

자율주행 형 계단 승하강용 로봇 시스템 설계

Design of Autonomous Stair Robot System

홍영호, 김동환, 임충혁

(Young Ho Hong, Dong Hwan Kim and Chung Hyuk Yim)

Abstract : An autonomous stair robot recognizing the stair, and climbing up and down the stair by utilizing a robot vision, photo sensors, and appropriate climbing algorithm, is introduced. Four arms associated with four wheels make the robot climb up and down more safely and faster than a simple track typed robot. The robot can adjust wheel base according to the stair width, hence it can adopt to a variable width stair with different algorithms in climbing up and down. The command and image data acquired from the robot are transferred to the main computer through RF wireless modules, and the data are delivered to a remote computer via a network communication through a proper data compression, thus, the real time image monitoring is implemented effectively.

Keywords : stair robot, stair climbing algorithm, sensor fusion, RF communication, network, robot vision

I. 서론

계단로봇은 엘리베이터의 시설이 없는 건물에서 건물 위 아래의 이동을 가능하게 하기 위하여 필요하며, 평지 주행에서 적용하는 이동로봇(Mobile robot)의 기능을 가지고 복잡한 기구적 요소가 동반하여 우수한 기동성이 확보되어야 한다. 또한 계단을 오르내릴 시 추락하는 일이 없어야 하고 부드러운 운동성을 가져야 한다. 평지에서는 기존의 이동로봇과 같이 이동성(Mobility)을 보장해야 하며 장애물을 회피하여야 한다. 실제 우리 주위에는 무수히 많은 장애물이 존재하며 로봇에게 있어서 단 5cm에 불과한 조그만 턱도 커다란 벽이 될 수 있음은 간과할 수 없는 사실이다.

계단로봇의 이동방법은 바퀴(Wheel)에 의한 바퀴구동형 로봇[1-2]과 다리에 의한 보행형 로봇[3-5]으로 구분할 수 있다. 바퀴구동형 계단로봇은 무한궤도를 이동수단으로 선택하며, 이의 장점은 기존의 이동로봇과 마찬가지로 평지에서 방향전환능력 및 이동속도가 좋다는데 있다. 계단 승하강 시 군사용 전차(Tank)와 같이 계단의 모서리를 타고 오르내리기 때문에 기구적 구조가 비교적 단순하고 계단에서의 이동속도 또한 충분하다. 그러나 계단의 모서리만 바퀴에 닿는 선접촉이 이루어지기 때문에 마찰력이 부족하여 미끄러짐의 우려가 크고, 큰 토크를 낼 수 있는 액추에이터를 사용해야 하는 단점을 안고 있다. 또한 궤도형 바퀴가 적어도 계단의 3칸 이상 걸쳐있지 않으면 계단에서의 이동 자체가 어렵기 때문에 대 체로 크기가 커질 수 밖에 없다. 보행형 로봇은 사람이나 동물의 걸음걸이를 모사하여 이동하는 것으로 바퀴구동형에 비해 이동속도, 방향 전환 등 이동성 측면에서 효율이 다소 부족하다. 또한 보행을 위한 기구 구조

가 복잡하고 제어가 어려운 단점을 가진다. 그러나 계단 승하강시 바퀴구동형이 계단 모서리에 선접촉 하는데 반해 보행형 로봇은 계단 바닥에 면접촉하게 되어 미끄러짐의 우려가 적어 추락의 위험이 적은 장점이 있다. 이 밖에도 뱀 모양으로 제작된 로봇도 계단 승하강용으로 발표되었다[6-7].

본 논문에서 제안하는 계단로봇은 바퀴구동형의 장점과 보행형의 장점을 취한 새로운 형태의 기구구조를 갖는 로봇으로서 4개의 무한궤도 구동방법과 4개의 암(Arm)에 의한 자세변경을 가능하게 하여 이동성을 극대화하였다. 특히 건물 내의 계단을 주된 장애물로 간주하여 이를 극복할 수 있도록 하였으며 이때 높낮이가 서로 다른 계단에도 적용할 수 있도록 설계/제작되었다. 그리고 평지 주행시에는 장애물과 계단을 식별할 수 있도록 카메라 비전을 채용하였다. 계단을 인식하는 과정은 포토센서와 비전센서의 병합을 통해 이루어진다. 주행 중 장애물이 감지되면 먼저 비전센서를 통해 극복 가능한 장애물인지 분석한다. 두 번째로 포토센서를 통해 다시 한번 극복 가능 여부를 최종 판정한다. 부가적으로 계단로봇에 부착되어 있는 카메라의 영상을 인터넷으로 전송하여, 네트워크가 연결된 어느 곳에서나 로봇 주변의 상황을 모니터링 및 명령을 전달 할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 계단로봇의 기구적 구조와 특성을 서술하고 계단을 승하강하기 위한 알고리즘을 소개하며, 장애물과 계단을 인식하기 위한 로봇비전 방안을 기술한다. 또한 영상 및 명령 송수신을 무선 및 네트워크 상에서 구현하는 방안을 제시한다.

II. 계단로봇의 메카니즘 및 사양

계단을 오르기 위한 구조는 전술한 대로 크게 두 가지 타입으로 분류될 수 있다. 하나는 무한궤도형 로봇으로서 계단의 모서리를 타고 오르는 형태이고 다른 하나는 보행형 로봇으로 계단을 한 단씩 밟고 올라가는 형태이다.

전자는 적절한 방향전환, 충분한 이동속도, 장애물 회피가 비교적 용이하고 계단을 오르기 위한 동적 운동이 적어 계단을 오를 때 비교적 제어가 쉬운 장점이 있으나 무한궤도의 길이가 적어도 계단 모서리 3칸 이상 걸쳐야 하기 때문

논문접수 : 2002. 5. 3., 채택확정 : 2002. 12. 6.

홍영호 : 서울산업대학교 산업대학원 기계설계학과
(cool05@dreamwiz.com)

김동환 : 교신저자, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부
(dhkim@snut.ac.kr)

임충혁 : 서울산업대학교 기계설계자동화공학부
(chyim@snut.ac.kr)

* 본 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

에 기구의 크기가 커질 수밖에 없고, 바닥의 마찰면이 적어 큰 토크를 낼 수 있는 액츄에이터가 요구된다. 또한 승강하강 시 계단 모서리와 로봇이 조금이라도 어긋나면 미끄러져 떨어뜨버리는 위험이 따른다. 후자의 장점은 적어도 하나의 다리는 계단 바닥을 지지하고 있기 때문에 비교적 적은 토크의 액츄에이터가 가능하지만 전자에 비해 기구가 복잡해지고 많은 액츄에이터를 사용해야 한다. 또한 무게중심이 조금이라도 어긋나면 등반/하강이 곤란하고 이동성에 제한이 따른다.

본 논문에서 제안하는 계단로봇은 전자와 후자의 장점만을 취한 새로운 형태의 기구구조로서 4개의 무한궤도 구동방식을 기본으로 계단의 모서리를 타고 올라가면서 또한 한 단씩 밟고 올라간다. 궤도형의 장점인 방향전환, 이동속도, 장애물 회피능력이 충분하고 적어도 2개의 궤도는 계단 바닥을 지지하기 때문에 적은 토크의 액츄에이터와 작은 크기의 기구를 갖는다. 구조적으로 자신의 장애물 극복능력을 알 수 있도록 설계하였으며 등반/하강 시 스스로 계단 모서리와 수평을 유지함으로써 미끄러짐을 방지한다.

이 논문에서 적용한 액츄에이터는 7개의 DC 모터로 하였으며 어깨 부에 2개 모터, 바퀴 부에 4개의 모터 그리고 어깨축 가변 부에 1개의 모터를 채용하였다(Fig. 1). 제어기로 PIC16F874 가 채용되었다. 이미지 전송을 위하여 RF 무선 데이터 및 화상모듈을 사용하였다. 장애물 회피 및 계단 승하강을 위하여 7개의 포토센서를 장착하였고 암의 각도를 측정하기 위하여 2개의 포텐시옴터를 부착하였다.

본 계단 로봇에서의 방향전환은 별도의 조향장치를 설치하지 않고 좌우 궤도가 서로 다른 회전방향으로 회전 또는 좌우 궤도에 서로 다른 회전력을 부여함으로써 이루어진다. 포토센서 6조의 역할은 계단의 인식이다. 계단 승하강 시 실질적으로 오르고 내리는 것은 4개의 무한궤도형 구동바퀴이므로 센서의 위치는 바퀴에 있어야 한다. 따라서 계단 바닥 검출용 센서(앞 2조, 뒤 1조) 및 계단 벽면 검출용 센서(앞 2조, 뒤 1조)는 바퀴의 아래쪽에 위치하였다.

앞뒤 어깨축 부는 일종의 관절 역할을 하는 것으로 계단을 승하강하는 과정에서 가장 중요한 부분이다. 어깨축 관절을 회전하여 궤도형 바퀴를 적절히 승하강 함으로써 계단을 오르내리게 된다. 이때 부하 모멘트를 이기고 올라

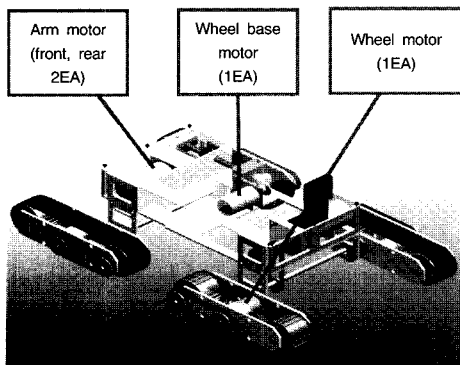


그림 1. 계단로봇의 3차원 도면.
Fig. 1. 3D Modeling of the stair robot.

가야 하기 때문에 모터에 요구되는 토크는 많이 요구되고 적절한 힘을 보장할 수 있는 모터를 선택하여야 한다.

축간 거리를 늘리고 좁히는 것은 보다 안정적으로 계단을 내려오기 위함이며 동시에 계단의 폭이나 높이가 다른 경우에도 잘 적응 할 수 있게 함이다. 특히 하강시에는 무게 중심의 안정성이 부족하여 쉽게 추락할 가능성이 높다. 이를 극복하기 위하여 축간 거리를 좁히는 구조를 채택하였다. 축간거리를 좁힘으로써 로봇의 무게 중심을 보다 안정한 쪽으로 이동시키게 된다. 여기서 사용된 기구는 선형가이드 (Linear guide)와 리드 스크루 (Lead screw) 이다.

본 로봇의 설계 시 고려할 사항은 주어진 계단을 오르내리기에 충분한 토크와 회전수를 구하기 위하여 정적 모델을 사용하여 필요한 토크와 회전수를 만족하는 모터를 선정하였다. 주행 모터의 선정은 간단하여 요구 수평이동속도를 40 m/min 내외로 하여 마찰계수를 0.3으로 가정하고, 바퀴의 직경을 0.06m 로 하였을 때 모터의 감속비는 75를 가지며 최대 회전수는 7500 rpm 이며 모터토크는 1.5 kgf·cm 인 모터로 선정하였다. 모터 선정은 일반적인 기계설계 사항이므로 상세한 내용은 생략한다.

III. 제어시스템

1. 제어시스템 개요

계단로봇 제어구조는 전체적으로 상위 제어기와 하위 제어기로 구분된다. 상위 제어기는 개인용 컴퓨터로 구성하며, 로봇에 부착되어 있는 CCD 카메라의 영상을 RF 이미지 모듈을 사용하여 상위 제어기로 전송 받아, 적절히 영상을 분석한 후, RF 데이터 모듈을 통해 하위 제어기인 마이크로 프로세서(PIC16F874)[8]에 그 결과를 알려준다. 하위 제어기는 실제로 계단로봇을 직접 제어하는 역할을 한다. 즉, 상위 제어기의 영상처리 결과 및 포토센서, 포텐시옴터, 리미트 스위치의 정보를 받아 주행모터, 어깨모터 등 액츄에이터를 적절히 제어함으로써 평지주행, 방향전환, 장애물 회피 등 일련의 동작이 가능하게 한다. Fig. 2는 계단로봇의 제어구조를 나타낸다.

상위 제어기와 하위 제어기간의 인터페이스(Interface)는 양방향 RF 모듈(Bim433, Radio matrix사)[9]을 통해 이루어지며 RS-232 프로토콜을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 통신 패킷(Packet)은 Table 1과 같다.

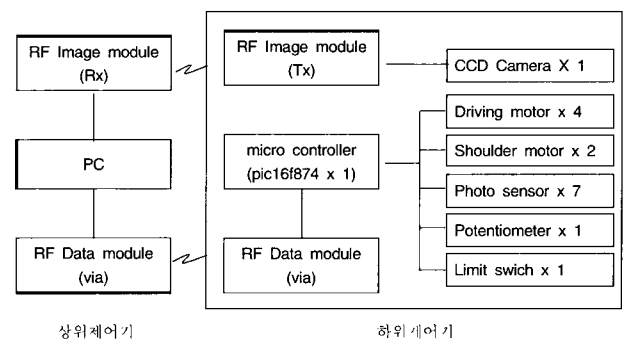


그림 2. 제어시스템 흐름도.
Fig. 2. Flow of the control system.

표 1. 통신 패킷.

Table 1. Communication packet.

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|
| P | P | P | F | F | S | D1 | D2 | C | E |
|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|

여기서, P = 프리앰블 (Preamble)을 나타내며 그 값으로 마크/스페이스 비율 [13]을 고려하여 0x55를 지정하였다. F는 초기 바이트 값으로 시리얼 포트에 들어오는 연속된 값 중에서 정확한 시작 비트를 찾기 위하여 0xff를 사용하였으며 S는 시작바이트로서 정해주는 어드레스이며 D1은 첫 번째 데이터, D2는 두 번째 데이터이다. 그리고 C는 체크섬 (Check sum)으로 데이터의 정확한 전송여부를 체크한다. 마지막으로 E는 종료바이트(End byte)로서 우리가 정해주는 어드레스 값이다. 이러한 통신 패킷은 무선 통신 데이터의 오류를 최소화하기 위하여 여러 겹으로 안정장치를 설치하여 정확한 데이터의 송수신을 가능하게 하였다.

2. 포토센서 설치 및 센서통합

로봇이 계단을 인식하고 이를 극복하기 위해서는 센서의 적절한 위치선택은 중요한 문제이다. 이를 위해 고려해야 할 기본 조건은 로봇의 각 부분 중에서 실제로 계단을 극복하는 것은 케도형 바퀴이고 감지 대상은 계단의 벽면과 바닥면이다. 따라서 센서의 위치는 케도형 바퀴에 설치해야 하며, 계단 바닥 감지용 센서는 바퀴의 바닥을 향하도록 위치하고 계단 벽면 감지용 센서는 바퀴의 전방을 향하도록 설치하였다.

이를 위해 사용된 센서는 온-오프(On-Off) 센서인 포토센서를 사용했으며 위치는 Fig. 3에 표시하였다. 각 센서의 역할은 다음과 같다. 센서 ①은 기능적으로 계단 승하강에 사용되기 보다는 계단을 포함한 모든 물체(Object)를 인식하기 위한 센서이다. 이 센서는 로봇이 계단을 오르기 전에 인식된 물체가 극복해야 할 계단인지 피해야 할 물체인지를 구분하기 위해서 사용된다. 이 과정은 비전센서와 통합하여 화상에 계단 모서리의 최소구간이 나타날 수 있도록 일정거리를 확보할 수 있는 장거리 검출용 센서를 사용하였다. 센서 ②와 ③은 계단 극복 과정에서 다양한 목적을 충족하게 하는 센서이다. 즉 계단에 진입할 경우, 로봇이 계단을 오르기 위해서는 계단과 정면으로 마주서게 하기 위한 센서이다. 다음으로 계단을 오를 경우, 계단의 벽면을 감지하여 오르기 위한 시간(Lifting-up time)을 인식하고 동시에 계단의 높이를 판단하기 위해 사용된다. 계단을 내려올 경우, 계단의 바닥을 감지하여 케도형 바퀴가 계단 바닥에 안착하기 위한 순간을 인식하여 바닥면과 면접촉하는 자세를 취하기 위해 사용된다. 센서 ⑥은 앞바퀴에 부착된 센서 ②, ③과 비슷한 역할을 한다. 센서 ⑥을 사용하게 되는 시점은 이미 앞바퀴가 계단을 오른 상태이기 때문에 계단과 정면으로 마주하기 위한 자세는 이미 갖추어진 상태이다. 따라서 하나의 센서로서 앞바퀴의 역할과 같은 정보를 제공한다. 센서 ④는 계단을 안전하게 승하강 하기위해 계단로봇은 각 경우에 따라 몸체의 길이(축간거리)를 늘이거나 줄인다. 센서 ④는 이동 중 허공을 인식하면(신호로는 Off되면) 내려가기 위한 순간임을 인식하고 몸체의 길이를 줄이는 명령을

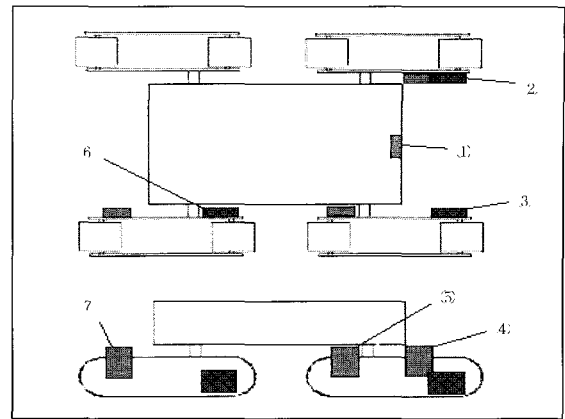


그림 3. 포토센서 부착위치.

Fig. 3. Location of photo sensors.

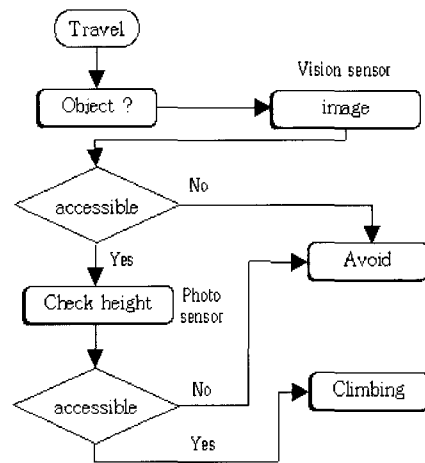


그림 4 자율 주행 계단로봇의 제어로직.

Fig. 4 Control logic of autonomous stair robot.

내리는데 활용된다. 센서 ⑤와 ⑦은 계단을 내려가기 위한 순간을 인식하기 위한 센서이다. 한 단의 계단을 내려가는 과정은 계단 모서리를 기준으로 케도형 바퀴가 회전하고, 일정거리를 전진한 후 계단 바닥면에 안착하는 일이 순차적으로 이루어진다. 이때 모서리를 기준으로 회전하는 시점을 센서 ⑤와 ⑦을 통해서 알 수 있다.

계단로봇은 센서와 비전에 의해 그 주행 및 계단 승하강이 제어된다. 즉 두 가지 센서인 포토센서와 비전센서의 통합을 통하여 물체의 인식 및 그 물체의 실체를 판단하여 로봇 이동시 이동방향을 제시하게 한다. 이때 포토센서는 하위제어기, 비전센서는 상위 제어기를 통해 각각 장애물 극복 가능 여부를 판단하게 된다. 극복 가능한 물체는 계단 턱이나 계단의 주된 특징인 모서리가 존재하는 장애물로 제한한다. 그 외에는 피해 가도록 제어한다. 아래 그림은 센서와 비전에 의한 로봇 주행 방식에 의한 전체적인 제어구조를 Fig. 4에 나타낸다.

주행 중 포토센서에 의해 물체를 인식하면 비전센서를 통하여 물체의 영상을 분석한다. 이때 계단로봇의 장애물 극복능력을 고려하여 화상스캔 구간은 영상의 바닥부터 계

단로봇의 장애물 극복가능 높이를 한정한다. 영상분석의 주된 목적은 물체의 모서리 선 (Line)을 검출/분석하는 것이며, 이는 자체 설계한 모서리 선 인식 알고리즘을 통해 이루어진다. 이를 통해 계단로봇의 장애물 극복능력 구간 내에서 선이 검출되고 모서리 선이라 판단할 정도의 계단폭과 높이를 가지면 돌파 가능 장애물로 인식하고, 아니면 회피하게 된다. 다음으로 비전센서를 통해 돌파 가능 장애물로 인식되면 두 번째로 포토센서를 이용하여 장애물의 높이를 다시 한번 파악한다. 우리 주변에는 너무나도 많은 선(Line)이 존재하기 때문에 비전센서 하나만으로는 정확한 인식이 어려울 수 있다. 따라서 주변 상황에 능동적으로 대처하기 위하여 두 가지 센서를 통합하여 보다 정확한 판단을 하는 것이 효과적이다.

3. 영상인식

상위제어기는 개인용 컴퓨터로서 제어를 위한 프로그램은 Visual C++ 6.0으로 작성하였으며 주요 기능은 하위제어기와 인터페이스를 위한 직렬통신, 카메라 영상 모니터링, 장애물의 극복여부 판단을 위한 영상인식 및 영상분석, 인터넷 원격제어를 위한 영상압축, 네트워크 통신(Socket communication) 등이다. 영상인식 (영상 전처리)의 대상은 계단 혹은 턱의 주요 특징인 모서리 선(Line)이다. 이는 색이 아닌 모양에 해당하는 것으로 적절한 전처리는 두 가지를 생각할 수 있다. 첫째는 윤곽선 검출(Edge detection)로서 영상신호를 1차 혹은 2차 미분하여 밝기 변화에 의한 임펄스(Impulse)를 윤곽선으로 나타내는 개념으로 보통 빠른 연산을 위하여 3x3, 5x5등의 크기를 갖는 마스크(Mask)를 사용한다[10]. 둘째는 이진화(Binary)로서 영상을 검정색(0)과 흰색(255) 두 개의 값으로 표현하는 것이다. 실험을 통해 선의 검출과 관련하여 두 가지 방법 모두 만족할 만한 결과를 얻었지만, 실제 제어에서는 보다 프로그램이 간단하고 계산시간이 짧은 이진화 기법을 적용하였다. 특히 보다 정확한 데이터 획득방법으로 블록 이진화 기법을 적용하였다. 즉 계단 로봇으로부터의 영상은 로봇(Camera) 자체가 여기저기 옮겨다니는 영상으로서 일정조도를 가진 영상을 얻을 수 없기 때문에 일반적인 이진화 기법만으로는 곤란하다. 하나의 임계값을 정해놓지 않고 영상처리과정에서 동적으로 임계값을 정하는 블록이진화 기법을 적용하여 조명에 보다 둔감한 전처리 작업을 하였다.

블록이진화 기법은 영상을 적당한 크기의 블록으로 분할하고 그 블록마다의 명암 값을 고려하여 임계값을 설정하는 방법으로 각 블록마다 특정한 임계값을 갖게 된다. 실제 계단을 대상으로 하여 단순 이진화 (단일 임계값)한 결과와 블록이진화한 결과를 Fig. 5에 보여주고 있으며 블록이진화가 보다 선명함을 가짐을 알 수 있다.

다음으로 영상분석 과정에 대해 기술한다. 영상 전처리 과정을 통해 얻어진 영상은 각 화소에 대해 '0 또는 255로 이진화' 된다. '0' 과 '255'를 '0' 과 '1'로 치환하여 파일로 출력하여(Fig. 6) 이를 분석하면 모서리 선은 다음과 같은 특징이 있음을 알 수 있다. 여기서 영상의 크기는 320x240 픽셀로 하였다.

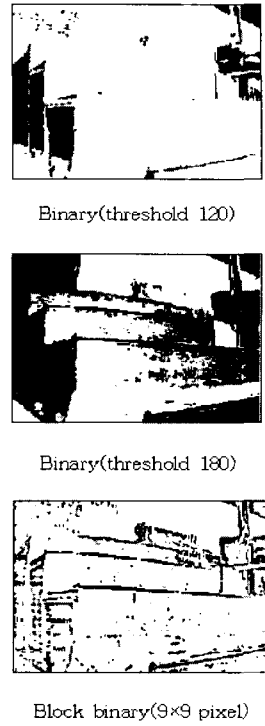


그림 5. 이진화와 블록이진화의 비교.
Fig. 5. Comparison of binary and block binary method.

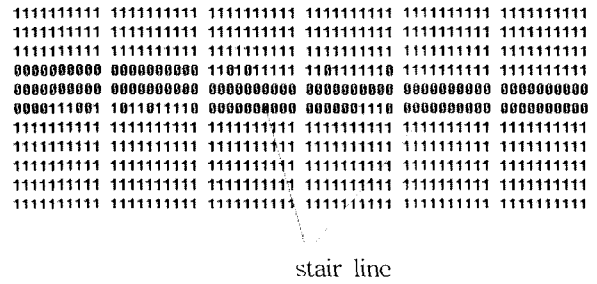


그림 6. 이미지 처리에 의한 이미지 정보.
Fig. 6. Image data after image processing.

- 모서리 선의 특징은 다음과 같다.
- i) 모서리 선은 검은색 점(0)들의 연속으로서 인접한 검은색 점이 바로 옆 혹은 바로 옆의 위(또는 아래)에 위치
- ii) 카메라 왜곡으로 전반적으로 구부러진 선 (Line) 형성. 그러나 급격히 꺾이는 구간 없음
- iii) 선의 두께는 대략 거리에 따라 2 ~ 7 픽셀 정도
- iv) 장애물과 로봇카메라의 상대위치에 따라 다양한 위치/각도의 라인 발생함
- v) 선의 길이는 50 픽셀 이상임

영상을 획득하는 시점이 포토센서를 통해 물체가 인식되었을 때이므로, 왼쪽(혹은 오른쪽)으로 치우쳐 모서리 선이 검출될지라도 측정거리에 의해 최소한의 길이(50 픽셀 이상)는 확보된다. 획득한 영상을 통해 나타난 선의 좌표조건에 따라 실제계단의 위치와 로봇이 계단을 마주 선 자세

를 알 수 있다. 이를 통해 계단과 로봇이 수평을 유지할 수 있도록 하여 최적의 자세로 계단을 오를 수 있게 된다.

아래 Fig. 7은 계단 모서리 발생형태를 나타낸 것으로 영상 획득 시점의 로봇 자세를 유추할 수 있다. 화상의 양 끝점의 좌표를 (x_L, y_L) , (x_R, y_R) 로 하고, 화상의 x 방향의 시작점을 x_{Lstart} , 끝점을 x_{Rfinal} 로 하면 아래의 각 경우에 대한 조건을 찾을 수 있다.

case A) 계단 좌측 대각선에서 바라볼 경우

$$\frac{y_R - y_L}{x_R - x_L} < 0 \tag{1}$$

case B) 계단 우측 대각선에서 바라볼 경우

$$\frac{y_R - y_L}{x_R - x_L} > 0 \tag{2}$$

case C) 계단 정면에서 바라볼 경우

$$y_R - y_L = 0 \tag{3}$$

case D, E) 계단 한쪽 측면에 위치한 경우

$$x_L > x_{Lstart}, \text{ or } x_R < x_{Rfinal} \tag{4}$$

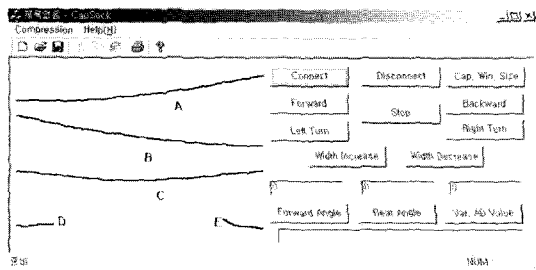


그림 7. 계단선의 이미지 형성.
Fig. 7. Image generations of stair line.

다음으로 계단과 로봇과의 거리의 예측이 필요하다. 일반적으로 스테레오비전(Stereo vision)에 의해 물체의 위치를 알 수 있으나 여기서는 하나의 카메라만 사용하고 로봇과 계단사이의 거리는 일정거리로 세팅된 포토센서를 사용하여 로봇이 일정거리에서 다다르면 로봇비전의 정보에 따라 계단에 수평 하도록 로봇을 위치시키게 된다. 이러한 방법은 계단로봇으로 하여금 항상 정해진 거리에서 승하강 알고리즘의 수행 시점을 알려주게 되므로 스테레오비전에 의한 거리 오차의 가능성을 충분히 배제 할 수 있다.

4. 계단 승하강 알고리즘

계단을 오르고 내려오는 과정의 주된 제어부분은 어깨축으로 모터의 회전을 통해 궤도형 바퀴를 올리고 내리게 함으로써 계단을 오르내린다. 이때 어깨축에 부착된 포토센서 모터의 각도 정보를 이용하여 자세를 제어하게 된다. Fig. 8은 계단을 오르내리기 위한 자세 제어로직을 나타낸다.

계단 높이 판단을 통하여 계단로봇을 기구 동작을 통해서 계단 높이에 적응 시킬 수 있다. 이는 궤도형 바퀴의 바닥에 위치한 포토센서의 신호가 Off 될 때까지 바퀴를 올리고 그때 포토센서 모터의 절대증가량을 이용해서 계단 높이

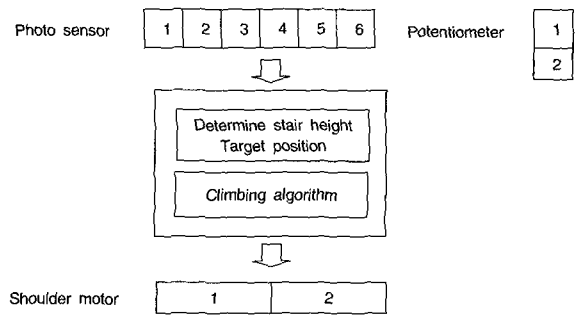


그림 8. 계단 승하강을 위한 제어 구조.
Fig. 8. Control structure for the stair up/down climbing.

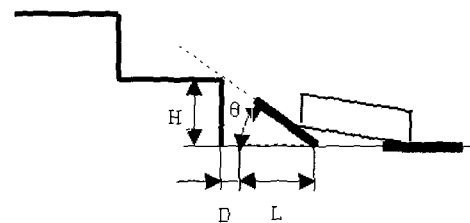


그림 9. 계단 높이 결정.
Fig. 9. Determination of stair height.

를 인식하는 것이다. Fig. 9는 포토센서를 통하여 장애물의 높이를 결정하는 과정을 나타낸다. 여기서, H는 계단 높이, D는 Sensing 거리, L은 궤도의 길이이고 θ 는 각도를 나타낸다. Fig. 9로부터 계단의 높이는 다음의 관계식에 의해 쉽게 구해진다.

$$H = (L+D) \times \tan \theta \tag{5}$$

즉 포토센서로부터 측정된 각도 θ 로부터 계단의 높이를 알 수 있다.

계단 승하강 동작에 대하여 각각 3가지 형태로 앞뒤 궤도의 운동이 결정된다. 우선 첫 번째 계단에서는 앞 궤도만 계단을 오르고(내리고), 다음으로 두 번째 계단 이후에서는 앞 궤도와 뒤 궤도가 모두 계단을 오르고(내리고), 마지막 계단에서는 뒤 궤도만 계단을 오르는(내리는) 시퀀스를 가진다.

계단 오르기 및 내려오기 동작을 위한 각각 3가지의 제어를 위해 선택할 수 있는 제어방법은 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 기구학적 해석을 통한 방법으로서 계단의 높이와 궤도의 길이 등 알고 있는 상수를 이용하여 목표 자세의 궤도 각도를 결정하는 것이다. 이때 실제로 제어에 필요한 데이터는 로봇 궤도가 수평면에 대해 기울어진 각도이며, 이를 구하기 위한 과정은 다음과 같다 (Fig. 10).

step 1 : 지면기준 앞뒤 궤도의 각도 (θ_1, θ_2)를 구한다.

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{h}{l_c - l_o} \right) \\ \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{h}{l_c + l_o} \right) \tag{6}$$

여기서 h는 계단의 높이로써 로봇이 위치하는 계단의 위치에 따라 변한다. 즉 로봇이 계단을 오르기 전 궤도가 수

평으로 놓일 경우는 0이 되며 기타 경우는 계단의 높이가 변하지 않으면 동일한 값을 가지게 된다. l_0 는 계도가 계단에 걸치기 위한 여유, l_c 는 계도의 전체길이이다.
 step 2 : 지면 기준 몸체의 각도(α)를 구한다.

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{l_s \sin \theta_1 + (h - l_i \sin \theta_2)}{d_s} \quad (7)$$

여기서 θ_1, θ_2 는 지면기준 앞뒤 계도 각도이며 l_i, l_s 는 회전축기준 계도의 장축과 단축의 길이이다.

step 3 : 몸체 기준 계도의 각도(γ_1, γ_2)을 구한다. 이 값이 어깨 모터의 제어량이 되어 다음 동작으로 이동을 가능하게 한다.

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \theta_1 - \alpha \\ \gamma_2 &= \theta_2 - \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

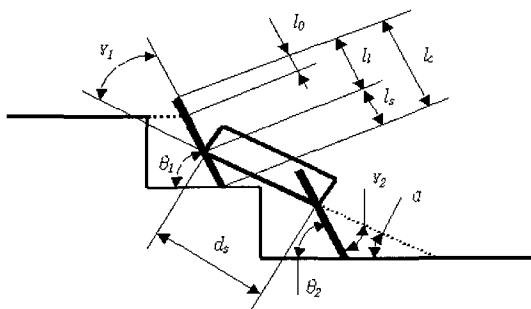


그림 10. 어깨 각의 계산.
 Fig. 10. Calculation of the arm angles.

두 번째 방법은 각 자세의 특징을 이용하는 방법이다. 예를 들면 평지에서 앞뒤 포토센서의 값을 기억해두고 필요할 때 그 포토센서 값이 되도록 앞뒤 계도형 바퀴를 회전시킨다. 앞 계도가 한 계단 올랐을 때 앞과 뒤 포토센서 값의 절대증가량이 같다는 점에 착안하여 필요할 때 앞뒤 계도가 같은 절대증가량이 되도록 회전하는 것 등이 있다. 이 방법은 기구학적 해석을 통한 방법과 비교하여 간단하지만 포토센서의 오차가 승하강시에 오차를 발생시킬 우려가 있다.

Fig. 11은 계단을 오르내리는 일련의 과정을 흐름도(Flow chart)를 사용하여 도시하였다. 계단 승하강에는 6개의 개별적인 동작들이 있으며 각 동작별 합당한 조건을 각 센서 정보로부터 찾는 과정이 명시되어 있다.

5. 계단 승하강 알고리즘

계단을 오르내리는 각 경우에 대해 상세한 알고리즘도 소개한다. 우선 오르는 알고리즘은 다음 단계로 구성된다. 계단 상승 알고리즘에는 앞뒤 계도의 위치에 따라 각각 다른 알고리즘을 적용해야 한다. 여기서 앞뒤 계도의 위치에 따라 적용한 경우는 다음과 같이 분류 한다. 앞 계도만 계단 오를 경우, 앞뒤 계도가 모두 계단 오를 경우, 뒤 계도만 계단 오를 경우, 앞 계도만 계단 내려올 경우, 뒤 계도만 내려올 경우, 그리고 앞뒤 계도 모두 계단 내려올 경우이다

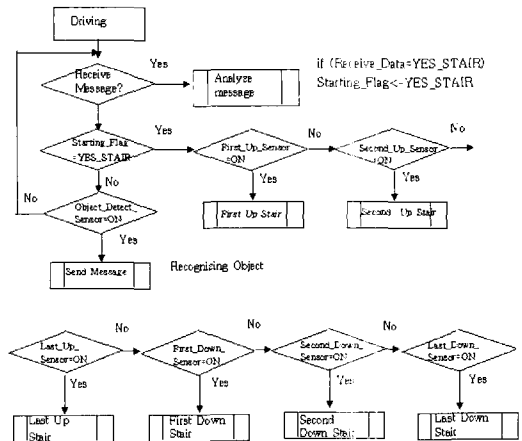


그림 11. 계단 승하강의 알고리즘.
 Fig. 11. Flow chart of all climbing up/down sequences.

여기서는 앞 계도만 계단 오를 경우를 대표로 다음과 같은 과정을 기술한다.

- step1 : 초기 앞뒤 계도 각을 확보 하고 전진한다.
 - step2 : 앞 계도 전방 포토센서 ON 일 경우 앞 계도를 올리기 시작한다.
 - 앞 계도 전방 포토센서 OFF 일 경우 계단 높이를 결정하고 넘을 수 있는 계단인지 판단한다.
 - step3 : 앞뒤 계도각의 절대증가량이 같을 때까지 앞 계도 내린다.
 - step4 : 앞뒤 계도의 절대증가량이 같으면 계단 등반 성공.
- 그 외 동작은 여러 형태의 단계를 거쳐서 승하강을 하게 되지만 본 논문에서는 이 부분을 생략하고자 한다.

IV. 인터넷과의 연계한 통신

상위 제어기의 또 다른 역할은 인터넷과의 연계이다. 계단로봇에 부착된 카메라의 영상을 인터넷으로 전송하여 원격에서 모니터링 할 수 있게 하였다. 이때 상위 제어기는 네트워크 개념상 서버(Server) 역할을 하게 된다. 인터넷통신(Window socket)에서 서버와 클라이언트(client) 간의 통신은 윈도우 소켓인 윈속(Winsock) ver2.0 을 통해서 이루어지며, 이는 Visual C++에 포함되어 있는 API (Application Programmable Interface) 이다. 소켓은 스트림형 소켓 (Stream type socket)과 데이터그램 형 소켓 (Datagram type socket)[11]이 있다. 스트림 형은 연결 지향 형 소켓으로서 서버와 클라이언트가 서로 연결 된 후 데이터를 주고받는 형태로서, 이때 상대방이 데이터를 정확하게 받지 못했으면 재 전송 하게 된다. 데이터그램 형은 비 연결 지향형으로 상대방 주소(IP address)로 무조건 데이터를 전송하는 형태로, 이때 상대방이 데이터를 정확하게 받았는지 여부는 확인할 수 없다. 계단로봇은 영상을 보내야 하기 때문에 보다 속도가 빠른 데이터그램 형 소켓을 사용하였다.

영상전송 시 실시간을 보장하기 위하여 영상데이터의 압축을 수행하였다. 여기서는 Jpeg 압축기법인 DCT 압축기법 [12]을 채용하였다. 가로×세로 = 320×240 스틸이미지 (Steel

표 2. 조도에 따른 압축량과 전송시간.

Table 2. Comparison of compression volume and time according to luminance (unit: bytes, ms).

| Image size | size before compression | Normal (fluorescent lighting) | | Dark light by computer monitor | |
|------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| | | compressed size | compressed time | compressed size | compressed time |
| 160x120 | 57600 | 4131.9 | 8.0333 | 3150.4 | 7.6500 |
| 320x240 | 230400 | 13532.3 | 48.5778 | 11067.4 | 47.7111 |

표 3. LAN과 WAN에서 압축데이터 전송시간

Table 3. Transfer time of compressed data in local and wide area (unit: ms).

| Image size | Average size | Local area | Wide area |
|------------|--------------|------------|-----------|
| 160x 120 | 4131.9 | 53.9778 | 187.7222 |
| 320x 240 | 13532.3 | 91.4889 | 198.5667 |

image, 1 frame)의 압축 전 크기는 23만 바이트(Byte)에 달하며, 초당 9 프레임 업데이트 하게 되면 1초 동안 대략 200만 byte 이다.

실험 결과 이를 LAN(Local area network)을 통해 전송할 경우 Client의 영상은 상위 30%의 영상을 볼 수 없음을 알 수 있었고, WAN(Wide area network)의 경우 첫 번째 고정 영상(Steel image) 만 전송할 수 있었다. 영상을 압축한 후 상위 30%의 영상이 깨지는 현상이 없어 졌으며 WAN에서의 모니터링도 가능해 졌다.

다음은 영상을 압축한 후의 실험결과이다. 실험조건은 100개의 샘플을 채취하여 평균값 산출, Chen DCT 사용, Q 팩터 75 적용하였고 통신 속도 측정 방법은 서버에서 압축 영상 전송 후 클라이언트로부터 응답 (Response) 데이터 수신까지의 시간을 측정하여 구한다. Table 2와 3은 조도에 따른 압축량 및 압축시간을 나타내고 LAN과 WAN상에서의 압축데이터 송신 시간을 비교하였다. 여기서 알 수 있듯이 조도에 영향을 받고 예상대로 LAN이 WAN 보다 빠른 송신을 함을 알 수 있다.

Fig. 12는 로봇, 서버, 클라이언트간의 명령데이터와 이미지 데이터의 흐름을 나타낸다. 이 방법은 감시용 로봇 시스템에서 적용한 방법이다[13]. 본 논문에서는 다양한 Q 팩터를 사용하여 보다 우수한 화상전송이 가능하도록 시도하였다. Fig. 13은 클라이언트와 서버간 통신되는 환경의 실패를 보여주고 있다.

V. 실험결과

계단로봇을 제작한 후 제어기 및 통신 모듈을 장착한 후 본 논문에서 제안한 물체인식 방법과 승하강 알고리즘을 구현하여 시험하였다. 이 결과 로봇은 200 mm/sec의 비교적 빠른 속도로 승하강하는 것을 확인할 수 있었다. 계단의 폭은 220 mm이며 높이는 150 mm로 제작되었으며 계단 하강 시에는 로봇 폭을 자동적으로 줄여 하강동작의 알고리즘으로 하강한다. 특히 하강 시와 상승 시에 서로 다른 어깨부

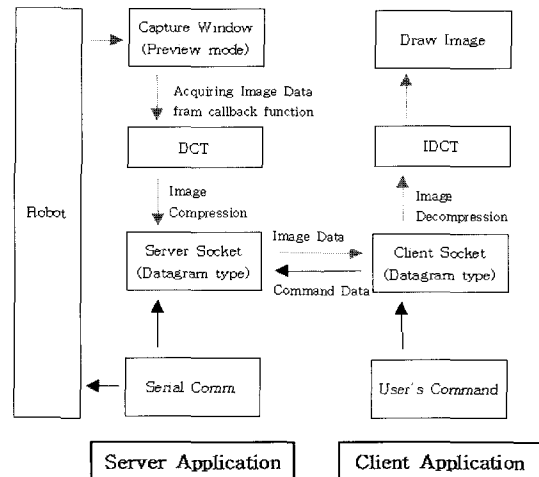


그림 12. 명령과 이미지 데이터의 전송 흐름도.
Fig. 12. Data transfer flow of command and image.

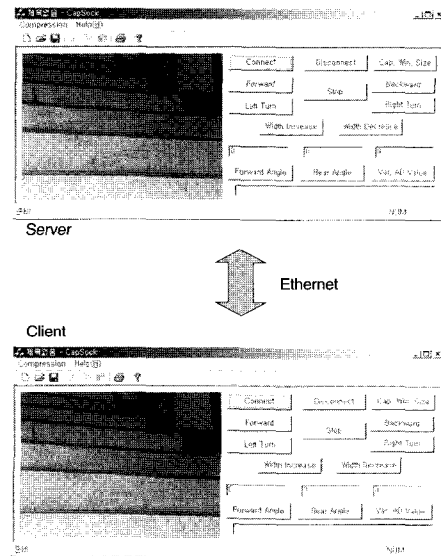


그림 13. 서버와 클라이언트 사이의 이미지 전송 예.
Fig. 13. Illustration of Image transfer between server and client via network.

모터의 지령값을 가져야만 보다 안정하게 하강함을 알 수 있다. 로봇이 주변의 장애물과 계단을 포토센서와 카메라에 의한 센서 통합으로 보다 엄밀한 장애물 및 계단의 인식이 가능하며, 자율적으로 주행하고 있으며, 로봇비전의 판단에 계단으로 인식되면 계단 상승 알고리즘이 구현된다. 상승 시 7개의 포토센서로부터 계단의 상태를 감지하여 앞서 서술한 알고리즘에 따라 상승한다. 바퀴측 무한궤도에 의한 계단로봇과 비교하여 본 로봇은 계단의 높이 변화에 능동적으로 적용할 수 있으며 어깨부 회전에 의해 보다 안정적인 자세로 승하강을 할 수 있음을 확인하였다. 로봇 몸체에 부착된 카메라는 계단 승하강시 지속적으로 몸체 앞부분을 비추면서 포토센서 정보를 통하여 계단의 최고점, 바닥면 여부 등을 판단하게 된다. 동시에 로봇카메라의 화상 정보는 RF 무선 모듈을 거쳐 로봇을 제어하는 컴퓨터로

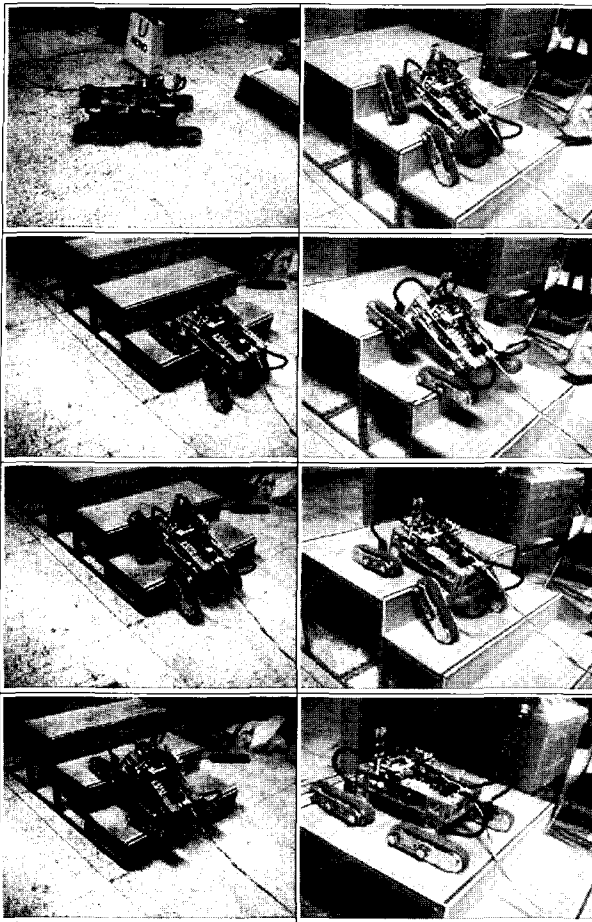


그림 14. 계단 상승과정의 모습.

Fig. 14. Demonstrations of climbing up stairs.

전송되고 이 화상은 네트워크를 통하여 원격지의 클라이언트로 전송되게 된다. 이 과정에서 화상의 실시간 전송을 위하여 화상 압축을 채용하여 원격지에서 로봇의 거동을 문제없이 확인할 수 있었다. 화상전송 과정에서 Q 팩터 75를 적용한 결과 압축비를 10에서 20배 정도로 하여 실시간 구현을 수행하였다. 실제 제작된 로봇의 승하강 동작을 Fig. 14-15에 예시하였다. 계단 승하강 알고리즘은 여러 유형이 가능하지만 보다 안정적이고 고속화를 위하여 앞서 기술한 알고리즘이 가장 우수한 것으로 판단된다.

VI. 결론

무한 궤도형 바퀴와 어깨부를 구성하여 설계한 계단로봇은 계단의 높이 및 폭의 변화에 능동적으로 적응할 수 있는 특징이 있다. 또한 적절한 축간 거리 조절을 통하여 계단 하강 시 발생 할 수 있는 불안정성을 극복할 수 있고 동시에 계단 폭의 변화에 쉽게 적응할 수 있다. 계단 및 장애물의 인식을 가능하게 하기 위하여 센서와 카메라 이미지해석을 통하여 자율주행이 가능하게 설계되었다. 계단의 인식을 효과적으로 하기 위하여 조명의 영향을 최소화하기 위한 블록 이진화 기법을 채용하였으며, 계단 선의 정보를 통하여 로봇이 지향해야 할 동작을 결정하게 한다. 몸체에 부착되어 있는 여러 포토센서 및 포텐시오메타를 통해 전송된

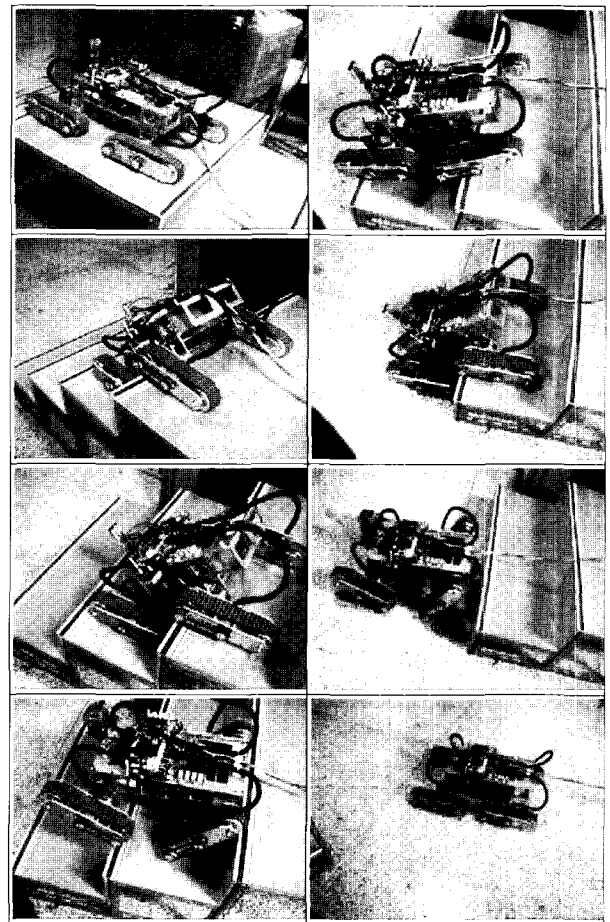


그림 15. 계단 하강과정의 모습.

Fig. 15. Demonstrations of climbing down stairs.

정보는 로봇으로 하여금 적절한 어깨부의 회전량을 결정하여 제어되어 안전하게 승하강을 가능하게 한다. 계단 주변의 정보를 실시간으로 모니터링하기 위하여 인터넷(Wide area network)을 이용한 원격제어를 수행하였으며 화상의 실시간 전송을 가능하게 하기 위하여 Jpeg 방식으로 영상을 압축하여 원격지에서의 모니터링 및 제어를 가능하게 하였다.

참고문헌

- [1] E. Koyanagi and S. Yuta, "Mechanism and control of wheeled mobile robot platform which can travel over a step," *IFAC Workshop on Mobile Robot Technology*, pp. 291-296, Jeju Island, Korea, May 20-23, 2001.
- [2] T. Mabuchi, T. Nagasawa, K. Awa, K. Shiraki, T. Yamada, "Development of a Stair-climbing mobile robot with legs and wheels," *Artificial Life and Robotics*, Vol. 2, No.4, pp. 184-188, 1998.
- [3] C.-L. Shih, "Ascending and descending stairs for a biped robot," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics A: Systems and Humans*, Vol. 29, No.3, pp.255-268, 1999.
- [4] Y. Takahashi, H. Nakayama, and T. Nagasawa, "Biped

robot to assist walking and moving Up-and-down stairs," *IECON Proceedings*, Vol. 2, pp. 1140-1145, 1998.

- [5] O. Matsumoto, S. Kajita, M. Saigo, and K. Tani, "Dynamic control of fast passing over stairs by a biped type Leg-wheeled robot considering the continuity of dynamic trajectories," *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol. 18, No. 1, pp.94-101, 2000.
- [6] M. Yim, S. Homans, and K. Roufas, "Climbing with Snake-like robots," *IFAC Workshop on Mobile Robot Technology*, pp. 7-11, Jeju Island, Korea, May 20-23, 2001.
- [7] B. Klaassen and K. L. Paap, "DGmd-snake2: a Snake-like robot driven by wheels and a method for motion control,"

International Conference on Robotics and automation. Detroit, Michigan, USA, pp. 3014-3019, 1999.

- [8] PIC16F87X User's Manual, Microchips ltd., 2001.
- [9] RF module manual, Radio matrix ltd., 2000.
- [10] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G Lee, "Robotics: control, sensing, vision, and intelligence", *McGraw-Hill*, 1987.
- [11] A. Dumas, "Programming winsock," *InfoBook*, 1996.
- [12] 하영호, 임재권, 남재열, 김용섭, "디지털 영상처리," 그린, 1998.
- [13] 김동환, 정기범, 홍영호, "네트워크 및 RF 기반의 감시용 로봇 시스템," 제어자동화시스템공학논문지, Vol. 7, No. 9, 2001.

홍 영 호

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 7 권 제 9 호 참조

김 동 환

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 7 권 제 9 호 참조.

임 충 혁

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 8 권 제 11 호 참조