

Off-hooked 트레일러 시스템의 궤적 추종

이재형[†] · 박명국^{***} · 정우진^{*} · 김문상^{*} · 송재복^{**}

(2002년 8월 8일 접수, 2003년 7월 7일 심사완료)

Path following of the passive off-hooked trailer system

JaeHyung Lee, MyoungKuk Park, Woojin Chung, Munsang Kim and Jae-Bok Song

Key Words : Passive Trailer System(수동 트레일러 시스템), Trajectory Following(궤적 추종), Stability Analysis(안정화 해석)

Abstract

This paper deals with design and control of passive multiple trailer systems for practical applications. Due to cost and complexity of trailer mechanism, passive systems are preferred to active systems in this research. The control objective is to minimize trajectory tracking errors of passive multiple trailers. Three types of passive trailer systems - direct-hooked, three-point, and off-hooked - are discussed in this paper. Trajectory tracking performance and stability issues under constant velocity motion are carried out for three types. Various simulations and experiments have been also performed for these three types. It is shown that the proposed off-hooked trailer system produces better tracking performance than the other types.

1. 서 론

수동 트레일러 시스템은 제작 및 운용 측면에 있어서 적은 비용으로도 수송능력을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 또한, 이 시스템은 여러 상황에 따라 재구성 및 기능의 확장이 가능하다. 트레일러 시스템은 nonholonomic 기구의 제어 및 해석의 관점에서 연구되어 왔다. Laumond는 다중 트레일러 시스템의 제어 가능성을 증명하였다.⁽¹⁾ Murray와 Sastry는 연쇄형(chained form)을 제안함으로써 트레일러 시스템을 포함한 nonholonomic 기구의 조향 및 안정화를 위한 여러 제어기법을 제안하였다.⁽²⁾ 대표적인 예로는, Tibury, Murray와 Sastry가 제안한 개루프 제어기⁽³⁾와 Sordalen과 Wichlund가 제안한 페루프 제어기⁽⁴⁾가 있다. 그러나 이들 연구는 점 조향이나 안정화 문제에 국한되어 있으므로, 한 대 이상의 트레일러로 구성되는 실제 시스템에는 바로 적용할 수는 없다.

Canudas과 Fukushima를 비롯한 많은 연구자들은 능동 트레일러 시스템의 제어에 관한 연구를 수행하여 왔다.^(5,6) 트레일러의 능동조향은 우수한 궤적 추종 능력을 보여줄 수 있지만, 트레일러 기구의 단순성, 제작 및 운용 비용 측면에서는 바람직하지 못하므로 이 논문에서는 수동 트레일러를 대상으로 연구를 수행하였다. 수동 트레일러는 공장 및 공항의 물류 운송 등에 폭 넓게 이용되고 있는데, 한 예로 공항에서 이용되고 있는 Yamamia의 트레일러가 있다.⁽⁷⁾ 또한, Nakamura 등은 우수한 궤적 추종 능력을 갖는 수동조향 트레일러인 3점 모델(three-point model)을 제안하였다.⁽⁸⁾

본 연구의 목적은 실제 적용을 위한 수동 다중 트레일러 시스템의 설계 및 제어이다. 이 때, 제어의 목적은 견인하는 차체의 궤적인 기준궤적과 트레일러 궤적 간의 추종오차를 최소화시키는 것이다. 여기서 소개되는 세 가지 기구학 모델은 direct-hooked 트레일러, 3점 트레일러 및 off-hooked 트레일러이다. 수동 트레일러에 관한 많은 연구들 중에서 off-hooked 트레일러에 초점을 맞춘 연구는 거의 없는데, 그 이유는 기구학적으로 구조가 복잡하고, 제어가 어렵기 때문이다. Off-hooked 트레일러에 관한 앞의 연구들은 점에서 점으로의 제어(point-to-point control)보다 추종제어에 초점을 맞추

[†] 책임저자, 회원, KIST 지능로봇센터 / 고려대학교 기계공학과
E-mail : quarky@kist.re.kr
TEL : (02)958-6724 FAX : (02)958-5629

^{*} KIST 지능로봇센터
^{**} 고려대학교 기계공학과

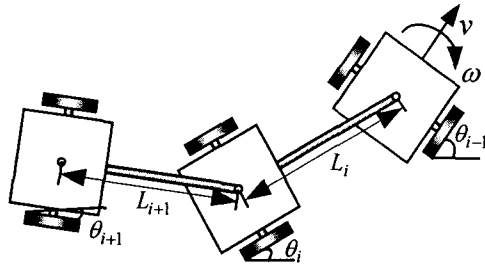


Fig. 1 Direct-hooked trailer

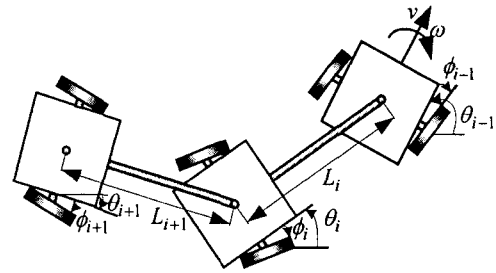


Fig. 2 Three-point trailer

었다.

Bozen⁽⁹⁾과 Altafini⁽¹⁰⁾는 피드백 선형화 방법을 이용한 off-hooked 트레일러의 제어 방법을 제안하였지만, 이 방법을 여러 대의 트레일러로 구성된 시스템으로 확장하는 것은 어렵다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 기구학 모델과 수동 트레일러의 여러 특징들을 설명한다. 등속운동에 의해 얻어지는 기준 궤적 하의 안정화 문제는 3장에서 논의한다. 4장에서는 제안된 off-hooked 트레일러 시스템의 장점을 보여주는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 5장에서는 제안된 트레일러의 축소된 시스템을 구성하고, 이를 이용한 실험을 수행한다. 6장에서는 결론 및 앞으로의 연구과제에 대하여 언급한다.

2. 수동 트레일러의 기구학

일반적으로 수동 트레일러 시스템은 맨 앞에서 트레일러를 견인하는 이동로봇과 그 뒤의 다수의 트레일러로 구성되어 있다. 본 논문에서는 이동로봇과 트레일러를 총칭하여 차체라는 말로 표현하기로 한다. 예를 들어, 트레일러 시스템의 임의의 두 차체를 고려한다면, 이동로봇-트레일러 또는 트레일러-트레일러로 구성된 시스템을 의미한다.

2.1 Direct-hooked 트레일러

Fig. 1은 전형적인 direct-hooked 트레일러 시스템을 나타내고 있다. v_{i-1} 와 $\dot{\theta}_{i-1}$ 는 각각 앞 차체의 선속도와 각속도이며, θ_i 는 트레일러의 각도, L_i 는 연결링크의 길이이다. 트레일러의 바퀴는 조향이 불가능하다. i 번째 트레일러의 기구학 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_i = \frac{1}{L_i} \sin(\theta_{i-1} - \theta_i) v_{i-1} \quad (1)$$

$$v_i = \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) v_{i-1} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터, 앞 차체의 각속도 $\dot{\theta}_{i-1}$ 는 i 번째 트레일러의 운동에 영향을 미치지 않는 점을 알 수 있다. 이 방식은 기구학 모델이 단순하며, 연쇄형(chained form)으로 변환할 수 있다. 이를 이용하여 제어가능성을 쉽게 증명할 수 있으며, 여러 제어가 제안되어 왔다. 그러나 구조가 실제로 적용되는 예와는 다르고 제작하기가 힘들다. 또한, 실제 적용에 있어서는 연쇄형으로 변환하더라도 궤적추종 성능이 향상되지는 않는다. 연쇄형 상태에서 궤적의 생성은 수학적인 ill-conditioned mapping 때문에 관절공간에서의 궤적과 많은 차이가 발생된다.⁽¹¹⁾

2.2 3점 트레일러⁽⁸⁾

Fig. 2는 3점(three-point) 트레일러 시스템의 구조를 보여준다. 이 방식의 가장 큰 특징은 링크 구조를 이용하여 수동조향을 수행하는 점이다. 즉, 바퀴의 조향각 ϕ 는 인접하고 있는 두 트레일러(앞 트레일러 $i-1$ 와 뒤 트레일러 $i+1$)의 위치에 의하여 결정된다.

추종성능은 우수하지만, 기구적인 구조가 복잡하고 제작하기가 어렵다. 또한, 마지막 트레일러의 경우에는 뒤 트레일러가 없으므로 제어가 적절히 수행되지 못하는 문제도 발생한다. i 번째 트레일러의 기구학 방정식은 다소 복잡하게 기술된다.

$$\dot{\theta}_i = \frac{1}{L_i} \{ \sin(\phi_{i-1} - \theta_i) v_{i-1} - \sin(\phi_i - \theta_i) v_i \} \quad (3)$$

$$v_i = \sec(\phi_i - \theta_i) \cos(\phi_{i-1} - \theta_i) v_{i-1} \quad (4)$$

$$\phi_i = \mu(\theta_{i+1} - \theta_i) \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 조향각, μ 는 조향이득(steering gain)을 나타낸다. 3점 트레일러의 구현을 위한 기구적인 설계는 ⁽⁸⁾에서 볼 수 있다.

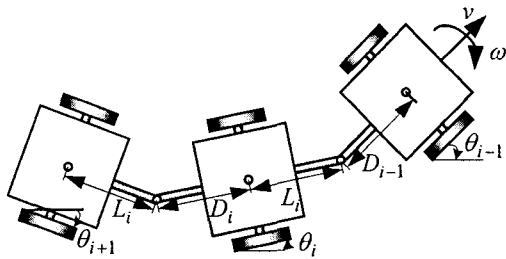


Fig. 3 Off -hooked trailer

2.3 Off-hooked 트레일러

Fig. 3은 off-hooked 트레일러 시스템의 구조를 나타내고 있다. Off-hooked 트레일러는 실제 현장에서 폭 넓게 이용되고 있다. 이 시스템의 단점은 기구학 방정식이 복잡하므로 해석과 제어기의 설계가 어렵다는 점이다. 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 off-hooked 트레일러를 대상으로 링크요소의 최적화와 이를 바탕으로 경로 계획에서의 고려사항을 제시하고자 한다.

이 방식에 대한 기구학 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i = \cos(\theta_{i-1} - \theta_i)v_{i-1} + \sin(\theta_{i-1} - \theta_i)\dot{\theta}_{i-1}D_{i-1} \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_i = \frac{1}{L_i} \{ \sin(\theta_{i-1} - \theta_i)v_{i-1} - \cos(\theta_{i-1} - \theta_i)\dot{\theta}_{i-1}D_{i-1} \} \quad (7)$$

여기서, L_i 와 D_i 는 각각 앞뒤 연결링크의 길이이다. 링크의 설계는 결국 L_i 와 D_i 의 결정에 귀결된다. 바퀴는 조향이 불가능하지만, 이는 기구적인 구현을 단순하게 하는 장점이 있다. L_i 와 D_i 가 같은 경우, 궤적추종 성능은 3점 트레일러와 유사하게 되는데, 이는 4절에서 다루기로 한다. 식 (6)과 (7)의 기구학 방정식이 다소 복잡하며, 연쇄형으로 변환할 수는 없다. 가장 큰 어려움은 이들 식에 $\dot{\theta}_{i-1}$ 이 나타난다는 점이다. 따라서 off-hooked 트레일러는 임의의 형상으로 조향을 하거나 안정화하기 어렵다. 그러나 기구적인 구현은 비교적 쉽고, 궤적추종 성능도 우수한 편이다.

3. 일정 곡률을 갖는 경로에서의 안정성

3.1 Direct hooked 트레일러

견인하는 이동로봇이 원이나 직선의 기준궤적 상에서 이동한다고 가정하자. 그러면 direct-hooked 트레일러 시스템의 임의의 두 차체에서, 앞 차체의 선속도와 각속도는 각각 v 와 ω 로 일정하다고

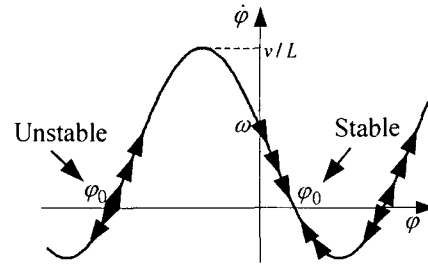


Fig. 4 Phase portrait of direct-hooked trailer

가정할 수 있다. 상대각 ϕ 를 $\phi = \theta_{i-1} - \theta_i$ 로 설정하고, 이를 이용하여 식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\phi} = \omega - \frac{v}{L} \sin \phi \quad (8)$$

식 (8)로부터, 이 시스템의 평형점 ϕ_0 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{v \pm \sqrt{v^2 - (\omega L)^2}}{\omega L} \right), \quad v > \omega L \quad (9)$$

식 (9)에서 $v > \omega L$ 일 경우는 앞 차체의 회전 반경이 링크의 길이보다 클 때를 나타낸다.

Fig. 4는 이 시스템의 위상궤적(phase portrait)을 나타내는데, 이로부터 안정한 평형점 ϕ_0 가 존재한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 견인하는 차체가 일정한 곡률을 갖는 경로상에서 이동한다면 트레일러의 궤적은 어느 한 상태로 수렴하게 된다. 이때, 불안정한 ϕ_0 는 뒤 차체가 앞 차체를 밀고가는 경우를 의미한다. Direct-hooked 트레일러 시스템이 안정한 평형점에 있을 때의 형상은 Fig. 5와 같다.

두 대의 차체로 구성된 시스템에 대하여 안정성을 증명하면, 그 방법을 반복적으로 적용함으로써 다중 수동 트레일러 시스템으로 확장할 수 있다. 이는 수동 트레일러 시스템의 움직임은 앞 차체에 의해서만 영향을 받기 때문이다. Fig. 5에서 앞 차체 궤적의 반지름은 R 이고, 뒤 차체 궤적의 반지름이 r 이다. 그러므로 평형점은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{L}{r} \right) \quad (10)$$

따라서 식 (9)와 (10)으로부터 원하는 뒤 차체 궤적의 반지름이 결정되면, 이로부터 앞 차체의 움직임을 결정할 수 있다. 이 때, 기준궤적의 반지름

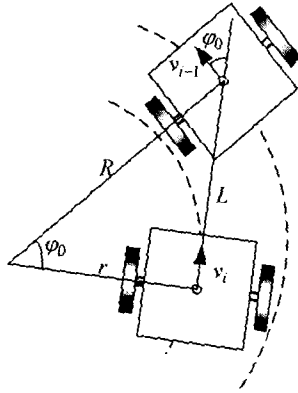


Fig. 5 Direct-hooked trailer on circular trajectory

이 무한대가 아니면, 즉 기준궤적이 직선이 아니면 추종오차가 존재하게 된다는 점에 유의하여야 한다. 또한, 트레일러 수가 증가할수록 추종오차는 커지게 되는데, 추종오차 ϵ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\epsilon = R - r = R - \sqrt{R^2 - L^2} \quad (11)$$

위와 같이 안정된 상태에서의 추종오차 ϵ 는 해석적으로 구할 수 있다. 따라서 이동로봇이 일정한 곡률의 궤적을 이동하는 경우에 전체 시스템이 충돌 없이 진행 가능한 경로의 너비를 예측할 수 있다. 이동로봇이 어떤 곡률의 경로에서 다른 곡률의 경로로 이동할 때 순간적인 움직임은 규정할 수 없지만, 트레일러의 경로 변화가 급격하지 않기 때문에 이 경우에도 식 (11)의 추종오차 ϵ 는 적용될 수 있다.(4.2절 참조) Fig. 6은 ϵ 를 이용한 충돌회피 경로계획의 개략적인 모습을 보여준다.

Direct-hooked 트레일러 시스템은 그 자체로는 폭넓게 이용되고 있지 않지만, Fig. 7과 같이 조향 가능한 네 바퀴의 트레일러 형태로 산업현장에서 많이 이용되고 있다. Direct-hooked 트레일러는 트레일러 수가 증가함에 따라 추종오차가 증가하기 때문에 근본적인 제한요소는 트레일러 수가 된다.

3.2 Off-hooked 트레일러

Off-hooked 트레일러 시스템은 곡률이 변하는 지점에서 일시적인 오차가 존재하고, 이 일시적인 추종오차는 수치계산에 의해 예측할 수 있다. Off-hooked 트레일러 추종오차는 direct-hooked 트레일러보다 작다. 상황을 단순화하기 위해 두 대의 차체로 구성된 트레일러 시스템을 고려해 보자. v 와 ω 가 일정할 때 상대 각속도 $\dot{\phi}$ 은 다음과 같이 유도할 수 있다.

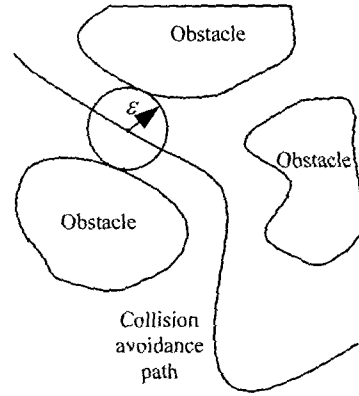


Fig. 6 Path planning for collision avoidance

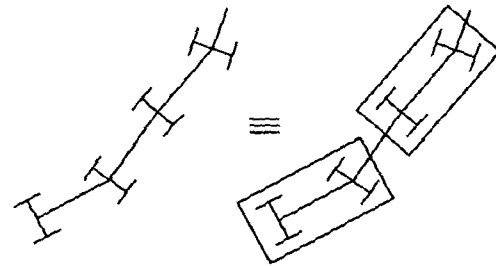


Fig. 7 Steerable four-wheeled trailers

$$\dot{\phi} = \frac{D\omega}{L} \cos \phi - \frac{v}{L} \sin \phi + \omega \quad (12)$$

식 (12)로부터 평형점은 다음과 같이 두가지 경우에 대해서 구할 수 있다.

$$\phi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{v \pm \sqrt{v^2 - (L^2 - D^2)\omega^2}}{(L - D)\omega} \right), \quad L \neq D \quad (13)$$

$$v^2 \geq (L^2 - D^2)\omega^2$$

$$\phi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{v} \right), \quad L = D \quad (14)$$

$\dot{\phi} = 0$ 에 가까운 지점에서 ϕ_0 가 존재한다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 식 (14)의 경우에서 만약, $\phi = \phi_0$ 이면 뒤 차체는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 오차 없이 기준궤적을 추종한다. 이는 off-hooked 트레일러 시스템 링크 요소의 최적화를 의미하며 안정된 상태에서 추종오차가 0으로 수렴함을 볼 수 있다.

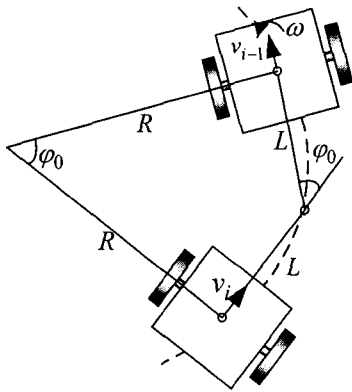


Fig. 8 Off-hooked trailer on circular trajectory

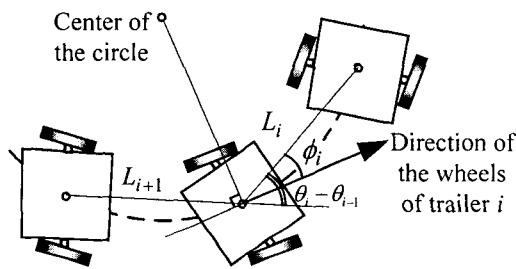


Fig. 9 Three-point trailer on circular trajectory

따라서, 링크 요소가 최적화된 off-hooked 트레일러 시스템 경로 계획은 앞 차체의 이동 경로를 직선과 원으로 구성함으로써 안정된 상태에서의 추종오차가 0이 되게 할 수 있다.

3.3 3점 트레일러

3점 트레일러의 안정화 해석은 direct-hooked 트레일러보다 조금 복잡하다. Fig. 9는 3점 트레일러에서 시스템이 안정화되기 위한 i 번째 트레일러의 바퀴 방향을 보여준다.⁽⁸⁾ 마지막 트레일러의 적절한 제어가 가능하다면 추종성능은 off-hooked 트레일러의 성능과 비슷하게 된다.

4. 시뮬레이션

수동 트레일러의 성능을 조사하고 비교하기 위하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 원형 및 직선형의 두 종류의 기준궤적에 대해 여러 방식의 트레일러의 움직임과 추종오차를 조사하였다. 시뮬레이션은 Matlab을 이용하여 수행하였고, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters used in simulations

| | |
|----------------------------|-------------|
| Number of trailers | 6 |
| Distances between trailers | 1m |
| Trailer size | 0.7m x 0.5m |
| Simulation step size | 0.01sec |

4.1 원형 기준궤적

Fig. 10은 트레일러가 원형 기준궤적을 추종하는 상황에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 트레일러들은 초기에 직선상에 놓여 있다가 이들 트레일러를 견인하는 이동로봇이 반경이 3m인 원형 기준궤적을 추종하면 따라서 움직이게 된다. Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 direct-hooked 트레일러에는 큰 추종오차가 존재한다. 수치계산에 의해 얻어진 궤적은 3.1절의 안정성 해석에 의해 얻어진 궤적과 일치한다. 다수의 트레일러로 구성된 direct-hooked 트레일러 시스템은 큰 추종오차 때문에 현장에 실제로 적용하는 것은 어렵다.

3점 트레일러는 direct-hooked 트레일러의 경우보다 작은 추종오차를 보인다. 그러나 안정된 상태에서 두 개의 다른 궤적이 나타난다. i 번째 트레일러의 조향은 $i-1$ 번째와 $i+1$ 번째 트레일러의 위치에 영향을 받는다. 따라서 뒤 트레일러가 없는 마지막 트레일러는 다른 트레일러와는 다른 거동을 하게 된다. 시뮬레이션에서 마지막 트레일러는 3점 트레일러 모델에 따른 조향을 할 수 없으므로, 마지막 트레일러에 대한 적절한 제어가 없다면 3점 트레일러의 추종오차는 0으로 수렴하지 않는다.

한편, off-hooked 트레일러는 다른 두 방식에 비하여 원형 기준궤적을 잘 추종함을 볼 수 있다. 기준궤적을 따라 계산된 추종오차는 Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이, 가장 큰 곳이 0.08m로 direct-hooked 트레일러의 1.27m와 3점 트레일러의 0.21m에 비하여 매우 작다. 단순한 기구적 구조와 더불어 우수한 추종성능은 off-hooked 트레일러의 또 다른 장점이다.

4.2 직선형 기준궤적

실제로 트레일러를 운용할 때 트레일러 시스템은 예각의 모서리나 교차로 등을 만나게 된다. Fig. 11은 트레일러가 4개의 직선구간으로 구성된 직선형 기준궤적을 추종하는 상황에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 두 직선이 예각으로 만나는 모서리에서는 회전반경 1m의 곡선 기준궤적을 삽입하여 부드러운 운동이 가능하도록 하였다. Fig. 11의 시뮬레이션 결과 또한 직선형 기준궤적에서

off-hooked 트레일러의 성능이 다른 방식에 비하여 우수함을 보여준다. Direct-hooked 트레일러의 경우, 거의 모든 지점에서 가장 큰 오차는 마지막 트레일러에 의해 발생된다. 따라서 충돌 없이 운전이 가능한 경로의 폭에 의해 트레일러의 대 수가 제한된다.

한편, 3점 트레일러와 off-hooked 트레일러의 경우에 대해서는 수치계산에 의해 추종오차를 예측할 수 있다. Off-hooked 트레일러의 경우에 Fig. 11(c)에서 90° 회전시 요구되는 충돌회피 경로의 폭은 1.2m로, 이는 direct-hooked의 5.3m 및 3점 트레일러의 2.1m에 비해 현저하게 작은 값이다. Fig. 12(b)는 계산된 추종오차를 보여주고 있다. 각 트

레일러에서 추종오차가 가장 큰 곳의 추종오차는 각각 direct-hooked 트레일러가 2.41m, 3점 트레일러가 0.72m 그리고 off-hooked 트레일러가 0.32m로 off-hooked 트레일러가 가장 작다. Off-hooked 트레일러의 경우에도 회전구간에서 약간의 추종오차가 존재하게 되는데, 이는 직선에서 원으로 곡률이 변하기 때문이다.

한편, off-hooked 트레일러에서는 기준궤적의 곡률반경이 트레일러 링크 길이의 절반 이하로 작을 때 트레일러 간에 간섭이 발생할 정도로 지그재그 현상이 심해지는 것을 알 수 있었다. 이러한 경우는 기구적 요소의 설계와 경로계획에 있어 상호보완적인 고려가 필요하다.

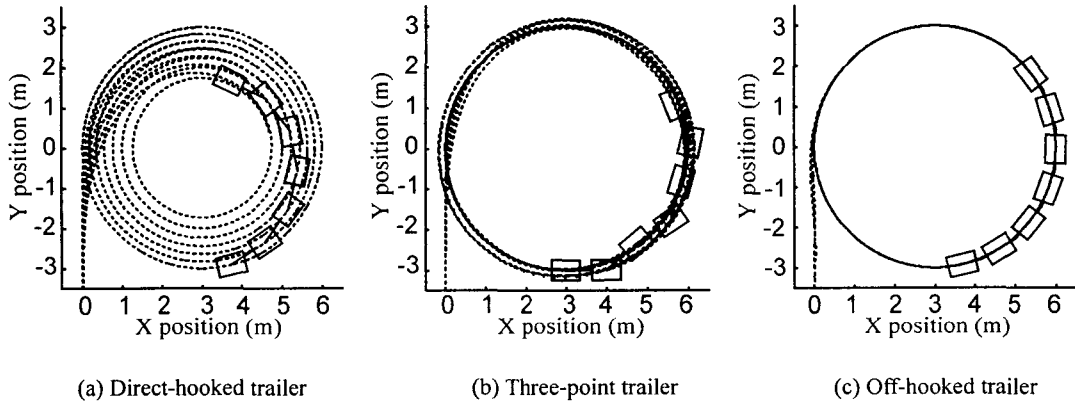


Fig. 10 Simulation results for circular reference trajectory

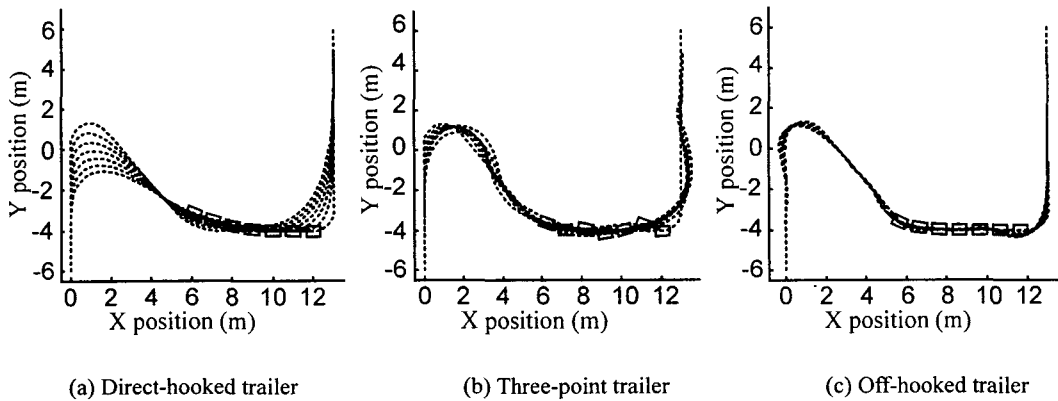


Fig. 11 Simulation results for linear reference trajectory

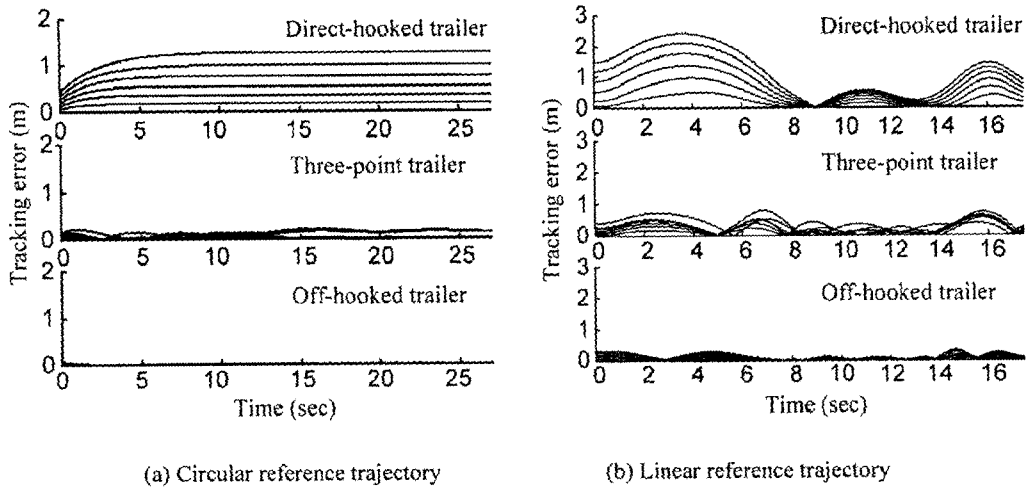


Fig. 12 Tracking errors

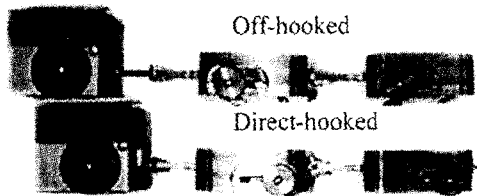


Fig. 13 Two trailer systems used in experiments

5. 실험

5.1 실험 장치

Off-hooked 트레일러 시스템의 특성을 조사하기 위하여 소형의 모형 트레일러 시스템을 제작하였다. 이동로봇과 트레일러, PC(P3 500MHz), 비전시스템(삼성 CCD카메라, Matrox meteor-II standard), 무선통신 모듈(Radiometrix RF module) 등으로 구성된 실험장치를 준비하였다. 실험장치는 로봇축구 시스템을 활용하여 설계하였다. 이동로봇과 트레일러의 크기(mm)는 각각 75x75x70와 75x70x35이다. Fig. 13은 실험에 사용한 두 방식의 트레일러를 보여준다. 첫째 트레일러에서는 $L=115$ 와 $D=15$ 로 정하였는데, 이는 direct-hooked 트레일러에 근접한 움직임을 보여준다. 둘째 트레일러에서는 $L=65$ 와 $D=65$ 로 정했는데, 이는 본 논문에서 제안한 off-hooked 트레일러와 같다

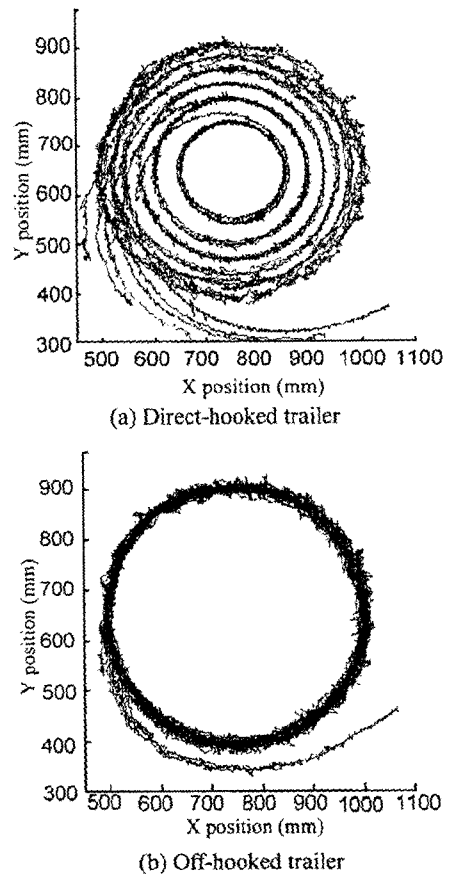


Fig. 14 Experimental results for circular refer trajectory

5.2 실험 결과

5.2.1 원형 기준궤적

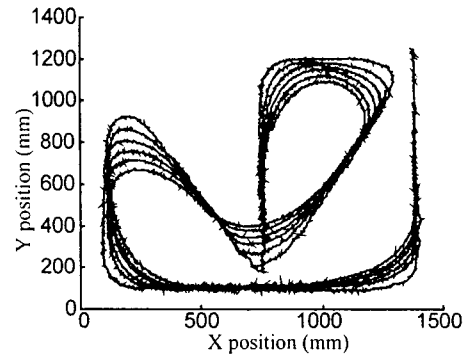
우선 이동로봇이 원형 기준궤적을 따라서 이동하는 실험을 수행하였으며, 비전시스템으로 측정된 궤적을 Fig. 14에 나타내었다. 이 때, 각 이동로봇의 선속도와 각속도는 일정하게 유지하여 이동로봇을 반경 250mm인 원형 기준 궤적을 따라 이동하였다. Direct-hooked 트레일러의 궤적들은 각각 다른 원으로 수렴함을 볼 수 있다. $i+1$ 번째 트레일러 궤적의 반지름은 i 번째 트레일러 궤적의 반지름보다 작다. 그러나 off-hooked 트레일러 시스템에서는 각 트레일러가 그리는 원이 거의 일치한다. 이들 실험은 앞의 시뮬레이션과 거의 동일한 결과를 보여준다. 실험결과는 비전시스템으로부터 측정된 것으로 정확하다고 볼 수는 없지만, off-hooked 트레일러의 경우 추종 오차는 15mm인 반면 direct-hooked 트레일러의 추종 오차는 150mm이다.

5.2.2 직선형 기준궤적

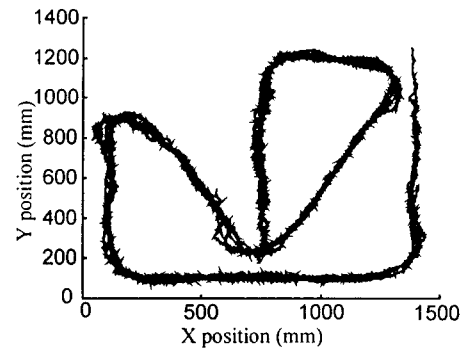
Fig. 15는 트레일러 시스템의 응용에서 자주 접하게 되는 예각의 모서리를 갖는 기준궤적에 대한 추종 실험 결과이다. 각 모서리에서의 회전 반경은 100mm이고, (x, y) 가 각각 (1400, 300)인 지점에서 출발하여 (750, 200)인 지점에서 멈춘다. 직선형 기준궤적에 대한 시뮬레이션을 나타낸 Fig. 11에서와 유사한 실험 결과를 볼 수 있다. Off-hooked 트레일러의 경우 지그재그 현상이 나타나는데, 이는 곡률반경이 트레일러 링크의 길이보다 작아서 나타나는 현상이라기 보다는, 비전시스템에서 측정되는 이동로봇의 위치가 정확하지 않기 때문이다. 이로부터 로봇의 위치제어가 불안정하고 로봇의 움직임에 민감한 트레일러 시스템에 지그재그 현상이 나타난다. 그러나, direct-hooked 트레일러의 궤적은 가장 큰 추종 오차가 274mm인데 비해 off-hooked 트레일러의 경우는 105mm로 작은 추종 오차를 보임으로써, off-hooked 트레일러의 우수성을 보여주고 있다.

6. 결론

세 종류의 트레일러 시스템의 기계적인 구조와 기구학에 대해 알아보았다. Off-hooked 트레일러는 기구학 방정식이 다소 복잡하지만, 기구적인 구조는 다른 트레일러에 비해 단순하다. 기구적인 해석으로부터 off-hooked 트레일러의 안정된 상태에서의 추종오차가 0이 되는 것을 알 수 있었다.



(a) Direct-hooked trailer



(b) Off-hooked trailer

Fig.15 Experimental results for linear reference trajectory

시뮬레이션 결과와 실험결과에서는 기준궤적에 대한 추종능력을 통해 즉 추종오차의 크기로부터 각 트레일러의 성능을 알아 보았다. Off-hooked 트레일러의 경우 직선형 기준궤적에서의 추종오차가 direct-hooked 트레일러에 비해 시뮬레이션 결과에서는 1/7, 실험 결과에서는 1/3로 매우 작은 것을 알 수 있었다.

한편, 실제 경로 계획에서 중요한 주행 가능 경로 폭은 시뮬레이션 결과에서 off-hooked 트레일러, direct-hooked 트레일러 각각 1.2m 와 5.3m로 off-hooked 트레일러가 더 좁은 폭의 경로에서 움직일 수 있음을 알 수 있다. 이는 다른 수동 트레일러 시스템에 비해 off-hooked 트레일러 시스템이 실제 적용에 타당하다는 것을 보여준다. 안정성 해석, 수치해석적 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 off-hooked 트레일러 시스템의 우수성을 보여줄 뿐만 아니라, 수동 트레일러 시스템 경로계획에 있어 추종오차를 고려한 충돌회피 기준궤적의 설정 방안을 제시하고 있다.

앞으로 실제 off-hooked 트레일러 시스템의 제작을 통한 실험과 동특성을 고려한 경로 계획 및 제어 방안이 필요하다.

참고문헌

- (1) Laumond, J. P., 1993, "Controllability of a Multibody Mobile Robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 6, pp. 755~763.
- (2) Murray, R. M. and Sastry, S. S., 1993, "Nonholonomic Motion Planning: Steering Using Sinusoids," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38, No. 5, pp. 700~716.
- (3) Tilbury, D. M., Murray, R. M. and Sastry, S. S., 1993, "Trajectory Generation for n -Trailer Problem Using Goursat Normal Form," *Proc. of the IEEE Control and Decision Conference*, pp. 971~977.
- (4) Sordalen, O. J. and Wichlund, K.Y., 1993, "Exponential Stabilization of a Car with n Trailers," *Proc. of 32nd Conference on Decision and Control*, pp. 978~983.
- (5) Canudas de Wit, C., NDoudi-Likoho, A. D. and Micaelli, A., 1997, "Nonlinear Control for a Train-Like Vehicle," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 300~319.
- (6) Fukushima, E. F., Hirose, S. and Hayashi, T., 1998, "Basic Considerations for the Articulated Body Mobile Robot," *IROS98*, pp. 386~393.
- (7) Yamamiya, K., 1990, "Yamamia's Trailer," Japanese patent official report B62D13-00, H2-189285.(In Japanese)
- (8) Nakamura, Y., Ezaki, H. and Chung, W., 1999, "Design of Steering Mechanism and Control of Nonholonomic Trailer Systems," *Journal of Robotics Society of Japan*, pp. 839~847. (In Japanese)
- (9) Bolzern, P., Desantis, R. M., Locatelli, A. and Masciocchi, D., 1993, "Path-Tracking for Articulated Vehicles with Off-Axle Hitching," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 515~523.
- (10) Altafini, C., 1999, "A path-tracking Criterion for an LHD Articulated Vehicle," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 435~441.
- (11) Chung, W. and Nakamura, Y., 1997, "Design of the Chained Form Manipulator," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 455~461.
- (12) Kim, J. W., 2000, *Robot Soccer System*, 1st edition, Daeyoungsa.(In Korean)