

무인 자율 주행 지게차 구현을 위한 네트워크 기반 분산 접근 방법

Network-based Distributed Approach for Implementation of an Unmanned Autonomous Forklift

송영훈, 박지훈, 이경창, 이석*

(Young Hun Song¹, Jee Hun Park¹, Kyung Chang Lee², and Suk Lee¹)

¹Pusan National University

²Pukyong National University

Abstract: Unmanned autonomous forklifts have a great potential to enhance the productivity of material handling in various applications because these forklifts can pick up and deliver loads without an operator and any fixed guide. There are, however, many technical difficulties in developing such forklifts including localization, map building, sensor fusion, control and so on. Implementation, which is often neglected, is one of practical issues in developing such an autonomous device. This is because the system requires numerous sensors, actuators, and controllers that need to be connected with each other, and the number of connections grows very rapidly as the number of devices grows. Another requirement on the integration is that the system should allow changes in the system design so that modification and addition of system components can be accommodated without too much effort. This paper presents a network-based distributed approach where system components are connected to a shared CAN network, and control functions are divided into small tasks that are distributed over a number of microcontrollers with a limited computing capacity. This approach is successfully applied to develop an unmanned forklift.

Keywords: unmanned autonomous forklift, network-based distributed control system, autonomous control, embedded control system, CAN (Controller Area Network)

1. 서론

제조 설비나 자동 창고에서 선반(rack)에 있는 물자를 적재하고 운반하는데 사용되는 지게차(forklift)나 운반 차량은 물류 시스템에 있어서 중요한 요소 중의 하나이다. 수십 년 동안 물류 시스템의 생산성을 향상시키기 위하여 지게차나 운반 차량의 무인화에 대한 연구와 개발이 지속적으로 진행되어 왔다. 가장 대표적인 형태인 무인 팔레트 트럭(automated pallet truck)은 팔레트를 적재할 때는 운전자에 의하여 조정되고, 이동할 때는 바닥에 설치된 바닥 유도선(embedded guide wire)나 페인트 띠(paint strip) 등을 따라 정해진 경로를 따라 자동으로 움직인다[1].

최근에는 물류 시스템의 유연성을 향상시키기 위하여 자율 주행 기술(autonomous vehicle)이 적용된 무인 팔레트 트럭이나 포크(fork)의 운전까지 자동화된 무인 자율 주행 지게차(unmanned autonomous forklift)에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다[2,3]. 자율 주행 기술은 바닥 유도선을 설치하기가 어려운 환경이나 먼지 등에 의해 페인트 띠를 깨끗하게 유지하기 어려운 환경에서도 무인 지게차를 사용 가능하게 만들고 있다[4]. 뿐만 아니라 비전 시스템이나 레이저 센서를 이용한 포크 운전의 자동화에 따라 물류 시스템은 비약적으로

발전하고 있다[5].

무인 지게차와 같은 무인 운반 차량(automated guided vehicle)을 구현하기 위해서는 차량의 주행 및 조향 제어, 차량의 위치 인식, 환경 인식, 장애물 감지 및 회피, 작업 할당, 경로 계획, 팔레트 인식 등과 같은 다양한 요소 기술들이 필요하다[6,7]. 주로, 이러한 요소 기술은 응용 분야에서의 필요성에 따라 독립적이거나 통합된 주제로서 연구되어 왔으며 다수의 실용적인 연구 성과들이 제안되었다[8-10].

그러나 최근 들어 보다 더 지능적인 무인 운반 차량을 개발하기 위하여 보다 더 많은 요소 기술들이 필요하게 되었으며 시스템 레벨에서 수 많은 요소 기술들의 통합이 필요하게 되었다. 일반적으로 이러한 요소 기술들의 통합은 매우 어려운 작업으로써 다양한 문제를 일으키는 것으로 알려져 있다. 예로 무인 운반 차량의 고속 고정밀 제어를 위하여 보다 더 복잡한 자율 주행 알고리즘이나 환경 인식 알고리즘을 사용하게 되면 연산량이 기하급수적으로 증가하게 된다. 이로 인하여 알고리즘들을 처리하는 프로세스의 용량이 점점 더 크게 될 뿐만 아니라 하나의 프로세스로는 처리하지 못하는 상황이 올 수도 있다[11]. 또한 센서나 액츄에이터, 제어기와 같은 전자 장치(electronic device)의 사용이 점차 증가하게 되면 장치를 연결하기 위한 내부 배선도 함께 증가하게 된다. 이러한 배선의 증가는 시스템을 더욱 복잡하게 만들어 요소 기술의 통합을 더욱 어렵게 만들 뿐만 아니라 시스템의 확장을 더욱 어렵게 만든다.

본 논문에서는 무인 자율 주행 지게차에서 요소 기술 통합의 복잡성과 배선의 증가 문제를 해결하기 위한 방법으로서,

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 3. 23., 수정: 2010. 5. 11., 채택확정: 2010. 6. 25.

송영훈, 박지훈, 이석: 부산대학교 기계공학부

(embedded@pnu.edu/network@pnu.edu/slee@pnu.edu)

이경창: 부경대학교 제어계측공학과(gclee@pknu.ac.kr)

※ “이 논문은 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임”(지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단).

자동차에서 주로 사용되고 있는 차량 내부 네트워크(IVN: In-Vehicle Network)[12]를 이용한 네트워크 기반 분산 제어 시스템을 이용한 무인 자율 주행 지게차에 대하여 제안한다. 본 논문에서 제안하는 네트워크 기반 분산 제어 시스템에서는 무인 자율 주행 지게차를 위하여 필요한 지게차의 위치 인식이나 포크 제어, 주행 제어, 장애물 인식 등과 같은 요소 기술들이 개별 모듈로 구현된다. 또한 개별 모듈들은 자동차에서 주로 사용되는 CAN을 이용하여 연결되고 모듈간에 필요한 정보 전송이 원활하게 이루어진다. 이러한 구조를 채택하는 경우, 센서나 액추에이터, 제어기 등을 손쉽게 확장할 수 있을 뿐만 아니라 요소 기술들을 여러 개의 마이크로컨트롤러로 분산시킴으로서 메인 프로세스의 연산량을 줄여줄 수 있다는 장점이 있다. 또한 각 모듈들은 네트워크를 통하여 획득된 정보들을 이용하여 알고리즘을 구현할 수 있기 때문에 보다 더 지능적인 자율 주행 기능을 만들 수 있다는 장점이 있다.

본 논문은 서론을 포함하여 V 장으로 구성되어 있다. II 장에서는 무인 자율 주행 지게차를 위한 네트워크 기반 분산 제어 시스템의 구조에 대하여 설명한다. III 장에서는 네트워크 기반 분산 제어 시스템을 적용하여 제작된 무인 자율 주행 지게차에 대하여 설명하며, IV 장에서는 제작된 무인 자율 주행 지게차의 주행 성능을 평가한다. 마지막으로 V 장에서는 결론과 향후 과제를 제시한다.

II. 무인 자율 주행 지게차를 위한 네트워크 기반 분산 제어 시스템

1. 무인 자율 주행 지게차를 위한 요소 기술

무인 자율 주행 지게차를 위해서는 그림 1과 같이 다양한 요소 기술들이 필요하다[6]. 첫째, 가장 기초적인 요소 기술 중의 하나는 지게차의 위치 인식(location aware) 기술이다. 위치 인식 시스템으로부터 생성된 지게차의 좌표(position)와 방향(orientation)은 경로 계획(path planning)이나 경로 추종 제어(path following control)을 위한 기초 자료가 된다. 둘째, 장애물

감지나 포크 제어 등을 위하여 레이저 스캐너(laser range finder), 초음파 센서(ultrasonic sensor), 포크 위치 센서(fork height sensor) 등과 같은 센서의 입력을 위한 센싱(sensing) 기술이 필요하다. 셋째, 보다 더 지능적인 장애물 감지나 포크 제어를 위하여 비전(vision) 기술이 필요하다. 넷째, 지게차가 원활하게 움직이기 위해서는 맵 생성(map building)과 경로 계획(path planning) 기술이 필요하며 원활한 작업을 위하여 작업 할당(task allocation) 기술이 필요하다. 이러한 기능들은 지게차의 외부에 구성되기도 하고 지게차들간의 정보 교환에 의하여 이루어지기도 한다. 또한 이러한 정보 교환을 위하여 무선 통신(wireless communication) 기술이 요구된다. 다섯째, 무인 자율 주행 지게차의 가장 중요한 기술은 경로 추종 제어나 장애물 회피 제어(obstacle avoidance control), 포크 적재/하역 제어(fork loading/unloading control)이다. 이러한 기술에는 원하는 기능이 수행될 수 있도록 센서로부터 수집된 정보를 이용하여 모터 제어 시스템을 동작시키는 기능이 포함된다. 마지막으로, 무인 자율 주행 지게차는 앞에서 언급한 각각의 기능을 통합할 수 있는 적절한 제어 알고리즘을 가진 제어기를 이용하여 주어진 명령을 만족시킬 수 있도록 액추에이터를 제어한다.

뿐만 아니라 무인 자율 주행 지게차에서는 다양한 기능을 추가하여 보다 더 빠르고 정확하게 작동시킬 수 있다. 예로, 위치 인식 시스템의 정확도를 높이기 위하여 지게차의 바퀴(wheel)에 엔코더를 설치할 수도 있으며 전자 나침반(electronic compass)을 설치할 수도 있다. 또한 보다 더 정확한 장애물 감지를 위하여 다수의 레이저 스캐너나 초음파 센서를 설치하고 이의 융합을 통하여 장애물을 감지할 수도 있다.

그러나 무인 자율 주행 지게차의 성능을 향상시키기 위하여 보다 더 많은 센서를 사용하게 되면 센서와 프로세서를 연결하기 위한 AD 컨버터(analog to digital converter)가 필요하게 되고 이를 연결하기 위한 배선이 필요하게 된다. 뿐만 아니라, 각종 기능을 처리하기 위하여 프로세스의 연산량이 증가하거나 추가적인 프로세스가 요구될 수도 있다. 이러한 배선과 프로세스의 증가는 시스템을 복잡하게 만들어 무인 자율 주행 지게차의 신뢰성 있는 동작을 방해할 뿐만 아니라 유지 보수의 어려움을 야기시키게 된다. 특히, 하나의 프로세스에서 여러 기능들을 수행하게 되는 경우 각 기능들의 신뢰성 있는 동작을 위하여 실시간 운영 체제(RTOS: Real-Time Operating System)가 필요할 수도 있다[13]. 그러나 RTOS는 또 다른 구현상의 어려움을 야기시키게 되고, 시스템의 가격 상승 요인으로 작용하기도 한다.

2. 네트워크 기반 분산 제어 시스템의 구조

그림 2는 무인 자율 주행 지게차의 복잡도를 줄이고 유연성을 증가시킬 수 있는 네트워크 기반 분산 제어 시스템의 구조를 나타내고 있다. 제안된 분산 제어 시스템 구조에서는 무인 자율 주행 지게차에서 요구되는 각 기능들이 모듈화되어 독립적으로 동작되고 각 모듈들은 네트워크를 통하여 전송되는 각종 정보를 이용하여 해당 기능을 동작시키게 된다. 예로, 주행 제어 모듈(traction control module)에는 주행 모터 제어 알고리즘이 내장되어 있고, 다른 모듈로부터 주행 방향이나 주행 각도 등을 입력으로 받아 주행 모터를 동작시키게

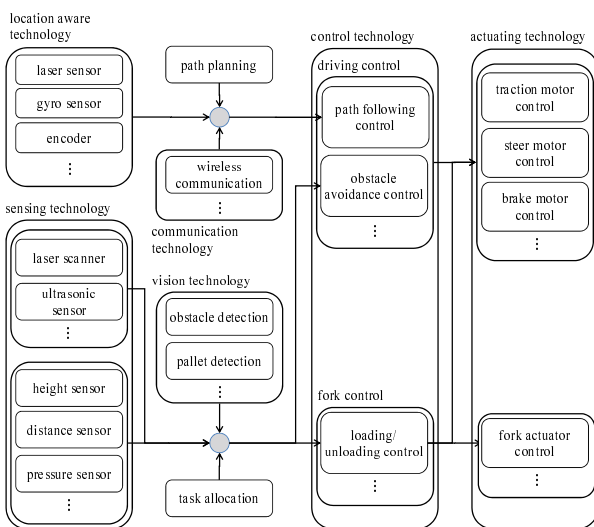


그림 1. 무인 자율주행 지게차의 요소기술.
Fig. 1. Elementary technology for unmanned autonomous forklift.

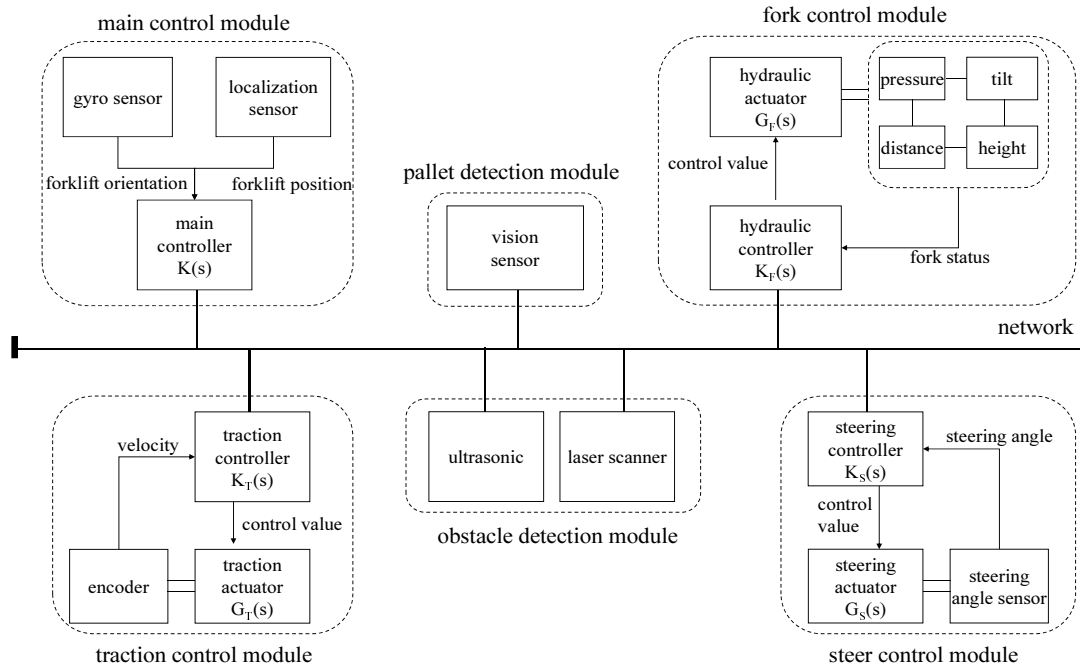


그림 2. 분산 제어 네트워크 기반 무인지게차의 구성도.
 Fig. 2. Distributed control network-based unmanned forklift.

된다. 특히, 분산 제어 시스템에서는 네트워크를 통하여 각종 정보들이 공유되기 때문에 새로운 기능을 가지는 모듈을 손쉽게 추가할 수 있다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 특정 모듈의 기능을 개선할 때 해당 모듈에 탑재된 프로그램만 수정함으로써 다른 모듈에 영향을 미치지 않고 기능을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 특징들은 전체 시스템의 유연성을 증가시켜주고 시스템 복잡도를 줄여준다. 다만, 네트워크 기반 분산 제어 시스템에서는 네트워크를 통하여 전달되는 정보에 대한 정비가 명확하게 이루어져 있어야 하며 모든 모듈들은 동일한 메시지 규격을 이용하여 네트워크에 참여하여야 한다는 강제 사항이 존재한다.

그림에서 무인 자율 주행 지게차를 위하여 구성된 네트워크 기반 분산 제어 시스템은 6개의 모듈로 구성되어 있다. 첫째, 주 제어 모듈(main control module)은 무인 자율 주행 지게차의 차체(body) 제어를 담당한다. 그림에서 통합 제어기(K(s))는 외부 작업 할당기에서 작업 정보를 무선으로 수신 받아서 경로를 생성하고 네트워크를 통해 주행 제어 모듈과 조향 제어 모듈에 제어량을 전송한다. 그리고 지속적으로 차체의 각도와 위치를 비교하여 최종 목적지까지의 차체의 주행 속도와 조향 각도를 제어한다. 또한 통합 제어기는 장애물 감지 모듈로부터 장애물 정보를 수신하여 경로를 재 생성하거나, 포크 제어 모듈로부터 팔레트 위치 정보를 수신하여 지게차의 포크에 제어량을 전송한다.

둘째, 주행 제어 모듈(traction control module)은 지게차의 차속을 제어하는 역할을 담당한다. 그림에서 $K_T(s)$ 는 속도 제어를 의미하며, $G_T(s)$ 는 주행 모터를 의미한다. 주행 제어 모듈은 네트워크를 통해 주 제어 모듈로부터 속도값을 수신하여 속도값이 갱신될 때까지 수신된 차속을 유지한다.

셋째, 조향 제어 모듈(steer control module)은 지게차의 조향

각도를 제어하는 역할을 담당한다. 그림에서 $K_S(s)$ 는 조향 제어를 의미하며 $G_S(s)$ 는 조향 모터를 의미한다. 조향 제어기는 네트워크를 통해 주 제어 모듈로부터 조향값을 수신하여 조향값이 갱신될 때까지 수신된 조향 각도를 유지한다. 조향 제어 모듈은 지게차의 전역 좌표계상의 자세와는 별개로 주 제어 모듈로부터 수신된 조향 각도만을 제어한다.

넷째, 포크 제어 모듈(fork control module)은 지게차에 설치된 포크의 높이와 각도, 거리를 제어하는 역할을 담당하며 유압 실린더에 연결된 압력 센서를 통해서 물품의 적재 유무를 판단한다. 그림에서 $K_f(s)$ 는 포크 제어기를 의미하며, $G_f(s)$ 는 유압 모터를 의미한다. 포크 제어 모듈은 네트워크를 통해 주 제어 모듈로부터 포크의 높이값을 수신하여 지게차의 포크를 제어한다.

다섯째, 팔레트 감지 모듈(pallet detection module)은 팔레트와 지게차와의 거리 및 팔레트가 놓여져 있는 각도, 팔레트에 있는 포크가 들어가는 홈의 위치를 계산하는 역할을 담당한다. 팔레트 감지 모듈은 비전 센서로부터 영상을 획득한 후 상대 거리와 팔레트의 위치를 계산하여 네트워크를 통하여 전송한다.

마지막으로 장애물 감지 모듈(obstacle detection module)은 단거리 장애물 감지 모듈과 중거리 장애물 감지 모듈로 구분된다. 단거리 장애물 감지 모듈은 여러 개의 초음파 센서를 이용하여 지게차의 회전 반경을 고려한 근접 장애물의 감지를 담당하며 이 영역에서 장애물이 감지되면 즉시 장애물의 정보를 주 제어 모듈로 전송한다. 그리고 중거리 장애물 감지 모듈은 레이저 스캐너를 이용하여 주 제어 모듈이 장애물 회피 경로를 생성할 수 있도록 진행 방향에 존재하는 장애물의 상대 거리 및 상대 각도를 측정하여 네트워크를 통해 전송한다.

III. 무인 자율 주행 지게차의 구현

네트워크 기반 분산 제어 시스템이 적용된 무인 자율 주행 지게차를 개발하기 위하여 사용된 지게차 모델은 그림 3 과 같은 CLARK사의 입식 전동식 지게차인 CRX-10 모델이다. 그림에서 전동식 지게차는 4.2KW의 AC 모터를 주행 모터로 사용하는 1.0톤급 전동식 지게차로 8.3KW의 유압 모터, 0.15KW의 조향 모터를 함께 사용하고 있다. 지게차 하부에는 전방 양쪽으로 캐스터(caster) 휠 2개와 후방 오른쪽 캐스터 휠 1개, 후방 왼쪽 메인 휠(main wheel) 1개로 구성된 4개의 바퀴가 설치되어 있으며 무 부하시 지게차의 최대 주행 속도는 9.8Km/h이다. 그러나 평균 주행 속도는 안정성 등의 이유로 부하시 5.0Km/h가 권장 사항이다[14].

무인 자율 주행 지게차를 구현하기 위하여 주 제어 모듈에는 Freescale사의 16비트급 MCU인 MC9S12XF512가 사용되었으며, 지게차의 전역 위치를 측정하기 위하여 SICK사의 레이저 기반 위치 인식 시스템인 NAV200가 사용되었다. NAV200은 작업 영역에 기 설치되어 있는 리플렉터(reflector)와의 거리 값을 삼각 측정하여 현재 위치와 방향 정보를 계산할 수 있으며, 20m~30m의 영역에서 최소 4mm 및 0.1° 이내의 측정 오차를 가진다. 그리고 지게차의 전역 위치를 보정하기 위하여 최대 300%/s의 각속도를 측정할 수 있는 myGyro300SPI 자이로 센서를 사용하였다. 둘째, 주행 제어 모듈에는 ATmel사의 8비트급 MCU인 AT90CAN128이 사용되었으며 주행 속도의 피드백을 위하여 기존 지게차에 실장되어 있는 홀 타입(hall type) 엔코더가 사용되었다. 셋째, 조향 제어 모듈에는 AT90CAN128이 사용되었으며 조향 각도의 피드백을 위하여 가변 저항이 조향 모터 기어에 설치되었다. 넷째, 포크 제어 모듈은 포크의 현재 위치를 측정하기 위한 높이 센서(height sensor), 압력 센서(pressure sensor), 기울기 센서(tilt sensor), 거리 센서(distance sensor)와 포크 제어를 위한 AT90CAN128 MCU로 구성되었다. 높이 센서로는 0~7.5m까지 측정 가능한 Celesco사의 장거리용 와이어식 변위 센서인



그림 3. 자율주행을 위한 센서와 액추에이터를 설치한 CLARK사의 CRX-10 지게차 실험모델.

Fig. 3. CLARK CRX-10 forklift experimental model with sensors and actuators for autonomous driving.

PT9510가 사용되었고 화물의 무게를 판단하기 위한 유압 압력 센서로는 Honeywell사의 유량 센서가 사용되었다. 다섯째, 팔레트 감지 모듈에는 USB 인터페이스를 지원하는 HVR-2030CA 30만화소급 CMOS 싱글 카메라와 이미지 프로세싱을 담당하는 노트북이 사용되었다. 마지막으로 장애물 감지 모듈은 감지 범위에 따라 2가지 형태로 구현되었다. 우선 7m 범위 내에 존재하는 장애물의 위치를 측정하기 위하여 SICK사의 레이저 거리 측정 센서인 LMS200이 사용되었다. LMS200은 평면상의 180° 범위를 스캔(scan)하여 장애물의 위치 및 상대 각도를 측정할 수 있으며, 지게차에는 전방 좌우 각각 1개씩, 후방 중앙 1개가 설치되었다. 그리고 2.5m 이내에 존재하는 근접 장애물을 감지하여 긴급 정지를 하기 위해 SensorTech사의 STMA-506ND 초음파 센서가 사용되었다. 또한 각 장애물 감지 모듈별로 센서 신호 처리를 위하여 AT90CAN128이 사용되었다.

위에서 기술한 센서와 제어기의 정보를 교환하기 위해 설계한 메시지의 ID와 데이터 길이, 신호는 메시지의 중요도에 따라 표 1과 같이 설계하였다.

그림 4는 기구학적 해석을 통해 CRX-10에 있는 메인 휠의 조향 각도(S_0)에 따른 지게차 회전 반경을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 지게차의 메인 휠(W_m)은 지게차의 주행 및 조향을 담당하는 역할을 하며, 진행 방향을 기준으로 +90°에

표 1. 무인 지게차를 위해 설계한 메시지.

Table 1. Message table for unmanned forklift.

CAN ID	Period (msec)	Length [bit]	Signal
0x01h	-	8	cmd_emergency_stop
0x02h	-	32	node_error_check
0x0Ah	100	16	target_velocity
		32	target_steer_angle
		16	target_fork_height
0x14h	100	8	current_forklift_position_type
		32	current_forklift_position_data
0x19h	100	16	current_forklift_velocity
0x1Eh	100	16	current_steer_angle
0x28h	100	16	current_fork_height
		16	current_fork_distance
		16	current_fork_tilt_angle
		16	current_fork_pressure
0x32h	100	8	left_obstacle_warning
0x3Ch	100	8	right_obstacle_warning
0x46h	100	8	rear_obstacle_warning
0x64h ~ 0x6Bh	100	8	sensor_ID
		24	obstacle_distance
0x78h	-	16	vision_pallet_x_position
		16	vision_pallet_y_position
		16	vision_pallet_z_position
		16	vision_pallet_theta
0x96h	-	32	cmd_target_x_position
		32	cmd_target_y_position
0x97h	-	32	cmd_target_fork_height
		32	cmd_target_forklift_phi
0xC8h	100	16	current_forklift_status

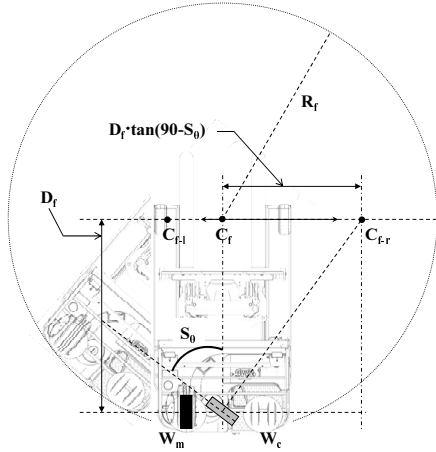


그림 4. 지게차의 기구학적 해석.
Fig. 4. Kinematics analysis of forklift.

서 -90° 까지 조향 각도를 조절할 수 있다[14]. 그림에서 지게차가 이상적으로 직진을 한다고 가정했을 경우($S_0=0^\circ$), 지게차의 회전 중심은 이론적으로 ∞ (무한대)가 된다. 반대로 메인 휠과 캐스터 휠이 지게차의 진행 방향과 정확하게 수직일 경우($S_0=\pm 90^\circ$) 지게차의 회전 중심은 도식에서 나타낸 C점으로서 최소의 회전 반경($R_r=1480\text{mm}$)을 가지게 된다. 그리고 메인 휠의 조향 각도가 0° (진행방향) $\sim \pm 90^\circ$ (수직방향)으로 변화할 때, 회전 중심은 $\pm\infty \sim 0$ (중심점)으로 이동하게 된다. 이를 이용하면, 지게차의 조향 각도 S_0 에 따른 지게차의 회전 중심축은 차축의 길이를 D_f 로 했을 때 중심점인 C_r 점에서부터 $D_f \cdot \tan(90 - S_0)$ 만큼 이동된 지점에 존재하게 된다.

IV. 무인 자율 주행 지게차의 주행 성능 평가

본 장에서는 네트워크 기반 분산 제어 시스템이 적용된 무인 자율 주행 지게차의 성능을 평가하기 위하여 몇 가지 실험을 수행하였다. 먼저 그림 5는 개발된 무인 자율 주행 지게차에서 간단한 주행 성능을 평가하기 위한 블록 선도를 나타내고 있다. 그림에서 주 제어 모듈과 주행 제어 모듈, 조향 제어 모듈은 CAN 네트워크를 통하여 연결되어 있으며, 제어에 필요한 정보들은 네트워크를 통하여 교환된다. 먼저 주 제어 모듈에는 단순한 경로 추종 알고리즘이 들어가 있다. 경로 추종 알고리즘은 계산된 목표 입력($R(S)=\{x, y, \theta\}$) 즉, 목표 위치와 목표 방향을 이용하여 100msec 주기로 지게차의 주행 속도($r_f(S)$)와 조향 각도($r_s(S)$)를 계산한 후 CAN 네트워크를 통하여 주행 제어 모듈과 조향 제어 모듈로 전송한다. 주행 제어 모듈과 조향 제어 모듈에서는 주행 제어기

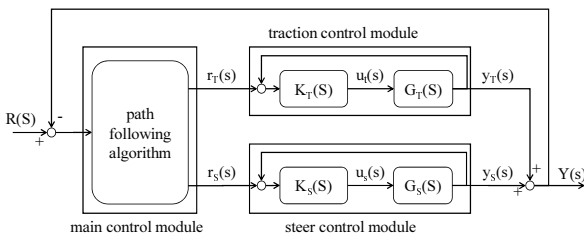


그림 5. 지게차의 주행 제어를 위한 블록선도.
Fig. 5. Block diagram for simple driving control.

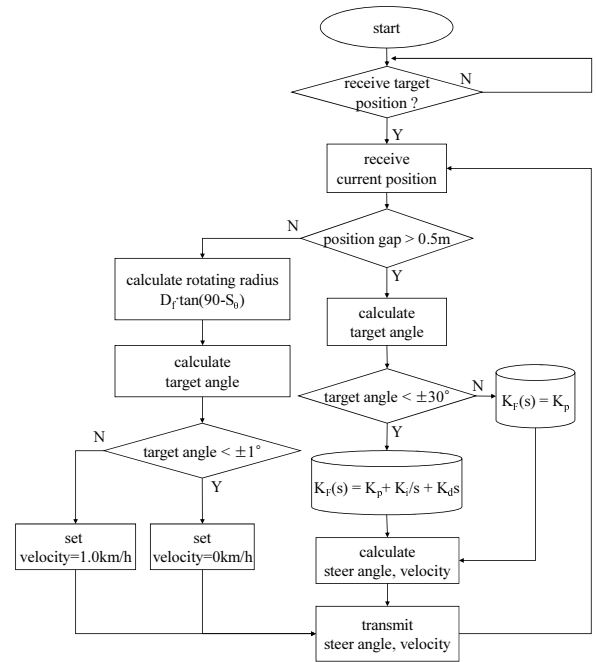


그림 6. 메인 제어모듈의 제어 알고리즘 흐름도.
Fig. 6. Flowchart of simple control algorithm for main control module.

($K_r(S)$)와 조향 제어기($K_s(S)$)가 각각 수신된 주행 속도와 조향 각도를 이용하여 10msec 주기로 주행 모터($G_f(S)$)와 조향 모터($G_s(S)$)를 제어하게 된다. 주행 모터와 조향 모터에 의한 동작 결과($y_f(S)$ 와 $y_s(S)$)는 지게차의 기구 메커니즘에 반영되어 지게차의 현재 위치와 방향($Y(S)=\{x, y, \theta\}$)이 결정되며, 주행 속도와 조향 각도의 피드백 제어를 위하여 주 제어 모듈로 전송된다.

그림 6은 주 제어 모듈에서 사용된 간단한 경로 추종 제어 알고리즘을 나타내고 있다. 이는 무인 자율 주행 지게차의 자율 주행 성능을 평가하기 위하여 만들어진 매우 간단한 제어 알고리즘이다.

그림에서 무인 자율 주행 지게차는 무선으로 연결된 외부 작업 할당기로부터 목표 위치를 수신하면 현재 지게차 위치와의 비교를 통해 직선 거리를 계산하고 주행 속도 제어와 조향 각도 제어를 시작하게 된다. 먼저 직선 거리가 50cm를 초과하면 목표 위치와 현재 위치를 비교하여 전역 좌표상의 상대 각도를 연산한다. 이때, 연산된 상대 각도가 $\pm 30^\circ$ 를 초과하면, 빠른 연산을 위해 식 (1)과 같은 P 제어기를 이용하여 주행 속도와 조향 각도를 조절한다. 반대로 연산된 상대 각도가 $\pm 30^\circ$ 이하이면 정상 상태 오차를 줄이기 위해 식 (2)와 같은 PID 제어기를 이용하여 주행 속도와 조향 각도를 조절한다. 실험에서 사용된 P 제어기와 PID 제어기는 시행착오를 거쳐 다음과 같이 설정하였다.

$$G_{T-p}(s) = K_p = 0.55$$

$$G_{S-p}(s) = K_p = 1.00$$

$$G_{T-PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{4s^2 + 0.035s + 0.0005}{s}$$

$$G_{S-PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{12.5s^2 + 1.075s + 0.025}{s}$$

다음으로 직선 거리가 50cm 이하이면, 현재 위치를 기준으로 목표 지점에서의 지게차 방향을 고려한 회전 중심축을 고려하여 조향 각도를 계산한다. 이 때, 상대 각도가 $\pm 1^\circ$ 를 초과하면 차속을 1.0Km/h로 설정하며 $\pm 1^\circ$ 이내라면 정지한다.

그림 7은 무인 자율 주행 지게차의 초기 위치를 (534,211)로 설정한 상태에서 외부 작업 할당기를 이용하여 순차적으로 4개의 경유점(way point)을 주었을 때, 지게차의 위치 추종 결과를 나타낸 것이다. 실험에서 직선 거리가 50cm 이상일 때 최대 주행 속도를 2.5Km/h(0.7m/s)로 제한하였고 평균 주행 속도는 1.4Km/h (0.39m/s)로 설정하였다. 그림에서 보듯이 무인 자율 주행 지게차는 경유점을 적절히 잘 따라가는 것을 알 수 있다. 특히, 목적지에 도착한 시점의 최대 위치 오차는

약 6.5cm로서 매우 정밀한 동작을 한다는 것을 알 수 있다.

그림 8(a)와 8(b)는 원형의 경로와 사각형의 경로를 이용한 경로 추종 실험 결과를 나타낸 것이다. 여러 개의 경유점을 이용한 실험과 마찬가지로 최대 주행 속도를 2.5Km/h로 제한하였다. 그림 8(a)에서 원형 경로는 반지름을 2m로 설정하여 총 주행 거리를 12.56m로 설정하였다. 이러한 경로를 주행하는 데 걸린 시간은 56.2초였으며, 평균 주행 속도는 0.8Km/h, 주행 중 최대 위치 오차는 약 8cm로 나타났다. 그림 8(b)에서 사각형 경로는 한 변의 길이를 4m로 설정하여 총 주행거리를 16m로 설정하였다. 사각형 경로를 주행하는 데 걸린 시간은 41.2초였으며 평균 주행 속도는 약 1.4Km/h, 주행 중 최대 위치 오차는 약 16cm로 나타났다. 사각형의 경로는 원형 경로와 비교하여 상대 각도가 대체적으로 일정하여 각도를 조절하는 구간이 적기 때문에 평균 주행 속도가 높은 것을 알 수 있다. 반면에 급격히 상대 각도가 커지는 모서리 부분에서는 원형 경로에 비해 위치 오차가 좀 더 크게 나타남을 알 수 있다.

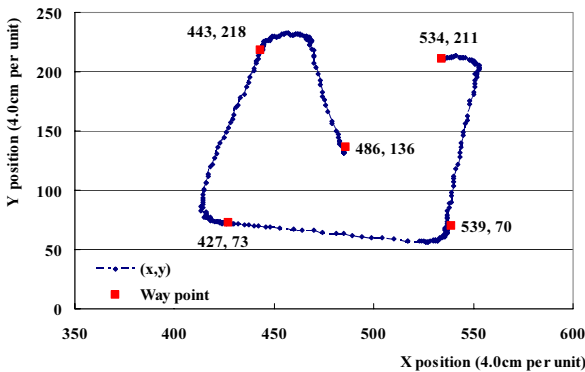


그림 7. 다양한 경유지점을 이용한 위치 추종결과.
Fig. 7. Path following using various way point.

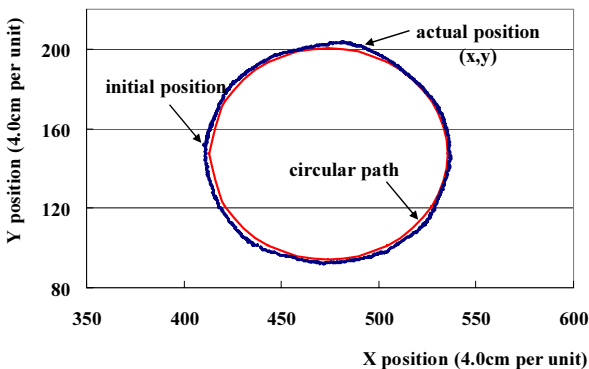
V. 요약 및 결론

본 논문에서는 무인 자율 주행 지게차에서 요소 기술 통합의 복잡성과 배선의 증가 문제를 해결하기 위한 방법으로서 네트워크 기반 분산 제어 시스템을 이용한 무인 자율 주행 지게차에 대하여 제안하였다. 이를 위하여 무인 자율 주행 지게차에 요구되는 개별 요소 기술에 대해 설명하였으며 기능별로 구분하여 네트워크 기반 분산 제어 시스템을 구성하였다. 마지막으로 무인 자율 주행 지게차의 성능을 평가하기 위하여 각종 요소 기술들이 구현된 실험 모델을 제작하고 경로 추종 실험을 수행하였다. 이러한 과정을 통하여 얻어낸 결론은 다음과 같다.

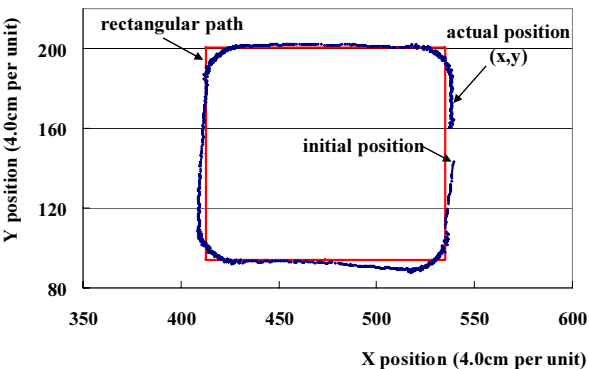
1) 제안된 분산 제어 시스템 구조에서는 무인 자율 주행 지게차에서 요구되는 각 기능들이 모듈화되어 독립적으로 동작되고 각 모듈들은 네트워크를 통하여 전송되는 각종 정보를 이용하여 해당 기능을 동작시키게 된다. 특히, 분산 제어 시스템에서는 네트워크를 통하여 각종 정보들이 공유되기 때문에 새로운 기능을 가지는 모듈을 손쉽게 추가할 수 있으며 특정 모듈의 기능을 개선할 때 해당 모듈에 탑재된 프로그램만 수정함으로써 다른 모듈에 영향을 미치지 않고 기능을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 특징들은 전체 시스템의 유연성을 증가시켜주고, 시스템 복잡도를 줄여 준다.

2) 특히 센서나 액츄에이터, 제어기 등을 손쉽게 확장할 수 있으며 요소 기술들을 여러 개의 마이크로컨트롤러로 분산 시킴으로서 메인 프로세스의 연산량을 줄여줄 수 있다. 또한, 각 모듈들은 네트워크를 통하여 획득된 정보들을 이용하여 알고리즘을 구현할 수 있기 때문에 보다 더 지능적인 자율 주행 기능을 만들 수 있다는 장점이 있을 것이다.

그러나 본 논문에서는 제안된 네트워크 기반 분산 제어 시스템의 가능성을 확인하기 위하여 간단한 경로 추종 알고리즘을 이용하여 무인 자율 주행 지게차의 주행 성능만을 평가하였다. 따라서 장애물 회피나 팔레트 인식, 물품의 하역과 적재 등과 같은 기술이 융합된 무인 자율 주행 지게차의 제작이 필요하다. 특히 본 논문에서는 제안된 작업 공간과 안



(a) Circular path



(b) Rectangular path

그림 8. 원형 경로와 사각형 경로에 대한 경로 추종결과.
Fig. 8. Path following using circular and rectangular path.

정성 등으로 인하여 최대 주행 속도가 제한되었다. 따라서 작업장의 크기를 보다 더 크게 하고 안정성을 향상시켜 최대 주행 속도를 권장 사항의 70% 이상까지 증대시키기 위한 연구가 필요하다. 마지막으로 무인 자율 주행 지게차의 원활한 주행을 위하여 보다 더 효과적인 경로 추종 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] M. P. Groover, *Automation, Production, Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 3rd Ed., Prentice Hall, 2007.
- [2] D. Lecking, O. Wulf, and B. Wagner, "Variable pallet pick-up for automatic guided vehicles in industrial environments," *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation 2006*, pp. 1169-1174, Sep. 2006.
- [3] T. A. Tamba, B. H. Hong, and K. S. Hong, "A path following control of an unmanned autonomous forklift," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 113-122, Feb. 2009.
- [4] L. Schulze and A. Wullner, "The approach of automated guided vehicle systems," *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, 2006(SOLI'06)*, pp. 22-527, June 2006.
- [5] 박영수, 박지훈, 이제원, 김상우, "비전 기반의 무인이송 차량 정차 시스템," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제 15권 제5호, pp. 473-479, 2009.
- [6] B. Touchton, T. Galluzzo, D. Kent, and C. Crane, "Perception and planning architecture for autonomous ground vehicles," *Computer*, vol. 39, no. 12, pp. 40-47, Dec. 2006.
- [7] 문희창, 우훈제, 김정하, "무인자율주행차량의 시스템 아키텍처 및 통신 프로토콜 설계," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제14권 제9호, pp. 873-880, 2008.
- [8] T. Berglund, A. Brodnik, H. Jonsson, M. Staffanson, and I. Soderkvist, "Planning smooth and obstacle-avoiding B-spline paths for autonomous mining vehicles," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 167-172, Jan. 2010.
- [9] S. K. Gehrig and F. J. Stein, "Collision avoidance for vehicle-following systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 233-244, June 2007.
- [10] S. Rezaei and R. Sengupta, "Kalman filter-based integration of DGPS and vehicle sensors for localization," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 6, pp. 1080-1088, Nov. 2007.
- [11] 김순태, 송봉섭, 홍석교, "무인 ATV의 종 방향 제어를 위한 CAN기반 분산형 시스템의 고장감지 및 진단," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제14권 제10호, pp. 983-990, 2008.

- [12] 하경남, 이원석, 이석, 이경창, "지능형 자동차의 분산형 시스템을 위한 FlexRay 네트워크 시스템의 구현," 제어·자동차·시스템학회 논문지, 제13권 제10호, pp. 933-939, 2007.
- [13] J. Yu, P. Lou, and X. Wu, "A dual-core real-time embedded system for vision-based automated guided vehicle," *International Conference on Control, Automation and Systems Engineering 2009*, pp. 207-211, July 2009.
- [14] CLARK Material Handling Asia, *CRX 10-25 User manual*, 2006.



송영훈

2008년 부경대학교 전기제어공학부 졸업. 2008년~현재 부산대학교 대학원 기계공학부 석박사통합과정 재학 중. 관심분야는 산업용 유무선 네트워크, 홈 네트워크, 네트워크 기반 스마트 센서, 무인 이송장치.



박지훈

2004년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2004년~현재 부산대학교 대학원 지능기계공학과 석박사통합과정 재학 중. 관심분야는 네트워크 기반 분산시스템, CAN, FlexRay기반 차량용 네트워크, Embedded 제어 시스템.



이경창

1996년 부산대학교 생산기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2003년 동 대학원 박사. 1998년~2003년 기계공학 연구정보센터 전임연구원. 2003년~2005년 울산대학교 네트워크기반 자동화 연구센터 전임연구원. 2005년~현재 부경대학교 전기제어공학부 부교수. 관심분야는 산업용 네트워크, 차량용 네트워크, 홈 네트워크, 센서 네트워크.



이석

1984년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1985년 펜실바니아 주립대학교 석사. 1990년 동 대학원 박사. 1990년~1993년 신시내티 대학교 기계공학과 조교수. 1993년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 산업용 네트워크, 차량용 네트워크, 홈 네트워크, 센서 네트워크.