

무인자동화를 위한 컨테이너크레인의 제어구조

김형진*(부산대 대학원 지능기계공학과), 홍경태(부산대 대학원 지능기계공학과),
홍금식(부산대 기계공학부)

Control Architecture for Automated Container Cranes

H. J. Kim(Graduate School of Mechanical & Intelligent Systems Eng. Dept., PNU),
K. T. Hong(Graduate School of Mechanical & Intelligent Systems Eng. Dept., PNU),
K. S. Hong(Mechanical Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

Demands for higher productivity in container terminal environments continues to escalate consideration of equipment upgrades. And then transportation of containers using the automated container crane becomes more and more important for productivity enhancements. Introducing a hybrid control architecture to the container crane, it provides a effective means to the automated operation of the container crane. This paper addresses the methodology for automation of container cranes. In addition, this paper proposes a new control architecture for the automated container crane and explains each component of that architecture. The control architecture is composed of a deliberative control layer, a sequencing layer, and a reactive control layer. The proposed architecture is applied to a dual-hoist double-trolley container crane.

Key Words : Container Crane (컨테이너크레인), Control Architecture (제어구조), Automated Container Terminal (자동화 컨테이너 항만), intelligent robot (지능형 로봇)

1. 서론

국제시장의 개방화와 세계 무역량의 증가에 따라 컨테이너선박과 항만의 대형화가 가속화되고 있으며, 초대형 선박이 접안되는 항만에서는 많은 컨테이너들을 단시간에 처리할 수 있는 능력을 가진 자동화된 컨테이너터미널 (automated container terminal : ACT)의 필요성이 대두되고 있다.¹⁰ 그리고, 자동화터미널에 대한 연구가 대형 선박의 재항시간을 기존의 포스트-파나막스 선박과 동일하게 하기 위해서 충분한 하역능력을 갖춘 새로운 하역시스템의 개발에 초점을 맞추어 진행되고 있다. 그리고 컨테이너터미널에 있어서 컨테이너크레인의 작업속도는 선박의 회항시간에 가장 결정적인 역할을 하고 있으며, 나아가 터미널 전체 처리능력의 상한선을 제한하는 요소가 되므로 컨테이너크레인의 생산성 향상에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다.

1958 년에 Matson Navigation Company 와 Paceco 사에 의해 세계최초로 컨테이너크레인이 개발된 이후로 지속적으로 발전하여, 2001 년에는 갑판상에 18 열을 적재하는 8,000 TEU(twenty-foot equivalent unit)급 선박과 22 열을 적재하는 12,000 TEU 급 선박에 대응하는 초대형 컨테이너크레인에 대한 연구가 진행되기에 이르렀다.³ 하지만, 현재 터미널에 설치된 컨테이너크레인의 평균 하역속도는 30 move/hr 인데 반해, 앞으로 출현하게 되는 초대형 컨테이너선 (25 열 규모의 15,000 TEU 급)에 대응하기 위해서는 적어도 100 move/hr 로 작업할 수 있어야 한다. 이를 위해서, 고속주행과 정밀제어, 효율적인 작업수행을 가능하게 하는 컨테이너크레인의 자동화에 대한 연구가 필요하며, 자동화된 컨테이너크레인이 자율적으로 하역작업을 할 수 있는 지능형 자율하역 크레인의 제어구조를 확립할 필요가 있다.

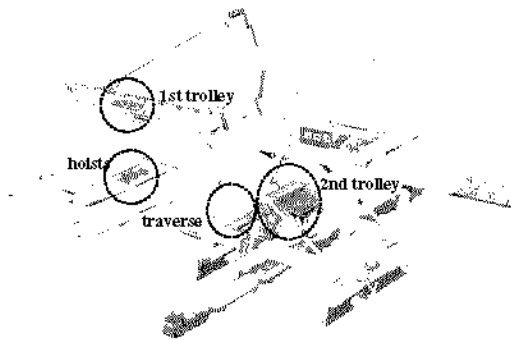


Fig. 1 dual-hoist double-trolley container crane (ECT)

Table 1 Modeling of one cycle time of container crane¹²

구분	항목	비고	
사이클 모델링	이동 시간	1. 육측 호이스트 이동시간 (empty)	
		2. 육측 트롤리 이동시간 (empty)	
		3. 트래버스 이동시간 (empty)	D/H
		4. 해측 호이스트(안벽측) 이동시간 (empty)	D/H
		5. 해측 트롤리(안벽→선박) 이동시간 (empty)	D/H
		6. 해측 호이스트(선박측) 이동시간 (empty)	
		7. 컨테이너 capture/release 시간	
		8. 해측 호이스트(선박측) 이동시간 (loaded)	
		9. 해측 트롤리(선박→안벽) 이동시간 (loaded)	D/H
		10. 해측 호이스트(안벽측) 이동시간 (loaded)	D/H
		11. 트래버스 이동시간 (loaded)	D/H
		12. 육측 트롤리 이동시간 (loaded)	
		13. 육측 호이스트 이동시간 (loaded)	
		14. 컨테이너 release(capture) 시간	
	갠트리 이동거리	15. 갠트리 이동시간	
	헤치커버 이동횟수	16. 헤치커버 처리시간	
	기타	17. utilization 시간	

무인자동화를 위한 지능형 자율하역 크레인인 매우 다양하고 복잡한 기능이 요구된다. 주어진 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 인간의 두뇌에 해당되는 인공지능시스템, 고기능 센서를 이용한 감각기능, 효율적인 작업을 위한 자율하역기능 등이 필요하기 때문이다. 이와 같이 복합적인 특성을 만족시키기 위해서는 다양한 구성 요소들을 체계적으로 결합하여 정리할 필요가 있다.^{8,9} 복잡한 시스템을 통합하여 제어하기 위한 틀이 바로 제어구조이다.

지능형 자율하역 크레인을 구현할 때, 제어구조

의 핵심은 현재 수행되는 작업과 이어져서 다음 단계에 수행되어야 할 가장 적절한 행동을 결정하고 실행하는 것이다. 이를 하기 위해선 환경에 대한 불완전한 지식, 예측 불가능한 환경의 변화, 불완전한 센서, 불완전한 구동기, 시간제한에 대한 해결책을 제시해야 한다. 이에 대한 전통적인 두 가지 접근방식이 **deliberative control** 과 **reactive control** 이다. **Deliberative control** 은 계획된 작업을 수행하는 능력은 뛰어나지만 각 단계가 시간의 흐름에 따라 진행되므로 반응속도가 느리고 불확실한 환경에 잘 적응하지 못하는 단점은 있다. 반면, **reactive control** 은 각 작업이 그에 따른 센서와 연결되어 있어서 급변하는 외부환경에서도 즉각적인 반응하지만 자칫 본연의 임무를 수행하지 못하고 교착상태(**deadlock**)에 빠질 단점이 있다. 이에 따라 두 접근방식을 상호 보완하여 복잡하고 가변적인 환경 속에서도 주어진 임무를 수행하기 위해 하이브리드 제어구조(**hybrid deliberative/reactive control architecture**)가 제안되어 로봇분야에서 응용되고 있다.^{1,6-7}

본 논문에서는 컨테이너크레인에 대한 자동화의 필요성을 부각시키고, 지능형 자율하역 크레인으로서 무인자동화를 가능하게 하고 작업성능을 향상시킬 수 있는 제어구조를 확립한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 본 논문에서 제안할 제어구조의 적용대상인 듀얼-호이스트 더블-트롤리 컨테이너크레인(**dual-hoist double-trolley container crane**)의 동작방식을 설명하고 자동화 필요성에 대해 논한다. 3 절에서는 제어구조의 도입 배경과 설계 시 고려사항, 하드웨어 구성에 대해 기술한다. 4 절에서는 자율하역 크레인의 제어구조를 제안하고 각 부분에 대해 설명한다. 마지막으로 5 절에서 결론이 기술된다.

2. 컨테이너크레인의 자동화 필요성

Fig. 1 은 1980 년대에 처음 개발되어 Rotterdam 항의 ECT(**european container terminal**)에 설치되어 있는 듀얼-호이스트 더블-트롤리 컨테이너크레인이다. 싱글 트롤리 컨테이너크레인의 해측작업은 접안 선박에서 작업자가 스프레더(**spreader**)와 컨테이너를 콘(**corn**)으로 고정시켜주면 호이스트의 로프를 감는 것으로 이루어진다. 스프레더가 일정 높이까지 도달하면 트롤리가 트레일러 혹은 **AGV(automatic guided vehicle)**의 바로 위까지 이동시킨다. 그런다음 육측 작업은 호이스트의 로프를 풀고 작업자가 스프레더에서 콘을 해체하면 트레일러에 내려놓는 것으로 마친다. 듀얼-호이스트 더블-트롤리 컨테이너 크레인의 경우, 해측 작업은 싱글 트롤리형의 경우와 동일하지만 육측 작업 시에 컨테이너를 트레일

러에 바로 내리지 않고 일단 트래버스(traverse)에 내려놓는다. 트래버스가 트레일러 가까이 이송하면 다시 육측 트롤리에 의해 하역작업을 한다. 그래서 해측 트롤리는 상하운동에 의한 작업만 진행할 수 있다.

싱글 트롤리 컨테이너크레인의 경우, 컨테이너선이 대형화되고 지상측과의 거리가 길어짐과 동시에 선창(船倉)의 깊이가 깊어지면서 한 사이클 동안 작업속도가 길어지고 대기시간이 길어지는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 듀얼-호이스트 더블-트롤리 컨테이너크레인은 트롤리(트롤리-스프레더)의 작업을 해측과 육측으로 분업화하여 사이클 타임을 감소시키고, 트래버스를 이용하여 대기시간을 감소시킴으로서 생산성을 향상시켰다. 또한 기존 크레인에 비해 로프의 길이가 짧아져서 수평이송 후 정지할 때 스프레더가 받는 횡력 및 바람에 의한 흔들림이 감소되었고 컨테이너를 더 빠르고 정확하게 이송할 수 있게 되었다. Table 1 은 한 사이클 동안의 작업시간을 산출하기 위한 것이다. 듀얼 호이스트형의 경우, 싱글 트롤리형과 비교하였을 때, 컨테이너 적재와 하역의 순서는 동일하나 호이스트가 2 개이기 때문에 싱글 트롤리형보다 약 1.8 ~ 2.0 배의 사이클타임 단축이 가능하다. 그리고 더블 트롤리형의 크레인은 육측 트롤리가 거의 수직운동만을 행하고 수평운동은 트래버스가 전적으로 담당하기 때문에 자동화에 상당히 유리한 면을 가지고 있어서 생산성 향상의 효과가 크다.¹² 현재 육측 트롤리 부분이 자동화 된 크레인이 Hamburg 항의 HFLA 터미널에서 사용되고 있다. 그러나 사이클타임을 두 배 단축되었다고 해서 하역 능력이 두 배 향상되진 못한다. 그 이유는 해측 작업은 여전히 수작업에 의해 이루어지고 있으며 이에 따른 시간지연이 두 배로 증가하기 때문이다. 또 더블 트롤리 크레인은 싱글 트롤리형에 비해 너무 무겁고 비싼데다가 2 명의 운전자가 필요하기 때문에 비경제적이고,⁴ 선박에서의 작업자가 증가해서 사고의 위험가능성도 그만큼 커지게 된다. 따라서, 해측 작업의 자동화는 더블 트롤리 크레인의 문제점을 보완하여 컨테이너터미널의 생산성 향상을 위해 필수적이다.

해측 트롤리 부분이 자동화 되지 못하고 있는 이유는 바람의 세기와 방향, 파도에 의한 배의 흔들림 등을 고려하여 제어하거나 사람을 대체하여 실시간으로 장애물을 회피할 수 없기 때문이다. 그리고 크레인의 무인자동화를 위한 기술로 대 중량물의 고속이송을 위한 위치 및 속도제어기술, 흔들림제어시스템 (anti-sway system), 자동위치확인시스템 (APIS : automatic positioning information system), 자동하역시스템 (automatic landing system), 적재윤곽스캐닝시스템 (SPSS : stack profile scanning system), 하

중제어시스템 (load control system) 등이 연구 중에 있고 부분적으로 사용되고 있기는 하지만 여러 가지 자동화기술을 효율적으로 통합하여, 관리할 수가 있는 기술의 부재로 인해 해측 트롤리의 자동화는 이루어지지 않고 있다.

3. 제어구조 도입 배경

컨테이너크레인이 더 빨라져야 하고, 더 커지면서 더 효율적이어야 한다는데는 이견이 없다. 그러나 특별한 센서를 장착하고, 여러가지 자동화 장치의 증가만으로는 컨테이너크레인의 무인자동화를 이루지 못할 뿐만 아니라, 시스템의 효율성과 안정성을 보장하지 못한다.

3.1 제어구조 설계 시 고려사항

지능형 로봇시스템을 구현하는데 있어 잘 정의된 제어구조가 그 성능을 좌우하듯이, 컨테이너크레인의 자동화를 위해서도 제어구조가 필수적이다. 임수수행에 필요한 기능을 얻기 위해서는 수많은 하드웨어와 소프트웨어 모듈을 필요로 하는데, 이들을 통일성있게 운영하는 것이 제어구조이기 때문이다.^{2,5}

- 제어구조가 잘 설계되기 위해서는 적용될 시스템의 각 모듈별 특성이 정확히 고려되어야 할 뿐 아니라, 아래와 같은 조건들이 충족되어야 한다.
- 다양한 종류의 하드웨어와 소프트웨어의 통합이 가능해야 한다.
- 새로운 기능을 추가하거나 유지, 보수하는데 편리해야 한다.
- 불안정한 환경변화에 능동적으로 대처해야 한다.
- 부분적인 고장이나 오작동에 민감하게 동작해서는 안된다.

4. 결론

3.2 제어구조 도입

컨테이너크레인의 자동화를 위한 제어구조는 각 계층에 따라 아래와 같은 역할을 담당해야 한다.

- Deliberative control layer : 접안선박의 컨테이너 선적 상태와 현재 작업중인 위치를 파악하고 (localization, map building), 적/하역 작업 계획을 세운 다음 컨테이너의 이동체적을 생성한다 (path planning).

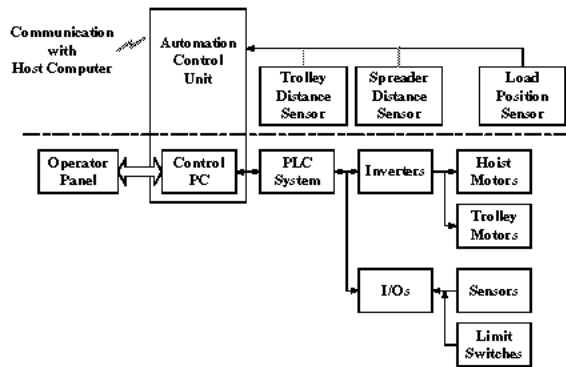


Fig. 2 Hardware configuration of a container crane

- Sequencing layer : 트롤리, 호이스트, 그리고 트래버스의 위치정보와 각 부분의 작업스케줄에 따라 제어신호를 생성한다 (task scheduling). 또한 작업 중에 발생하는 오류나 오작동을 인식하여 수정하고 (error recovery), 주동제실에 보고하여 신속히 후속처리가 가능하게 한다.
- Reactive control layer : 트롤리, 호이스트, 그리고 트래버스가 실시간으로 장애물을 회피하면서 (obstacle avoidance) 적/하역 작업을 수행한다.

3.3 제어구조 도입을 위한 하드웨어 구성

Fig. 2 는 컨테이너크레인의 하드웨어 구성을 나타낸다. 컨테이너크레인이 컨테이너를 취급하기 위한 모든 동작은 트롤리 하부에 위치한 Operator Panel 의 운용자에 의해 제어된다. 제어신호가 Control PC 로부터 PLC (programmable logic control) System 으로 전달되어 Inverter 를 통해 모터를 구동하고 입/출력 단자를 통해 각종 센서와 스위치의 정보를 얻는다. 이러한 시스템에서 자동화장비를 증설하고 이를 효율적으로 관리하기 위해서, Control PC 를 Automation Control Unit 으로 대체하여 하드웨어 장비와 이와 관련된 소프트웨어를 보완할 수 있다. 또한 본 논문에서 제안할 제어구조의 구현을 가능하게 해준다.

4. 자율하역 크레인의 제어구조

4.1. 전체 구성

Fig. 3 은 컨테이너크레인의 자동화를 위해 제안된 자율하역 크레인의 hybrid deliberative/reactive control architecture 이다. 이 구조는 deliberative layer, sequencing layer, reactive layer 의 3 개의 계층으로 이루어져 있다.

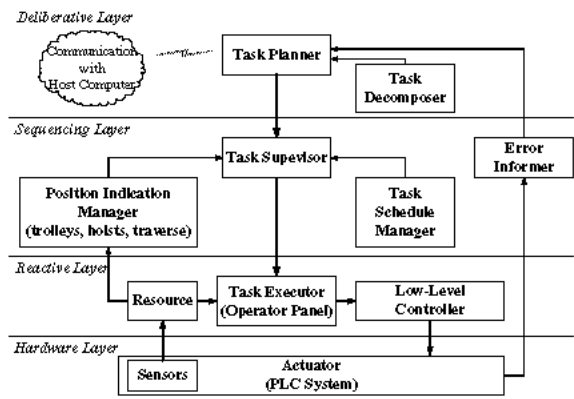


Fig. 3 The hardware configuration of a container crane

4.2. Deliberative Layer

Deliberative layer 는 최상위 계층으로서, 중앙통제실로부터 주어지는 추상적인 작업데이터를 컨테이너크레인이 작업할 수 있도록 구체화하는 역할을 한다. 또한, Host Computer 와의 통신을 통해 작업을 지시받고, 현재 작업상태 및 이상유무를 보고한다. 터미널 운영자는 Host Computer 를 통해 한 척의 접안 선적에서 적/하역 작업을 하는 여러 대의 컨테이너크레인을 동시에 관리 및 모니터링할 수 있다.

Deliberative layer 는 Task Planner 와 Task Decomposer 로 구성된다. Task Planner 는 Host Computer 로 부터 접안된 선박의 정보와 3 차원 행렬 형태의 컨테이너 선적정보를 받는다. 이를 기반으로 제 1 트롤리와 제 2 트롤리, 두 개의 호이스트와 트래버스의 작업순서를 결정하고 이동궤적을 생성한다. 생성된 이동궤적은 안전거리가 보장된 범위에서 최단거리이어야하고 주행속도가 최적화되기 위한 속도선도가 제공되어야 하며, 각 부분이 연계되어 작업될 때 시간지연을 최소화 할수 있어야 한다. Task Decomposer 는 한 사이클 동안 수행할 컨테이너크레인의 작업을 각 부분의 세분화된 작업명령으로 분해하여 Task Planner 로 보낸다. Task Planner 는 하나의 작업명령은 순차적으로, 독립된 각 부분의 다른 작업명령들은 비동기적으로 sequencing layer 에 하달한다(push). 또한 하부 계층인 reactive layer 에서의 진행사항을 감시하여 각종 장치의 고장이나 갑작스런 오작동에 대비하기도 하고, 작업계획을 재 생성하기도 한다.

4.3. Sequencing Layer

Sequencing layer 는 deliberative layer 와 reactive layer 의 중간자로서의 역할을 담당하기 위해 Task Supervisor 와 Error Informer 로 나뉜다. Task Supervisor 는 Position Indication Manager 와 Task Schedule Manager 의 정보를 받는다(pull).

Task Supervisor 는 Task Planner 에서 생성된 데이

터를 기반으로 실제 컨테이너크레인의 각 부분을 작동시키기 위해서 각 트롤리와 호이스트들의 절대 위치, 호이스트와 컨테이너와의 거리, 고정장애물의 위치 등의 정보를 받아 제어신호를 생성하는 모듈이다. 이를 위해서 Position Indication Manager 는 센서에 의해 입력받은 데이터를 가공하여 Task Supervisor 가 필요로 하는 정보를 제공하고, Task Schedule Manager 는 각 부분의 작업 순서 및 이동 경로를 수치적인 데이터로 환산하고 Task Supervisor 가 정해진 순간, 정해진 제어신호를 생성할 수 있도록 관리해 준다. 생성된 제어신호는 reactive layer 에 위치한 Task Executor 에 제공된다.

Error Informer 에서는 hardware layer 의 센서나 모터의 이상유무를 감지하여 고장 위치와 종류, 심각한 정도를 Task Planner 에 보고한다. Task Planner 는 Host Computer 에 이를 알려주고, 오류를 고려하여 새로운 작업계획과 이동계획을 생성하거나 작업을 정지시킨다.

4.4. Reactive Layer

Reactive layer 는 4 개의 병렬구조로 되어 있다. 이는 제 1 트롤리와 제 2 트롤리, 제 1 호이스트, 제 2 호이스트, 그리고 트래버스가 각각 정해진 사이클에 따라 구동되기 때문이다. 또한 Task Executor 는 Resource 에서 제공하는 정보와 Task Supervisor 에서 하달하는 제어신호 중에 하나를 선택하거나, 서로 통합하여 컨테이너크레인의 작업을 완성한다. 또한 reactive layer 는 그 자체만으로도 hardware layer 와 한 사이클을 이루어 장애물회피와 같은 구동이 가능하다.

Task Executor 는 실제 운전자의 역할을 대신 하는 부분으로서 위치변수와 속도변수를 Low-Level Controller 로 보낸다. Low-Level Controller 에서는 실제로 컨테이너크레인이 작동할 수 있도록 속도와 위치를 제어한다. 흔들림제어시스템 (anti-sway system) 같은 제어기들이 여기에서 동작을 한다.

4.5. Hardware Layer

Hardware layer 는 제어구조에 포함된 부분이 아니라, hardware system 과 제어구조가 실제로 어떻게 연결되어 컨테이너크레인이 구동되는지를 알 수 있도록 보여주는 부분이다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 컨테이너크레인의 무인자동화를 위한 한 방법으로서 hybrid deliberative/reactive control architecture 를 제안하였다. 그리고, 제안된 제어구조를 듀얼 호이스트 더블 트롤리 컨테이너크레인에

적용하였다.

제안된 제어구조는 세 개의 계층으로 설계되어 있어서 전역적인 계획에 의한 작업실행이 가능하고, 갑작스런 환경변화에도 능동적으로 대체할 수 있다. 또한, Error Informer 의 사용으로 작업 중 오작동을 미연에 방지할 뿐만 아니라 작업계획의 재생성이 즉각적으로 이루어지므로, 오류수정에 필요한 시간을 절감할 수 있다.

제안된 제어구조는 하드웨어 측면에서 보면, 현재 사용 중인 크레인에 Automation Control Unit 만 추가해서 구현가능하도록 설계되었다. 이를 통해 개조비용의 부담을 줄일 수 있다. 소프트웨어 측면에서 보면, 각 구성요소가 완전히 독립된 역할을 수행할 수 있도록 설계되어 유지, 보수하는데 편리한 이점이 있다.

추후 과제로서, 본 논문에서 제안된 제어구조는 프로토타입의 컨테이너크레인에 적용하여 효율성 및 안정성을 검토할 수 있는 실험이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(과제번호: M1-0302-00-0039-03-J00-00-023-10)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Arkin, R. C., Behavior-Based Robotics, The MIT Press, 1998.
2. Gat, E., "On Three-Layer Architectures," In: Artificial Intelligence and Mobile Robots: Case Studies of Successful Robot Systems, Kortenkamp, D., Bonasso, R., and Murphy, R., (Editors), MIT Press, pp. 195-210, 1998.
3. Jordan, M. A., "Future-Proof Your Crane," Terminal Operation Conference Americas, 2001.
4. Jordan, M. A., "Quay Crane Productivity," Terminal Operation Conference Americas, 2002.
5. Kim, G. H., Chung, W. J., Kim, M. S., and Lee, C. W., "Control Architecture Design and Integration of the Autonomous Service Robot PSR," Proceedings of the International Conference on Control, Automation, and Systems, pp. 2379-2384, 2002.
6. Kim, G. H., Chung, W. J., Kim, M. S., and Lee, C. W., "Tripodal Schematic Design of the Control Architecture for the Service Robot PSR", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2792-2797, 2003.
7. Lindstrom, M., Oreback, A., and Christensen, H. I.,

- “BERRA: A Research Architecture for Service Robots,” Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 3278-3283, 2000.
8. 김광일, 최경현, 김병국, 이석희, “실버메이트 로봇을 위한 행위기반의 하이브리드 제어구조 연구,” 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1251-1254, 2004.
 9. 남화성, 송재복, “재사용 가능한 모듈로 구성된 이동로봇의 하이브리드 제어구조 설계,” 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 223-227, 2004
 10. 박경택, “항만물류 시스템 지능화 기술,” 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 2 호, pp. 41-48, 2002.
 11. 양창호, 김영훈, 최상희, 배종욱, 이정은, “A Study on the System Design and Operations of Automated Container Terminal,” 한국해양수산개발원, 2000
 12. 양창호, 최종희, 최상희, 최용석, 김우선, 하태영, 이주호, “첨단항만 무인장비제어 및 통합운영 핵심기술 개발 : 항만시뮬레이션 및 자동화 컨테이너터미널 설계기술 개발,” 한국해양수산개발원, 2003.