

고층 빌딩 커튼월 시공 작업에서의 로봇 활용에 관한 연구

이승열[†] · 고봉수[†] · 이계영^{*} · 이상현^{*} · 옥영무^{**} · 한창수^{***}

Application of the Robot for Curtain Wall Installation in a High Building

Soungyel Lee, Bongsoo Ko, Kyeyoung Lee, Sangheon Lee, Youngmu Ohk and Changsoo Han

Key Words : Curtain Wall(커튼월), Installation(설치), Excavator(굴삭기), Modularization(모듈화), Multipurpose Construction Robot(다목적 건설용 로봇), Master-Slave Teleoperator System(마스터 슬레이브 원격조정 시스템)

Abstract

Recently, higher and bigger building is trend of the construction. Accordingly the building material is getting bigger and construction equipments are developed. But operation is still depends on human resource. Therefore there have several problems that are safety, laborious operation, and shortage of worker. In the various construction sites, the automation in construction is introduced to solve these problems. This paper proposed the automation system in construction that installs curtain wall in a high building. The system is expected effects that are reduction of a construction period, retrenchment of the cost and assurance of safety.

1. 서 론

최근 건축물의 형태를 살펴보면 기존의 건축물에 비해 점점 고층화, 고급화의 추세로 변하고 있으며 건축자재 역시 중량화, 대형화 되고 있다. 이러한 자재를 다룰 수 있는 장비 또한 개발되었으나 여전히 많은 부분이 인력에 의존되고 있다. 인력에 의존된 시공법의 문제점은 작업자가 위험한 작업환경에 노출되므로 안전사고가 우려된다.⁽¹⁾ 또한, 임금상승에 따른 시공원가의 증대와 인력 부족에 의한 시공기간의 지연을 가져오게 된다. 그리고, 작업자의 숙련도에 따라 비균일한 품질의 시공결과를 얻게된다. 이러한 시공상의 문제점을 해결하기 위해 건설 자동화 도입은 필수적이다. 또한, 인류의 생활영역이 극한지, 우주 및 해저로

확대됨에 따라 열악한 환경에서도 작업이 가능한 건설장비 개발이 필요하다.⁽²⁾

현재까지의 건설 로봇은 기초공사용 로봇, 청소 작업 및 제설공사용 로봇, 건축용 로봇 등 다양한 건설 분야에서 생산성 향상 및 안전성 확보를 위해 개발되었다.⁽²⁾ 하지만 대부분의 건설 로봇은 옥외작업을 목적으로 개발되므로 옥내용 건설 로봇에 대한 개발은 상대적으로 미비하다. 건축물의 형태가 점차 고층화로 변함에 따라 최근 건물 외벽에 부착되는 건축자재로 커튼월의 사용이 증가하였다. 기존의 커튼월 설치작업은 권양기(Winch)나 모노레일(Monorail)을 이용하지만 자재의 부양할 뿐 조립과정은 인력에 의존된 옥외 시공법이다. 이 시공법은 다수의 작업자가 필요하고 시공방법 및 절차가 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

일반적으로 건설 현장에서 로봇을 활용하기 위해 건설 현장 특성에 적합한 로봇 시스템 개발이 필요하다. 그러나 옥내용 건설 로봇의 활용 및 개발에 있어서 다음과 같은 문제점이 있다.

- 1) 옥내용 건설 로봇의 경우 슬라브(slab) 위에서 작업을 하므로 슬라브의 허용하중을 고려하여 자중이 제한되어야 한다.
- 2) 구조물이 설치된 옥내에서 로봇운동에 필요한

[†] 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과
E-mail:supra_pf@hotmail.com
TEL: (031)400-4062 FAX: (032)406-6242

^{*} 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

^{**} 삼성물산(주) 건설부문 건축사업본부

^{***} 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

작업공간이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 고층 빌딩 커튼월 시공작업에 로봇 활용을 위한 개념설계를 하였다. 이 설계를 바탕으로한 건설 로봇의 적용으로 필요한 작업자 수를 감소시킬 수 있다. 또한, 시공기간 단축 및 시공 원가를 절감시키고 특히, 건설현장에서 가장 우선시되는 추락과 같은 안전사고를 예방할 수 있다.

2. 기존의 커튼월 시공법

Fig. 1 은 최근 진행된 고층 빌딩 신축 현장에서 커튼월 시공모습을 나타낸다. 이 시공법의 특징은 옥외용 장비가 아닌 옥내용 장비를 사용했다는 점이다. 하지만, 기존의 시공법과 같이 장비의 역할은 자재를 부양시킬 뿐 시공은 인력에 의해 이루어졌다.

작업에 필요한 장비는 다음과 같다. 커튼월을 인양하고 원하는 위치까지 이동시키기 위한 소형

굴삭기(Mini Excavator), 커튼월을 굴삭기에 고정하기 위한 흡착 장치(Suction device) 그리고, 작업도중 커튼월 추락에 대비하기 위한 안전장치로서 권양기가 사용되었다.

시공과정은 Fig. 1 에서 나타낸 작업순서에 따라 진행된다.

- (a) 바닥에 놓여진 커튼월을 굴삭기 끝부분에 설치된 흡착 장치를 이용하여 고정시킨다.
- (b) 고정된 커튼월을 굴삭기의 붐(Boom)과 암(Arm)의 자유도를 통해 지면과 수직방향으로 들어올린다.
- (c) 커튼월이 인양된 상태에서 굴삭기를 커튼월 조립위치로 이동시키고, 수동조작을 통해 주변의 커튼월과 정렬시킨다.
- (d) 굴삭기를 커튼월에서 분리시킨뒤 인력으로 주변의 커튼월과 결합시킨다.

3. 로봇적용을 위한 개념설계

현재 건설 산업의 세가지 문제점은 안전 문제, 난공사, 인력 부족이다.⁽³⁾ 이러한 문제의 공통점은 작업에 많은 부분을 인력에 의존된다는 점이다. 그러므로, 크고 작은 안전사고가 발생할 수 있고 시공방법 및 절차가 복잡하다. 또한, 전문 기술인력 부족 등의 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 커튼월 시공 로봇이 현재 개발중에 있다. 로봇 개발을 위해 기존의 커튼월 시공작업을 분석하였으며 사용빈도를 고려한 로봇의 자유도 선정하였고 안전성을 고려한 시스템을 설계하였다.

커튼월 설치작업에 필요한 로봇 운동은 크게 두 가지로 분류된다. 비교적 정밀도는 떨어지나 신속하게 조립 위치까지 커튼월을 이동시키는 운동과 정밀 작업이 가능한 매니플레이터를 이용하여 정확히 커튼월을 원하는 위치에 설치시키기 위한 운동이다. 전자의 운동을 위해 매크로 모션 매니플레이터(Macro-Motion Manipulator) 그리고, 후자의 운동을 위해 마이크로 모션 매니플레이터(Micro-Motion Manipulator)가 개발될 예정이다. 여기서, 매크로 모션 매니플레이터는 기존의 커튼월 시공에 사용된 소형 굴삭기로 선정하였다.

3.1 자유도의 선정

로봇 설계에 앞서 Fig. 1 에서 제시된 기존의 시공법을 바탕으로 자유도를 살펴보았다. 작업자의 편리를 도모하기 위해 6 자유도 모두를 완벽하게 구현되는 설계가 이상적이다. 하지만, 자유도 수와

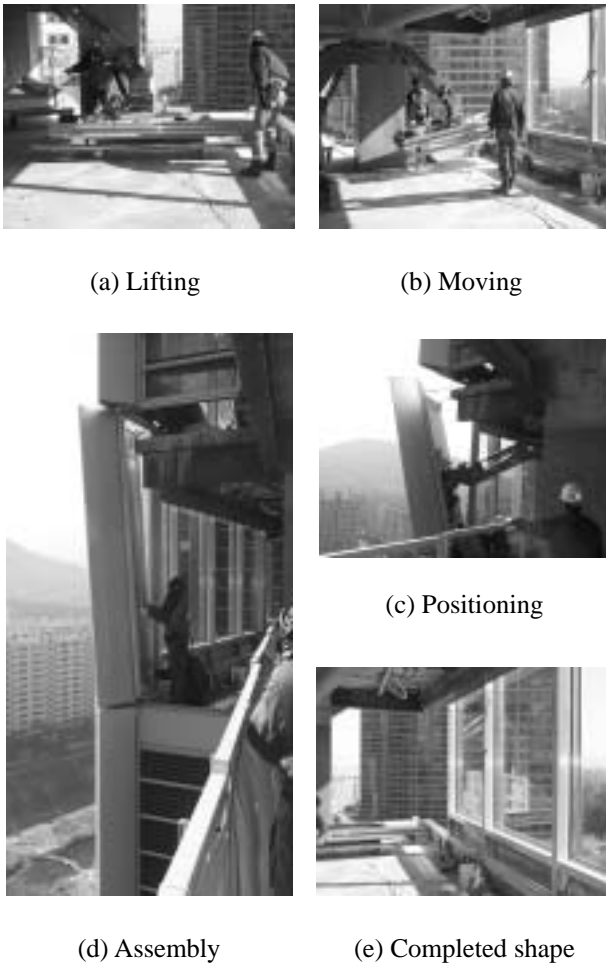


Fig. 1 The procedure of curtain wall installaton

굴삭기의 말단부에 설치될 마이크로 모션 매니플레이터의 중량은 서로 비례한다. 따라서, 굴삭기의 허용 인양하중을 고려하여 최소한의 중량으로 최대 자유도 구현이 필요하다.

기존의 시공 작업자로부터 주로 사용되는 자유도를 분류하였다. 분류된 자유도는 Fig. 2 에서 커튼월의 도심을 원점으로 가정할 때 T_x (X 축 방향의 병진운동) 와 R_y, R_z (Y 축과 Z 축 방향의 회전운동)이다. 로봇에 의해 위의 자유도가 구현되기 위해 Fig. 2 의 마이크로 모션 매니플레이터(Three-link RPR manipulator⁽⁴⁾)를 제시하였고 차후 타 건설 작업도 가능할 수 있도록 모듈화(Modularization)하였다.

커튼월에서 가장 가까운 모듈은 커튼월 도심을 통과하는 Y 축 중심 회전(R_y)을 구현한다. 그 뒤에 연결될 모듈은 커튼월의 X 축 방향 이동(T_x)을 구현하며, 맨뒤에 연결된 모듈은 커튼월의 Z 축 중심 회전(R_z)을 구현한다. 나머지 자유도 중에서 커튼월 평면이 바닥과 수직을 이루게 하는 R_x (X 축 방향의 회전운동)는 굴삭기의 자유도를 통해 구현된다. 또한, 충돌에 의한 커튼월의 파손방지 및 Y 축과 Z 축 방향의 미세한 병진운동(T_y 와 T_z)을 구현하기 위해 매니플레이터 말단부에 컴플라이언스 장치(Compliance device)가 설치될 예정이다.

3.2 시스템 사양 설계

로봇의 매니플레이터는 관절로 연결되어 연쇄(Chain)를 구성하는 링크(Link)의 조합이다.⁽⁵⁾ 굴삭기 역시 일종의 다관절 링크를 가진 매니플레이터이므로 링크간의 동특성을 고려한 허용 인양하중을 가지고 있다. 앞서 3.1 절에서 언급한 매니플레이터의 중량이 허용 인양하중을 초과하여 발생하는 굴삭기 전복에 대해서는 설계시 주의가 요구된다.⁽⁶⁾ 새롭게 개발될 매니플레이터는 굴삭기의 버킷부분이 제거된 굴삭기 말단부에 설치된다. 따라서, 굴삭기의 허용 인양하중은 개발될 매니플레이터의 중량과 커튼월의 중량의 합과 같다.

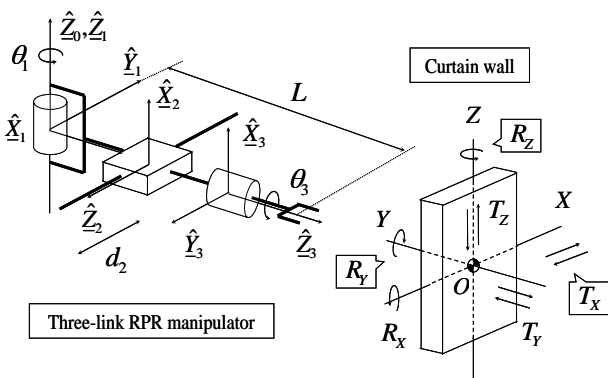


Fig. 2 Schematic diagram of micro-motion manipulator

Fig. 3 과 같이 흙과 암을 지면과 수평하게 펼친상태에서 굴삭기 인양 실험을 통해 마이크로 모션 매니플레이터의 중량을 고려하였다. 실험결과, 카운터웨이트(Counter-weight)를 장착한 굴삭기의 허용하중은 약 500[kg]이다. 따라서, 커튼월의 중량(300[kg])을 제외한 약 200[kg]이 새롭게 개발될 매니플레이터의 중량으로 고려하였다.

커튼월이 지면과 수직으로 세워졌을 때 지면과 평행한 마이크로 모션 매니플레이터는 하나의 구조물로 간주하여 일종의 외팔보로 생각할 수 있다. 따라서, Fig. 2 의 매니플레이터의 길이 L 에 비례하여 굴삭기 말단부에 발생하는 굽힘 모멘트 역시 굴삭기의 전복에 큰 영향을 준다. Fig. 3 의 모멘트 실험을 통해 매니플레이터의 최대길이 L 을 0.5[m]로 제한하였다.

일반적으로 매니플레이터의 링크가 가속될 때 액츄에이터는 관성을 극복하기 위한 충분한 토크가 주어져야 한다.⁽⁷⁾ 특히, 커튼월의 회전중심이 커튼월의 도심과 일치되지 않는 경우 발생하는 관성 모멘트와 이동시 발생하는 진동 또한, 굴삭기



Fig. 3 Overturning test of a excavator

Table. 1 Design spec. of micro-motion manipulator

Design spec.	Data
Total weight, [kg]	200
Weight of each module, [kg]	50
Weight of suction device, [kg]	50
Total length, [m]	0.50
Translating velocity, [m/s]	0.05
Rotating velocity, [rad/s]	0.209 (2 [rpm])

의 전복에 영향을 미친다. 그리고, 속도를 증가시키기 위해 보다 큰 용량을 가진 액추에이터를 선정하는 경우 앞서 언급한 매니플레이터의 제한된 중량을 초과하게 된다. 뿐만 아니라, 매니플레이터가 너무 빠른 회전, 이동속도를 가지는 경우 작업자의 오작동시 안전상의 문제가 발생된다. 이와 같은 요소를 고려하여 작업에 적합한 회전 속도는 0.209[rad/s] (2[rpm]), 이동 속도는 0.05[m/s]로 결정하였다. 커튼월 시공에 활용될 건설 로봇의 RPR 매니플레이터는 Table. 1 과 같은 설계인자를 바탕으로 현재 개발중이다.

3.3 모듈에 요구되는 힘과 토크

Fig. 4 는 RPR 매니플레이터의 각 모듈에서 요구되는 힘과 토크 값을 나타낸다. 계산시 가정된 조건은 다음과 같다.

- 1) 커튼월을 흡착 장치를 통해 로봇에 고정시킬 때 흡착지점은 커튼월의 도심으로부터 최대 0.2[m] 편심된 범위내 존재한다.
- 2) 기계적 마찰력은 무시된다.

Y 축 방향의 회전운동인 팬운동은 건축 구조물을 피해 로봇이 이동하거나 커튼월을 조립할때 필요하다. 모듈에 필요한 토크는 커튼월과 매니플

Table. 2 spec. of curtain wall

spec.	Data
Weight of curtain wall, [kg]	300
Width of curtain wall, [m]	1.8
Height of curtain wall, [m]	3
Thickness of curtain wall, [m]	0.2

레이터의 관성 모멘트와 Table. 1 의 속도로 회전시키기 위해 필요한 가속도의 곱으로 약 196.4[Nm]가 요구된다.

X 축 방향의 병진운동은 커튼월을 조립위치에 두거나 조립시 바로 옆 커튼월과 밀착시킬때 사용된다. 모듈에 필요한 힘 F_2 는 팬과 병진운동의 모듈이 제외된 매니플레이터의 질량과 Table. 1 의 속도로 이동시키기 위해 필요한 가속도의 곱으로 약 20.0[N]이 요구된다.

Z 축 방향의 회전운동은 세가지 모듈의 운동중에서 가장 큰 운동범위를 가진다. 팬운동의 모듈과 함께 건축 구조물을 피할때와 커튼월을 조립 위치에 둘때 필요하다. 전체 토크(τ_3)은 0.2[m] 편심된 지점을 중심으로 회전될때 발생하는 회전 모멘트를 지지하기 위한 토크(τ_2)와 Table.1 의 회전속도로 운동하기 위해 필요한 토크(τ_1)의 합으로 이루어진다. 다음과 같은 식으로 요구되는 전체 토크 τ_3 를 얻을 수 있으며, 약 729.3[Nm]이 요구된다.

$$\tau_3 = \tau_1 + \tau_2 = mgl + I_A \alpha \quad (1)$$

$$I_A = I + l^2 m = \left[\frac{1}{12} m(a^2 + b^2) \right] + (l^2 m), \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

지금까지 구한 각 모듈에서 요구되는 힘과 토크를 근거로 안전율을 고려하여 필요한 액추에이

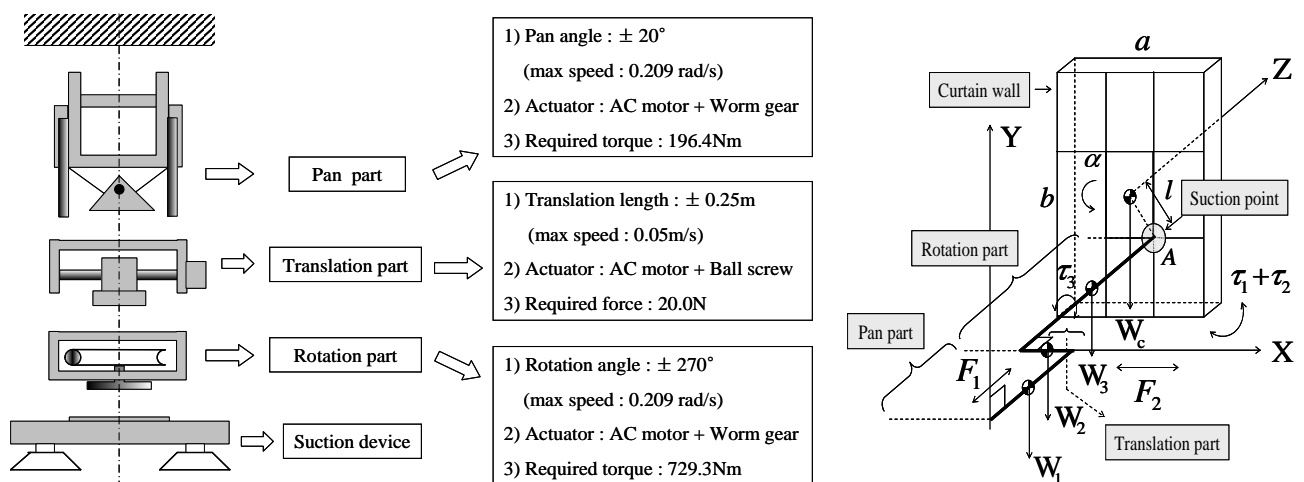


Fig. 4 Schematic diagram of micro-motion manipulator

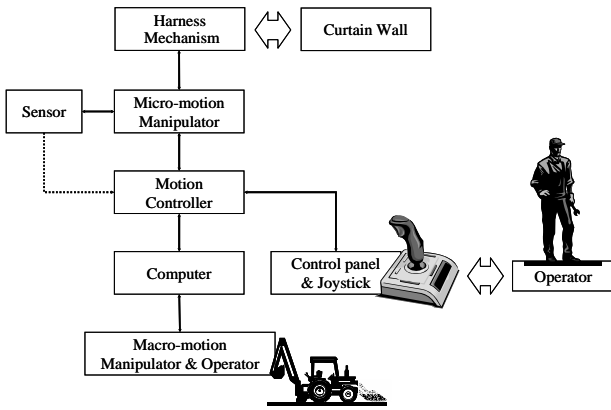


Fig. 5 System configuration of the curtain wall installation system

터를 선정해야 한다. 특히, Y 축과 Z 축 회전에 관련된 모듈은 자중과 액츄에이터의 용량을 고려하여 감속기가 설치될 예정이다.

4. 결론

커튼월 시공로봇의 전체 시스템은 Fig. 4,5 와 같이 크게 3 가지로 구성될 예정이다. 조동운동을 위한 매크로 모션 매니플레이터, 미동운동을 위한 마이크로 모션 매니플레이터 그리고, 마이크로 모션 매니플레이터 제어 장치로 이루어진다.

건설 자동화는 현재 건설 산업의 난제인 안전 문제, 난공사, 인력부족의 해결이 기대된다.⁽⁸⁾ 로봇을 활용한 건설 자동화 도입을 위해 본 연구 내용은 다음과 같다.

기존의 커튼월 시공법 분석을 통한,

- 1) 사용빈도를 고려한 로봇의 자유도 선정
- 2) 안전성이 고려된 시스템 사양 설계
- 3) 차후 타 건설작업 분야에 활용할 수 있도록 모듈화(Modularization)된 매니플레이터 설계

또한, 앞서 언급된 기존의 시공법과 비교하여 본 연구를 통해 개발될 로봇의 기대 효과는 다음과 같다.

- 1) 시공기간 단축 및 시공원가를 절감시킨다.
- 2) 기존의 시공법에 비해 균질의 시공 품질을 얻을 수 있다.
- 3) 공사현장에서 가장 중요한 안전 사고를 감소시킬 수 있다.
- 4) 모듈화된 장비로 작업전향과 수리가 용이하다.
- 5) 로봇의 말단부(End-effector)에 훅(Hook), 리프팅 마그네트(Lifting magnet) 등으로 호환이 가능하여 광범위한 건설현장에 다목적 건설용 로봇(Multipurpose construction robot)으로 활용이 예상된다.

5. 향후 계획

커튼월 시공을 위한 로봇 개발 중에서 현재 마이크로 모션 매니플레이터 설계를 마치고 프로토타입(Proto-type) 제작중이다. 건설용 로봇은 생산용 로봇에 비해 충격이나 온도변화, 습도 등의 환경적 악영향으로부터 보호받지 못한다.⁽⁹⁾ 따라서, 제작된 메커니즘의 안정성 및 내구성 실험이 필요하다. 그 외 앞으로 개발될 분야는

- 1) 모션 컨트롤러 및 6 자유도 토오크 센서를 이용한 마이크로 모션 매니플레이터의 제어
- 2) 무선 송/수신 컨트롤 패널을 설치하여 마스터 슬레이브 원격 조정 시스템⁽¹⁰⁾ 구현
- 3) 작업도중 전복, 추락 및 커튼월 파손으로부터 안전성을 보장하기 위해 경보 장치 및 자동체결 장치

등이 개발되며, 향후 개발 분야 및 개발상에 야기되는 문제점에 대해서는 계속하여 개선 및 보완될 예정이다.

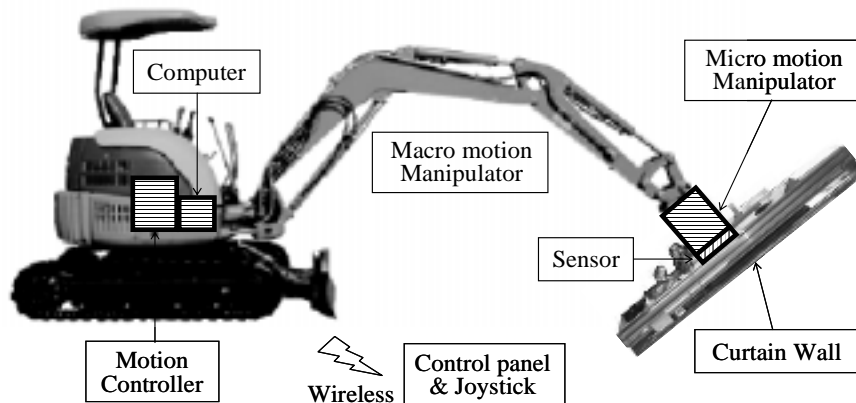


Fig. 6 Expectation model of the curtain wall installation

참고문헌

- (1) Hyungjoon Sim, Changsoo Han, 2000, "The Development of An Robot Hand for The Automation of Steel Column Construction", IFAC Symposium on Robot Control – Syroco, pp. 723~728
- (2) YoePoong Song, 1999, "An Engineer of Construction Machinery", Guminsa. pp. 27~141
- (3) An editorial department, 1997, "Operation Know-How of Construction Robot for the Person in Charge", Tamgumunhwasa. pp. 17~179
- (4) Mark W. Spong, M. Vidyasagar, 1989, "Robot Dynamics and Control" , John Wiley & Sons. pp.1~29
- (5) John J. Craig, 1989, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", 2nd edition, Addison-Wesley. pp 1~16
- (6) O.J.Kim, W.S.Yoo, K.H.Yoon and H.G.Kang, 1996, "Evaluation of Joint Reaction Forces for a Hydraulic Excavator Subjected to a Critical Load", KSME, Vol.20, No.4, pp 1154~1163
- (7) Phillip John Mckerrow, 1991, "Introduction to Robotics", Addison-Wesley. pp. 348~398
- (8) Roozbeh Kangari,1991, "Advanced Robotics in Civil Engineering and Construction", IEEE 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conf, vol.1, pp. 375 -378
- (9) Eugeniusz Budny, Mirosaw Chosta and Witold Gutkowski, 2003, "Load-independent Control of a Hydraulic Excavator", Automation in Construction, Volume 12, Issue 3, May 2003, pp 245-254
- (10) Grigore C. Burdea, 1996, "Force and Touch Feedback for Virtual Reality" , John Wiley & Sons. pp. 1~12