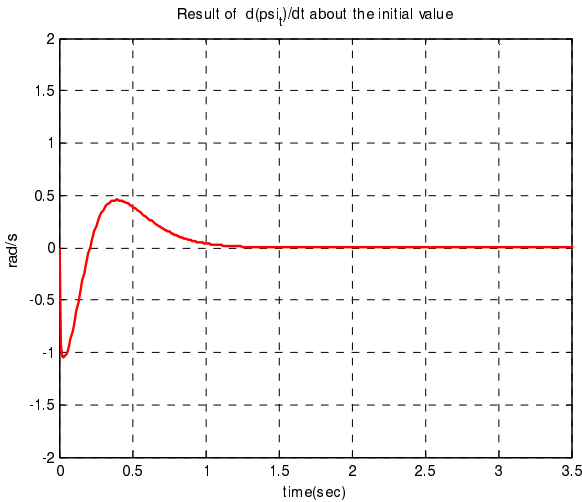


그림 8. 트랙터의 도리각속도 추이.
Fig. 8. Progress of tractor's yaw rate.

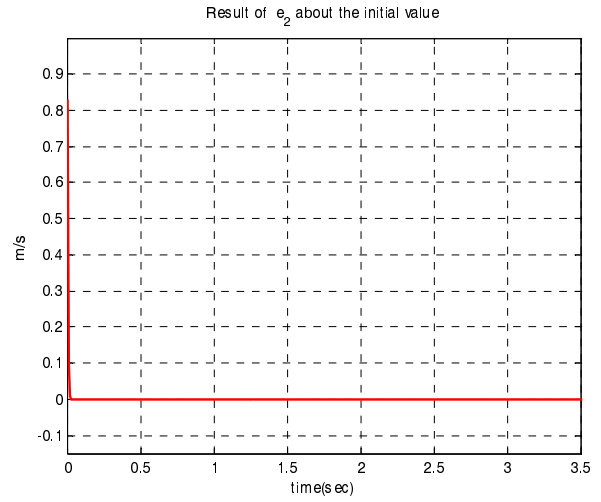


그림 11. 세미트레일러 횡방향 속도 오차 추이.
Fig. 11. Error progress of semitrailer's lateral velocity.

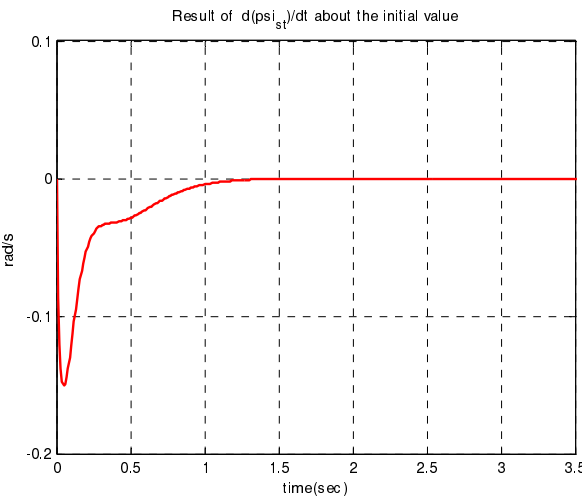


그림 9. 세미트레일러의 도리각속도 추이.
Fig. 9. progress of semitrailer's yaw rate.

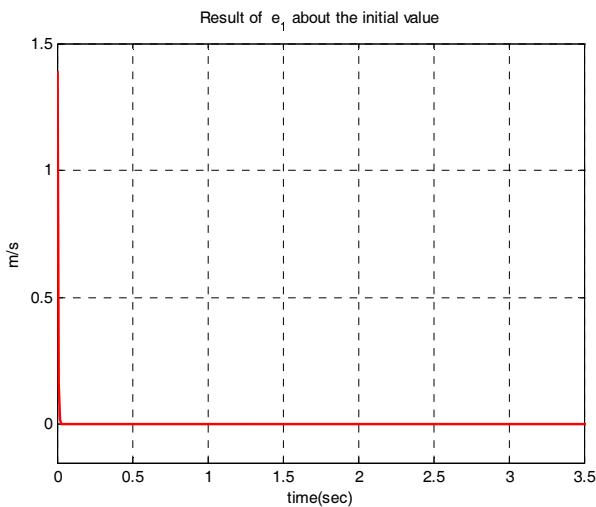


그림 10. 트랙터 횡방향 속도 오차 추이.
Fig. 10. Error progress of tractor's lateral velocity.

자가 반응하는 시간보다 빠른 시간 안에 차량 제어에 대한 반응을 보이고, 연결식 차량이 안정화 되도록 제어가 가능할 수 있음을 나타낸다.

V. 결론

본 논문에서 다루는 바와 같이 대부분 트랙터와 세미트레일러 차량의 타이어 견인력(tire traction) 차이 및 제어력 상실로 생기는 잭나이프링 현상은 각 차량의 횡방향 속도의 변화를 일으킨다. 이에 차량의 요잉(yawing)으로 불안정해지는 연결식 차량의 각 상태를 가능한 빨리 0으로 수렴하도록 축소차수 상태관측기를 설계하여 연결식 차량의 제어에 이용하였다.

연결식 차량과 같은 대형 차량의 실제 실험은 그 비용과 위험성으로 인해 매우 제한적이므로 시뮬레이션 결과만을 분석할 때 각 상태변수들(V_{ty} , V_{sty} , ψ_t , ψ_{st})의 값 및 오차값이 1.5초 이내에 0으로 수렴함을 볼 수 있다. 이는 비록 외국인을 대상으로 한 실험이지만 1950년대 AASHO (American Association of State Highway Officials)에서 운전자의 인지반응시간(perception response time) 실험 결과 [18,25]인 2.5초 보다 빨라 사고 대응에 있어 운전자에 의해 차량의 제어에 소모되는 시간까지 고려하면 매우 신속히 차량을 안정한 상태로 제어할 수 있음을 보여준다.

이러한 축소차수 상태관측기는 측정 가능한 출력값에 부정확성이 심하면 전차수 상태관측기보다 나쁜 성능을 나타낼 수 있는 단점이 있다[15]. 하지만 차수를 줄임으로써 가중치 이득 행렬을 구하는 연산시간을 줄일 수 있고, 정확하게 측정할 수 있는 상태변수는 추정할 필요가 없으므로 상태관측기를 설계함에 있어 시스템 부하를 줄일 수 있다.

앞으로 GPS를 이용한 항법정보의 정확도와 실시간 처리 성능이 더욱 향상된다면, 연결식 차량과 같은 대형 차량 및 기타 운송 수단의 사고예방 및 감지 측면에서 운전자가 미처 대응하지 못하는 순간에 이러한 상태관측기를 통한 제어시스템을 이용하여 사고로 인한 인명 및 재산피해를 최

소화하는데 기여할 것으로 판단된다.

또한, 더 발전된 연구를 위해 여러 가정들을 전제로 한 차량의 동역학 모델링에 대해 더 정확한 수학적 모델을 통한 상태관측기를 이용한 되먹임 시스템을 구현하여 극점 배치 및 가중치 이득행렬을 구함에 있어 최적화 방법을 연구할 필요가 있다.

부록

식 (12)에서 나타낸 트랙터, 세미트레일러, 5th wheel에서 작용하는 운동방정식들을 상태공간 모델로 표현할 때 각 행렬들 및 입력값은 [10]의 파라미터 값을 이용하였다. 먼저 식 (1) ~ (3)을 II 장의 연결식 차량 모델링에서 설명하였듯이 식 (4) ~ (6)에 각각 대입하면 타이어 횡력에 대한 식이 아래 식 (33) ~ (35)와 같고[7,10], 이를 상태벡터 x 에 관한 상태공간 모델 식 (12) 형태로 만들 때, $M, \bar{A}, \bar{B}, C, u$ 는 다음과 같이 표현된다. 이 행렬들의 각 원소들은 표 2의 주요 변수값과 연결식 차량의 속도 V_{tx} 를 시속 90 Km/h로 가정하여 초속 25 m/s로 환산 후 대입하여 III 장에서 나타낸 바 있는 A, B, C 행렬의 값을 구하였다. 여기에서 GPS의 항법정보와 지리정보데이터, 도로 실측 데이터와 같은 추가적인 정보를 이용하여 상태변수 중 V_{ty} 와 V_{sty} 는 측정할 수 있다고 가정하였다.

$$F_{tf} = C_{tf}(\delta - \frac{V_{ty} + a_1\dot{\psi}_t}{V_{tx}}) \tag{33}$$

$$F_{tr} = -C_{tr}(\frac{V_{ty} - a_1\dot{\psi}_t}{V_{tx}}) \tag{34}$$

$$F_{str} = -C_{str}(\frac{V_{sty} + b_2\dot{\psi}_{st}}{V_{tx}}) \tag{35}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_t + m_{st} & 0 & -c_1m_{st} & -b_1m_{st} \\ -c_1m_{st} & 0 & c_1^2m_{st} & b_1c_1m_{st} \\ -1 & 1 & -c_1 & b_1 \\ -b_1m_{st} & 0 & b_1c_1m_{st} & b_1^2m_{st} \end{bmatrix},$$

표 2. 연결식 차량의 주요 변수값들[10].

Table 2. Parameter values of Articulated vehicle [10].

변수 (parameter)	값 (value)	단위 (unit)
m_t	7,956	Kg
m_{st}	10,682	Kg
I_t	32,000	Kg×m ²
I_{st}	482,790	Kg×m ²
a_1	1.68	m
a_2	3.67	m
b_1	2.9	m
b_2	7.32	m
c_1	3.56	m
C_{tf}	177,678	N/rad
C_{tr}	710,713.5	N/rad
C_{str}	710,713.5	N/rad

$$u = \delta,$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 2C_{tf} \\ 2a_1C_{tf} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \frac{-(2C_{tf} + 12C_{tr})}{V_{tx}} & 0 \\ \frac{-2a_1C_{tf} + 4a_2C_{tr}}{V_{tx}} & \frac{8c_1C_{str}}{V_{tx}} \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-8b_1C_{str}}{V_{tx}} \\ -m_tV_{tx} - \frac{2a_1C_{tf} + 12a_2C_{tr}}{V_{tx}} - m_{st}V_{tx} & 0 \\ \frac{-2a_1^2C_{tf} - 4a_2^2C_{tr}}{V_{tx}} + c_1m_{st}V_{tx} - I_t & \frac{-8b_2c_1C_{str}}{V_{tx}} \\ V_{tx} & -V_{tx} \\ b_1m_{st}V_{tx} & \frac{8b_2^2C_{str}}{V_{tx}} - I_{st} \end{bmatrix}$$

참고문헌

- [1] C. Chen and M. Tomizuka, "Steering and independent braking control for tractor-semitrailer vehicle in automated highway systems," *Proc. of IEEE conference on Decision & Control 1995, New Orleans, LA*, pp. 1561-1566, Dec. 1995.
- [2] D. de Bruin and P. P. J. van den Bosch, "Modelling and control of a double articulated vehicle with four steerable axles," *Proc. of the American Control Conference 1999, San Diego, California*, pp. 3250-3254, June 1999.
- [3] N. L. Azad, A. Khajepour, and J. McPhee, "Analysis of jackknifing in articulated steer vehicles," *IEEE conference on Vehicle Power and Propulsion*, pp. 216-220, Dec. 2005.
- [4] M. Bouteldja, A. Koita, V. Dolcemascolo, and J. C. Cadiou, "Prediction and detection of jackknifing problems for tractor semi-trailer," *IEEE conference on Vehicle Power and Propulsion*, pp. 1-6, Sep. 2006.
- [5] L. Mai, P. Xie, and C. Zong, "Research on algorithm of stability control for tractor semi-trailer," *Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2009, Changchun, China*, pp. 4224-4228, Aug. 2009.
- [6] L.-K. Chen and Y.-A. Shieh, "Jackknife prevention for articulated vehicles using model reference adaptive control," *Proc. of IMechE Part D : Journal of Automobile Engineering*, vol. 225, no. 1, pp. 28-42, Jan. 2011.
- [7] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer, 2006.
- [8] R. M. Brach, "Vehicle dynamics model for Simulation on a Microcomputer," *International Journal of Vehicle Design, Inderscience Enterprises Ltd.*, vol. 12 no. 4, pp. 404-419, 1991.

- [9] L. Alexander, M. Donath, M. Hennessey, V. Morellas, and C. Shankwitz, "A lateral dynamic model of a tractor-trailer : experimental validation," *The University of Minnesota*, pp. 1-9, Nov. 1996.
- [10] J. Chen and Z. Liu, "Modeling and parameter identification of a tractor semitrailer/driver closed-loop system using the SA (Simulated Annealing) optimization approach," *Proc. of IEEE Conference on Information and Automation 2010, Harbin, China*, pp. 222-227, June 2010.
- [11] D. G. Luenberger, "Observing the state of a linear system," *IEEE Transactions on Military Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 74-80, Apr. 1964.
- [12] D. G. Luenberger, "An introduction to observers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-16, no. 6, pp. 596-602, Dec. 1971.
- [13] C. Elmas and H. Z.-D. La Parra, "Application of a full-order extended Luengerber observer for a position sensorless operation of a switched reluctance motor drive," *Proc. of IEE on Control Theory and Application*, vol. 143, no. 5, pp. 401-408, Sep. 1996.
- [14] J. Song, K.-B. Lee, J.-H. Song, I. Choy, and K.-B. Kim, "Sensorless Vector control of induction motor using a novel reduced-order extended luenberger observer," *IEEE conference Record of Industry Applications 2000*, vol. 3, pp. 1828-1834, 2000.
- [15] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 2nd Ed., Prentice Hall Inc., pp. 795-821, 1990.
- [16] B. Gao, H. Chen, H. Zhao, and K. Sanada, "A reduced-order nonlinear clutch pressure observer for automatic transmission," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 446-453, Mar. 2010.
- [17] J. Kautsky, N. K. Nichols, and P. Van Dooren, "Robust Pole Assignment in Linear State Feedback," *International Journal of Control*, vol. 41, pp. 1129-1155, 1985, *Taylor & Francis Online*
- [18] P. L. Olson, "Forensic aspects of driver perception and response," *Lawyers and Judge Publishing Co. Inc.*, p. 172, 1996.
- [19] S. Kennedy, D. Cosandier, and J. Hamilton, "GPS/INS integration in real-time and post-processing with NovAtel's SPAN system," *IGNSS Symposium*, Dec. 2007.
- [20] K.-S. Lee, "On the design of a finite time reduced order observer," *Transactions on Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, vol. 59, no. 5, pp. 961-965, May 2010.
- [21] Ministry of Land, Transport and maritime affairs, MLTM-related statistics, Total Registered Motor Vehicles (in Korean), <http://stat.mltm.go.kr>. Feb. 2012.
- [22] D. M. Kang and S. M. Ahn, "A study on the factors that influence jack knife phenomenon of articulated vehicles," *Transactions on Korea Society for Power System Engineering (in Korean)*, vol. 11, no. 2, pp. 58-63, May 2007.
- [23] I.-H. Yoon and C.-K. Yoo, *Freight Transportation*, Hyungseul publishing Co., pp. 86-88, 2008.
- [24] H. S. Bang, K. H. Lee, C. B. Lee, and S.-C. Kim, *Logistics Management (in Korean)*, Crbooks, p. 168, May 2011.
- [25] L. S. Beom, W. C. Kim, D. H. Hong, and D. S. Oh, "A study of perception response time on various operating speeds," *Transactions on Korea Society of Civil Engineers (in Korean)*, vol. 22, no. 6-D, pp. 1105-1116, Nov. 2002.
- [26] S. K. Lee, Y. R. Kim, K. S. Noh, and J. H. Jeong, "Improvement of semi-trailer design standard for road geometry," *Conference on Korean Society of Road Engineers (in Korean)*, vol. 7, pp. 355-360, Nov. 2005.
- [27] J.-U. Park, S. K. Cho, J. H. Jo, J.-H. Cho, H.-C. Lim, and B. K. Choi, "Research and development for construction of nationwide DGPS(IV); A study on communication technique for high-accuracy DGPS," *Korea Astronomy and Space science Institute (in Korean)*, pp. 27-53, Apr. 2006.
- [28] K. K. Jeon, S. J. Choi, D. H. Shin, and B. H. Lee, "Development of vehicle rollover warning and auto-braking system algorithm using GPS," *Conference on Korean Society of Automotive Engineers (in Korean)*, vol. 6, pp. 760-765, 2006.
- [29] J. Y. Hwang, H. J. Kang, and B. J. Kim, "Development of vehicle rollover prevention system using GPS at entering corner," *Korean Society of Automotive Engineers ITS Symposium (in Korean)*, pp. 73-78, 2006.
- [30] ProPak-V3, NovAtel, Product Sheet, 2011.
- [31] HG1700 Inertial Measurement Unit, Honeywell, Data Sheet, 2006.
- [32] R. Istvan, I. Jozsef, K. Gyoergy, M. Jenoe, and L. Nandor, "Anti-jackknifing device with friction brake for articulated motor vehicle," Pat. no. 04494765, US, 1985.
- [33] R. David, Y. Chi, K. Dennis, and S. Paul, "Anti-jackknifing hitch assembly," Pat. no. 07540523, US, 2009.



이 병 석

2002년 2월 서울시립대학교 전자전기공학부 졸업. 2002년 10월~2005년 9월 통신장교 복무. 2009년 2월 동 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사. 2011년 2월 동 대학 박사 수료. 2011년 4월~현재 한국항공우주연구원 위성항법팀 연구원 및 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 최적 · 강인 제어, 군집 제어 및 위성항법시스템(GNSS) 등.

**허 문 범**

1992년 2월 경희대학교 기계공학과 졸업. 1997년 12월 Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 석사. 2004년 12월 Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 박사. 2005년 10월~현재 한국항공우주연구원 위성항법팀 선임연구원. 관심분야는 GNSS, 위성항법, 항행시스템 등.