

RCGA 기반의 파라미터 추정 기법을 이용한 트레일러형 차량의 후방경로 추종제어

위용욱* · 하윤수** · 진강규**

Backward Path Tracking Control of a Trailer Type Vehicle Using a RCGA Based Parameter Estimation

Y-W Wi, Y-S Ha, G-G Jin

Key words : Trailer Type Vehicle(트레일러형 차량), Backward Path Tracking Control(후방 경로추종제어), Non-holonomic System(논홀로노믹 시스템), RCGA(실수코딩 유전알고리즘)

Abstract

This paper presents a methodology on automation of a trailer type vehicle which consists of two parts: a tractor and a trailer. Backward moving and parking control is very important to automate this type of vehicle. It is difficult to control the motion such a trailer vehicle whose dynamics is non-holonomic. Therefore, in this paper, the modeling and parameter estimation of the system using a RCGA(real-coded genetic algorithm) is proposed and a backward path tracking control algorithm is then obtained. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

1. 서 론

최근 국내 수출입 물량의 증가와 더불어 항만 및 물류처리 시설의 자동화에 대한 요구가 절실하다. 특히 늘어나는 물류량에 비해 이들의 수송을 담당하고 있는 대형트레일러의 운전 기사들의 부족현상은 기사들의 과중한 업무로 이어지고, 이로 인한 대형 교통사고는 많은 물적, 인적피해를 야기 시키

고 있다. 이와 같은 대형 교통사고를 미연에 방지하고 늘어나는 물동량으로 인한 물류비용을 절감하기 위해서는 컨테이너 수송용 트레일러 차량을 포함한 물류처리 시설에 대한 자동화가 시급하다. 현재까지 이루어진 트레일러형 차량의 자율이동에 관한 대부분의 연구들은 주로 전방경로를 대상으로 한 경로추종제어기의 설계 및 멀티센서를 이용한 위치추정문제를 다루었다^{[1][2]}. 그러나 제한된

* 한국해양대학교 대학원 제어측정공학과(원고접수일 : 2000년 9월)

** 한국해양대학교 기계·정보공학부

공간 내에서 효율적으로 화물의 적화 및 하역을 해야 하는 실제 작업현장에서는 후진 및 주차기능이 매우 중요하며 이의 자동화가 절실히 요구되고 있다. 이러한 후진 및 주차기능을 자동화하기 위해서는 먼저 후진경로 추종제어에 관한 연구가 선행되어야 한다. 그러나 트레일러형 차량은 트랙터의 속도와 방향을 제어하여 트레일러의 위치 및 방위를 제어하는 논홀로노믹(Non-holonomic) 제어시스템으로서 제어하기가 까다로우며 특히, 후진경로 주행에 있어서는 시스템이 불안정해지기 쉽기 때문에 더욱 더 정교한 제어가 요구되고 있다³¹⁾.

또한 자립(Self-contained)이동시스템의 실제 구현에 있어서는 경우전원, 계산기의 처리능력 등 여러 가지 물리적 제약 조건을 고려하여 시스템을 통합하여야 하므로 시스템의 대형화나 알고리즘의 복잡성을 줄이는 노력이 필요하다. 이러한 측면에서 Nakamura 등은 트랙터와 트레일러의 방위각의 차가 작고(≈ 0) 또한 트레일러의 방위각이 적음(≈ 0) 것으로 간주하여 선형화한 모델에 근거하여 상태피드백 제어시스템을 구성한 결과를 보고한 바 있다³²⁾. 그러나 실제 트레일러형 차량의 경우 T지로 등에서 후진주차가 요구되는 경우 트랙터와 트레일러의 방위각의 차는 90° 에 이르는 등 광범위한 운전조건이 주어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 계산처리능력을 감안하여 복잡한 알고리즘을 피하면서 광범위한 운전영역에서 큰 무리 없이 동작할 수 있도록 하기 위해 모형 트레일러 차량을 다양한 경로로 실제 주행시키면서 얻어진 데이터를 바탕으로 실수코드 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm : RCGA)을 이용하여 선형모델의 최적파라미터를 추정하였다. 이를 근거로 후방직선경로를 안전하고 정확히 추종할 수 있는 상태피드백 제어시스템을 구성하는 것을 제안한다.

2. 트레일러형 차량의 모델링

2.1 비선형 모델

사진 1은 본 연구에서 대상으로 하는 모형 트레일러형 차량을 나타낸 것으로서 한국해양대학교 지능

로봇연구실에서 자체 설계 제작한 것을 나타낸 것이다. 트레일러형 차량은 크게 좌·우에 독립적으로 구동되는 구동륜을 가지는 트랙터와 비구동륜을 가지는 트레일러의 두 부분으로 구성되며 트랙터와

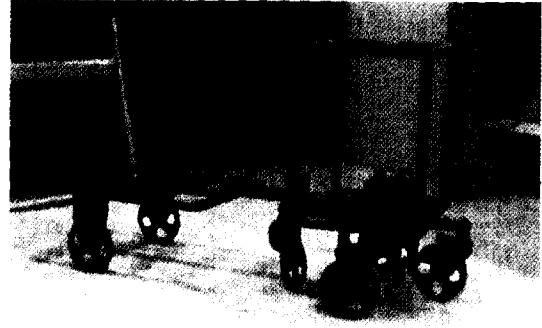


Photo. 1 A trailer type vehicle

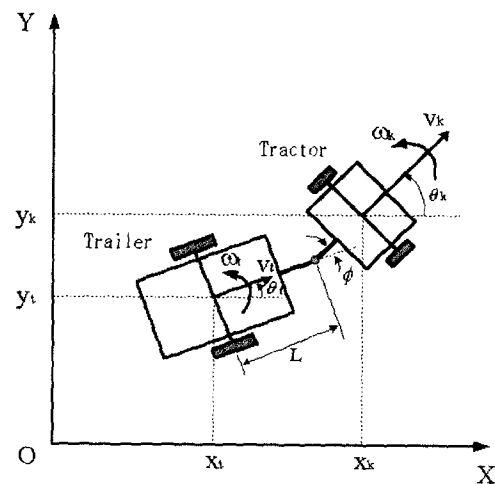


Fig. 1 Kinematic model of the trailer type vehicle

Table 1 Definition of parameters

x_k, y_k	X-Y 2차원 평면상의 트랙터의 위치
θ_k	트랙터의 방위각
v_k	트랙터의 병진속도
ω_k	트랙터의 회전각속도
x_t, y_t	X-Y 2차원 평면상의 트레일러의 위치
θ_t	트레일러의 방위각
v_t	트레일러의 병진속도
ω_t	트레일러의 회전각속도
ϕ	트랙터와 트레일러 방위각간의 차이각도
L	트레일러 휠축과 트레일러 연결조인트 사이의 길이

트레일러는 자유롭게 회전 가능한 조인트에 의해 연결되어진다. 좌우구동 모터 및 연결 조인트에는 회전각 검출용 엔코더센서를 부착하고 있다.

그림 1과 표 1은 각각 X-Y 2차원 평면상을 주행하고 있는 모형 트레일러 차량의 운동학적 모델과 주요 파라미터를 나타낸 것이다.

트레일러형 차량의 제어를 위한 수식모델을 얻기 위해 먼저 그림 1로부터 트랙터와 트레일러 사이의 관계를 나타내면 다음 식과 같이 기술될 수 있다.

$$v_t = v_k \cos \phi \tag{1a}$$

$$L\omega_k = v_k \sin \phi \tag{1b}$$

$$\theta_t = \theta_k - \phi \tag{1c}$$

그림 1과 식(1a)~식(1c)으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_t = v_t \cos \theta_t = v_k \cos \phi \cos \theta_t \tag{2a}$$

$$\dot{y}_t = v_t \sin \theta_t = v_k \cos \phi \sin \theta_t \tag{2b}$$

$$\dot{\theta}_t = \omega_t = \frac{v_k}{L} \sin \phi \tag{2c}$$

$$\dot{\phi} = \omega_k - \omega_t = \omega_k - \frac{v_k}{L} \sin \phi \tag{2d}$$

$$\dot{v}_k = u_v \tag{2e}$$

$$\dot{\omega}_k = u_\omega \tag{2f}$$

본 논문의 목적은 트랙터가 일정한 속도 v_k 로 후진하는 동안 ω_k 를 조정하여 트레일러가 원하는 경로를 추종하도록 제어하는 것이다. 따라서 ω_k , ϕ , θ_t , y_t 를 각각 상태변수 x_{p1} , x_{p2} , x_{p3} , x_{p4} 로 두고 시스템을 상태공간형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}_p = f(x_p, u_\omega, t) \tag{3}$$

여기서 $x_p = [x_{p1} \ x_{p2} \ x_{p3} \ x_{p4}]^T = [\omega_k \ \phi \ \theta_t \ y_t]^T \in R^4$ 는 상태벡터이고, f 는 4×1 함수 벡터로서 다음과 같은 요소를 가진다.

$$f(x_p, u_\omega, t) = \begin{pmatrix} u_\omega \\ x_{p1} - \frac{v_k}{L} \sin(x_{p2}) \\ \frac{v_k}{L} \sin(x_{p2}) \\ v_k \cos(x_{p2}) \sin(x_{p3}) \end{pmatrix} \tag{4}$$

2.2 RCG를 이용한 시스템모델의 선형화

본 연구에서는 트레일러 차량의 후방경로 추종 제어 시스템을 설계함에 있어 선형레귤레이터 이론을 적용하기 위해 식(3)의 비선형 시스템의 동작과 근사한 선형모델을 얻는 것이 필요하다. 따라서 시스템의 동작점 부근에서 선형화된 모델에 기초하여 다음과 같은 모델을 사용하였다.

$$\dot{x} = Ax + Bu_\omega \tag{5}$$

단,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & p_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T \in R^4$ 는 모델의 상태벡터이고, 미지의 파라미터 p_1 , p_2 , p_3 는 RCG를 이용하여 최적으로 조정된다. 그림 2는 파라미터 p_1 , p_2 , p_3 를 추정하는 과정을 나타낸 것이다.

대상 시스템과 모델은 병렬로 연결되어지고 여기에 같은 입력을 가한 후 각각의 출력으로부터 목적함수 J 가 계산되어진다.

$$J = \int_0^\infty (x_p - x)^T Q (x_p - x) dt \tag{6}$$

여기서 x_p 는 실제 시스템의 상태벡터, x 는 모델의 상태벡터를 의미한다. Q 는 하중행렬로서 $Q = \text{diag}(q_{11}, q_{22}, q_{33}, q_{44})$ 이다. 식(5)의 선형시스템의 파라미터는 식(6)의 목적함수가 최소가 되도록 적응자에 의해 조정된다. 이 때 적응자의 메카니즘은 RCG에 의해 구성된다⁴⁾⁵⁾. 그림 3과 그림 4, 5는

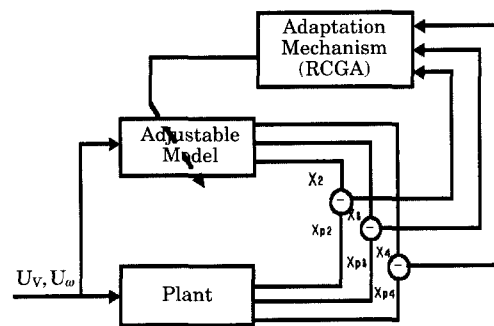


Fig. 2 Parameter estimation of a trailer type vehicle using a RCGA

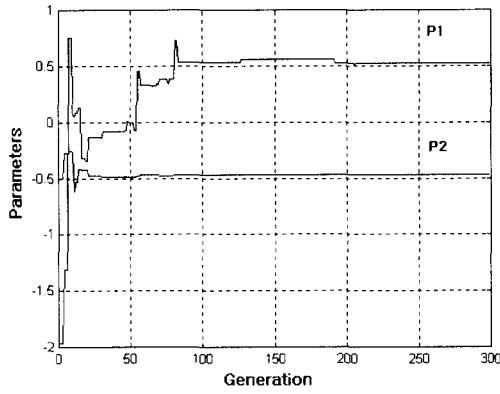


Fig. 3 Results of parameter P_1 , P_2 estimation using a RCGA

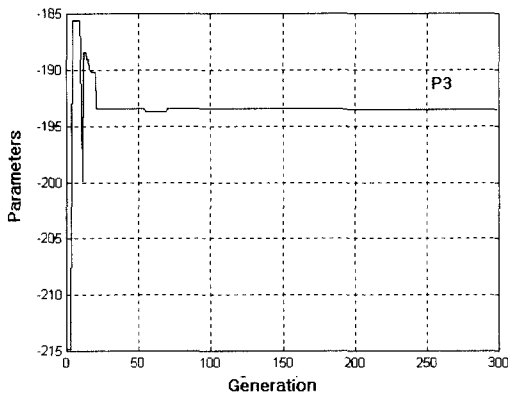


Fig. 4 Results of parameter P_3 estimation using a RCGA

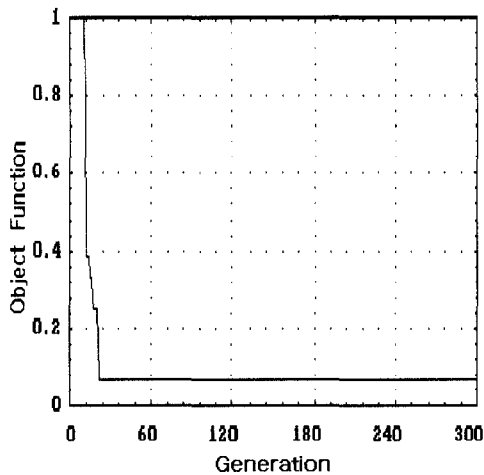


Fig. 5 Objective function in adaptation using a RCGA

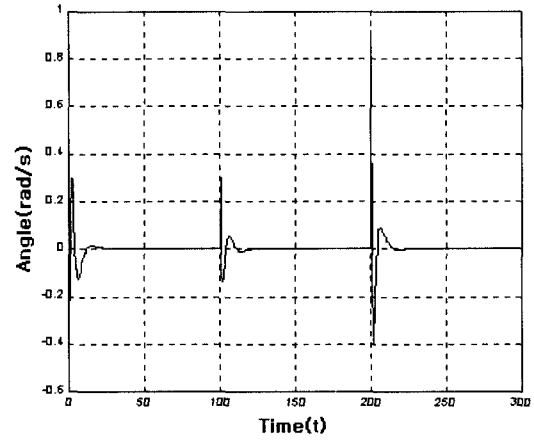


Fig. 6 Input data for parameter estimation

각각 그림 2의 파라미터 추정 시스템의 입력으로서 트랙터의 병진속도 $V_k = -200[m/s]$ 로 일정하게 두고 u_w 를 그림 6과 같이 변화시켰을 때, 선형 시스템 모델의 파라미터의 추정결과 및 평가함수의 변화를 나타낸 것이다. 이때 하중행렬 $Q = \text{diag}(0, 1, 50, 1)$ 이다.

이 결과 RCGA는 300 세대 이후에 추종치 $p_1 = 0.52666$, $p_2 = -0.4690$, $p_3 = -193.4970$ 를 얻었다.

3. 후방경로추종제어

트레일러형 차량은 트랙터의 움직임을 제어함으로써 트레일러를 제어하는 구조를 가진다. 따라서 트레일러형 차량의 제어는 트랙터의 좌·우 휠의 회전속도를 결정하는 문제로 귀결된다. 이러한 트랙터 좌·우 휠의 회전각속도 $\dot{\omega}_r$, $\dot{\omega}_l$ 은 트랙터 중심의 병진가속도 \dot{v}_k 와 회전각가속도 $\dot{\omega}_k$ 가 주어진다고 가정하면 다음 식에 의해 계산되어진다.

$$\dot{\omega}_r = \dot{v}_k + \frac{T}{2} \dot{\omega}_k \quad (7a)$$

$$\dot{\omega}_l = \dot{v}_k - \frac{T}{2} \dot{\omega}_k \quad (7b)$$

여기서 T 는 트랙터의 좌·우 휠 간의 거리를 나타낸다. 따라서 트랙터의 병진속도가 일정하다고 하면 임의의 후방직선경로 추종제어 문제는 트랙터의 회전각가속도 $\dot{\omega}_k$ 를 어떻게 결정하는가에 달려

있다.

임의의 위치, 자세에서 x 축 상을 따라 주행시켜서 ϕ, θ 를 0이 되도록 제어하는 것은 레귤레이터 문제로 취급할 수 있다. 따라서 제어입력 u_ω 는 상태제환에 의해 식(8)과 같이 주어질 수 있다.

$$u_\omega = -Kx \quad (8)$$

여기서 $K=[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$ 로서 상태제환 이득을 나타낸다. 행렬 $(A-BK)$ 의 고유치의 실수부가 부의 값을 갖도록 K 를 적절히 선택함으로써 시스템을 안정화시키는 동시에 트랙터와 트레일러를 목표직선에 추종시킬 수 있다.

한편 임의로 주어진 직선경로에 대한 추종은 x 축 상에 차량을 위치시키는 문제의 확장으로 생각할 수 있다. 먼저, 트레일러의 현재위치(x_t, y_t)와 방위각 θ_t 가 그림 7과 같다고 하고 x 축과 θ_0 도를 이루는 직선경로를 추종시키는 문제를 생각하자. 이는 (x_0, y_0) 을 원점으로 한 새로운 좌표계 $X'-Y'$ 을 설

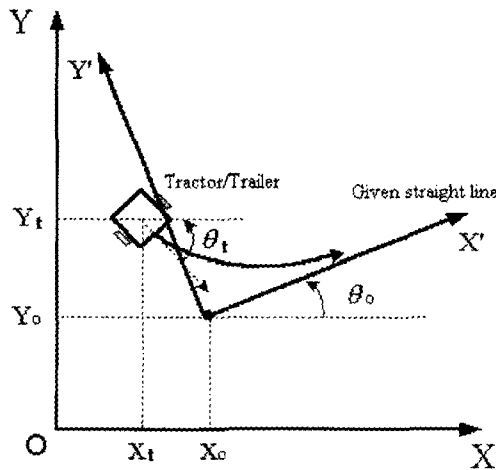


Fig. 7 Scheme of straight line tracking control

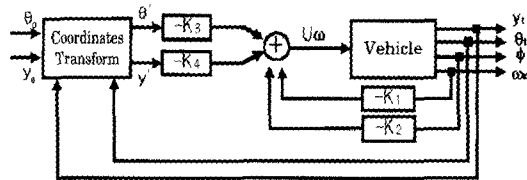


Fig. 8 Backward path control system for trailer type vehicles

정하고 차량을 X' 축을 추종하도록 하는 문제로 생각하면 된다. 트레일러의 현재위치와 방위각은 식(9)에 의해 $X'-Y'$ 좌표계 상의 값으로 변환되어진다⁶⁾.

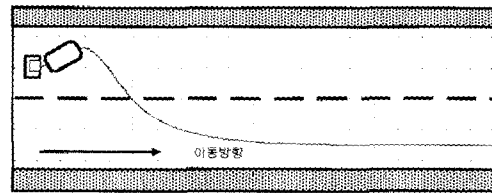
따라서 그림 8과 같이 제어기를 구성함으로써 트레일러형 차량은 주어진 목표 후방직선경로를 추종하게 된다.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 & 0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_t - x_0 \\ y_t - y_0 \\ \theta_t - \theta_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

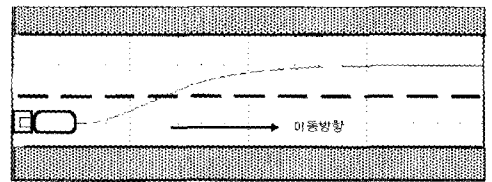
4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

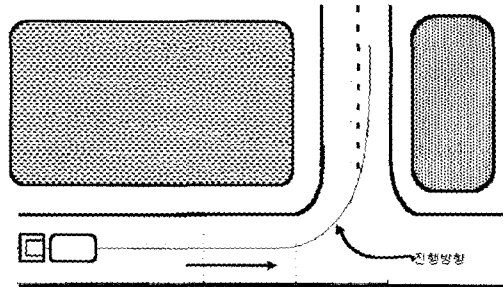
본 논문에서 제안한 후방직선경로 추종제어 알고리즘의 유효성을 입증하기 위하여 그림 8과 같이 트레일러형 차량에 있어서 요구되어지는 주요



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Three types of backward paths for simulation

후진동작 세 가지에 대한 추종성능에 대하여 시뮬레이션을 실시한다.

그림 9(a)는 트랙터 축과 트레일러 축이 일치하고 있지 않은($\phi \neq 0$) 자세에서 후진 차선변경, 9(b)는 트랙터 축과 트레일러 축이 일치하고 있는($\phi = 0$) 자세에서의 후진 차선변경, 9(c)는 T자로에서의 후진이 요구되는 경우이다. 시뮬레이션에 앞서 좌우 구동륜의 회전정보, 트랙터에 대한 트레일러의 회전각 정보는 각각 엔코더센서로부터 얻어질 수 있는 것으로 간주하였다.

또한 트레일러 연결 조인트에서 트레일러 휠 중심 축까지 거리의 값은 415[mm], 병진속도를 -200 [mm/s]로 일정하게 유지하도록 하였다. 본 연구에서 제어기의 상태궤환이득 결정 시 트레일러 차량의 주행예상 환경 즉 도로의 폭과 트레일러 차량의 길이 및 폭등이 고려되어야 하지만 본 논문에서는 이들에 대한 고려는 하지 않았다.

실제 시뮬레이션에 이용된 상태궤환이득은 제어시스템이 안정화 되도록 페루프극을 $\lambda = -0.5542 \pm j0.117$, $-0.559 \pm j0.0681$ 에 배치함으로써 다음과 같이 구하였다.

$$K = [2.7531 \quad 3.3270 \quad -1.5142 \quad 0.0011]$$

4.2 결과 및 검토

그림 10은 트레일러의 초기 위치 및 방위각이

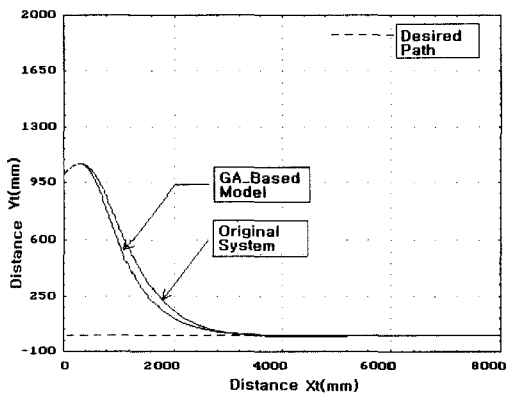


Fig. 10 Simulation results in the case of Fig. 9(a) with initial condition $(x_i, y_i, \theta_i) = (0, 1000, 20^\circ)$ and $\phi = 10^\circ$

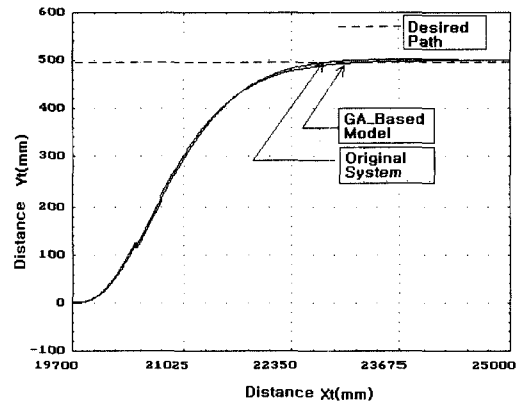


Fig. 11 Simulation results in the case of Fig. 9(b) with initial condition $(x_i, y_i, \theta_i) = (0, 0, 0^\circ)$ and $\phi = 0^\circ$

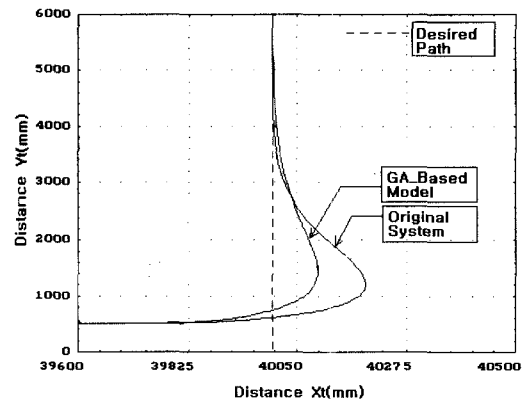


Fig. 12 Simulation results in the case of Fig. 9(c) with initial condition $(x_i, y_i, \theta_i) = (0, 500, 0^\circ)$ and $\phi = 0^\circ$

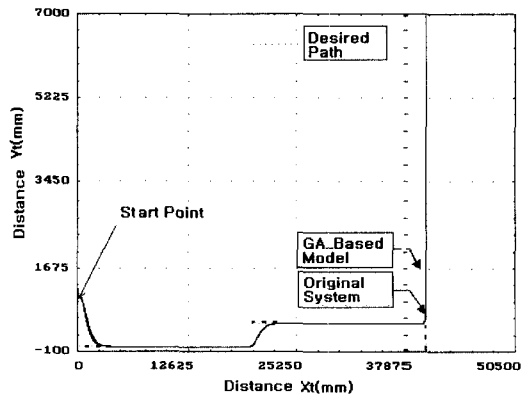


Fig. 13 Simulation results of sequential changes such as Fig. 9(a),(b),(c) with initial condition $(x_i, y_i, \theta_i) = (0, 0, 20^\circ)$ and $\phi = 0^\circ$

(0, 1000, 20°)이고 트랙터와 트레일러 방위각의 차이가 각 ϕ 가 10°인 상태에서 목표경로가 x축으로 주어졌을 때의 결과를 나타낸다. 또한 그림 11은 트레일러의 초기위치 및 방위각이 (0, 0, 0°)에서 ϕ 가 0°인 상태에서 목표경로가 y축으로 500[mm]인 지점으로 차선 변경을 하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. 그림 10, 11로부터 트레일러형 차량은 그림 9(a), (b)와 같은 차선변경 시 주어진 목표직선경로를 잘 추종하고 있으며 또한 RCGA를 이용한 모델과 실제 시스템간의 응답에도 거의 비슷한 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다.

그림 12은 트레일러가 그림 9(c)에서와 같이 T지대로 후진목표경로가 주어졌을 때의 결과를 나타낸 것이고, 그림 13은 트레일러의 초기치가 (0, 1000, 20°), =10°인 상태에서 그림 9(a),(b),(c)의 경로를 순차적으로 수행시켰을 경우의 결과를 나타낸 것이다. 이러한 경우에 있어서도 주어진 목표경로를 잘 추종하고 있으며 트레일러형 차량의 회전각도가 90°인 그림 12의 경우 RCGA를 이용한 모델과 실제 시스템의 응답에는 약간의 차가 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 컨테이너 수송용 트레일러 차량의 자동화를 위한 기초연구로서, 트레일러형 차량에게 자율적인 후진 및 주차기능을 부여하기 위하여 후방경로 추종제어를 위한 운동학적 모델 및 제어알고리즘을 제시하였다. 트레일러의 모델은 RCGA를 이용하여 선형화 되었으며 제어기 설계를 위하여 극 배치 방법이 적용되었다. 제안된 제어시스템에 대한 유효성을 입증하기 위하여 모형 트레일러 차량의 실제 파라미터 값을 이용하여 여러 가지 시뮬레이션을 행하였으며 그 결과 RCGA를 이용한 모델과 실제 시스템 사이에 트레일러형 차량의 회전각도가 클수록 오차가 커지지만 비교적 주어진 경로를 잘 추종함을 알 수 있다. 따라서 금후의 과제로는 T지로 등과 같은 트레일러의 회전각이 큰 경우에 있어서의 추종오차를 줄이는 방안으로 퍼지모델에 기초한 제어기 설계와 실제 시스템의 구현 등이 요구된다.

참고문헌

- [1] 최진규, 하윤수, "멀티센서 데이터융합에 의한 차륜형 이동체 위치추정시스템의 정도개선에 관한 연구," 한국박용기관학회지, Vol. 24, No.1, pp.119~126, 2000
- [2] 오정석, 하윤수, "퍼지 알고리즘을 이용한 차륜형 이동로봇의 경로추종제어," 한국박용기관학회지, Vol. 23, No.6, pp. 9~15, 1999
- [3] M. Nakamura, S. Yuta, "Trajectory Control of Trailer Type Mobile Robots," *Proc. IEEE/RJS Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '93)*, pp. 2257~2263, 1993
- [4] 주상래, 이현식, 진강규, "실수코딩 유전 알고리즘과 제어기 동조에 응용," 한국자동제어 학술회의 논문집, Vol. 1, pp. 342 ~ 345, 1999
- [5] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000
- [6] Yun-Su Ha, S. Yuta, "Trajectory Tracking Control for Navigation of Self-Contained Mobile Inverse Pendulum," *Proc. IEEE/RJS Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1875~1882, 1994

저 자 소 개



위용욱(魏容郁)

1973년 12월생. 1999년 2월 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 현재 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정재학중.



하윤수(河潤秀)

1962년 4월생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(박사). 1996년~현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 조교수



진강규(陳康奎)

1953년 10월생. 1977년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사). 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과(박사). 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수