

시각기반 원격로봇 제어를 위한 적응 영상전송기법

이종광* · 윤지섭** · 강이석†

(2003년 11월 14일 접수, 2004년 10월 6일 심사완료)

Adaptive Image Transmission Scheme for Vision-Based Telerobot Control

Jong-Kwang Lee, Ji-Sup Yoon and E-Sok Kang

Key Words: Telerobot(원격로봇), Image Compression(영상압축), Bandwidth(대역폭), Universal Input Device(범용입력장치)

Abstract

In remote control of telerobotics equipment, the real-time visual feedback is necessary in order to facilitate real-time control. Because of the network congestion and the associated delays, the real-time image feedback is generally difficult in the public networks like internet. If the remote user is not able to receive the image feedback within a certain time, the work performance may tend to decrease, and it makes difficulties to control of the telerobotics equipment. In this paper, we propose an improved visual feedback scheme over the internet for telerobotics system. The size of a remote site image and its quality are adjusted for efficient transmission. The constructed system has a better real-time update characteristics, and shows a potential for the real-time visual control of the telerobotics system.

1. 서 론

시각기반 원격로봇 제어시스템에서는 조작자가 원거리의 작업 상황을 원격 전시된 영상을 통해서 감시하면서 작업 상황을 판단하고, 이에 따라 마스터 입력장치를 조작함으로써 작업장의 원격 매니플레이터를 구동하여 주어진 작업을 수행하게 된다. 특히 인간이 직접 접근하기 힘든 원자력발전소, 해저, 우주 등과 같은 극한환경에서의 로봇 매니플레이터의 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾ 효율적인 원격작업을 위해서는

조작자가 현장에서 직접 작업을 수행하는 것과 같은 원격존재감(telepresence)이 제공되어야 하며, 이를 위해 시각, 힘, 소리 등 다양한 센서 정보의 전송이 시도되고 있다. 특히 시각 정보는 원격작업의 효율성을 위해 보다 나은 실시간 전송이 요구되며, 원격 조작자에게 보다 실제적인 느낌이 들도록 해야 한다. 하지만 영상 데이터의 표현은 많은 양의 정보를 필요로 하므로 이를 네트워크를 통해 실시간으로 전송하는 경우 높은 대역폭이 요구된다.

영상전송의 대역폭을 줄이기 위해 다양한 영상 압축기법들이 적용되고 있으며, 양질의 이미지를 유지하면서 높은 압축률을 달성하는 것을 추구한다. 가용의 대역폭 변동이 존재하는 인터넷 회선을 이용한 영상전송에 있어 일정한 전송률을 갖으려면 전송 데이터의 크기가 가변되어야 한다. 하지만 JPEG 영상압축 알고리즘은 원영상의 공간 중복 정도에 따라 압축률이 달라지므로 특정한 크기를 갖도록 압축 파라미터를 설정하는 것

* 회원, 충남대학교 대학원

** 회원, 한국원자력연구소

† 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과

E-mail : eskang@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6647 FAX : (042)822-7366

은 어려운 일이다. 압축 후 영상의 크기가 설정 값이 되도록 하기 위한 방법으로써 Suhono 등⁽²⁾은 Fuzzy 알고리즘을 이용하여 양자화 단계의 계인 요소를 조정하도록 하는 방식을 적용하여 3% 이내의 오차를 갖는 결과를 얻었다. 하지만 이러한 방식은 목표값에 도달하도록 계인을 수정하며 영상압축이 지속적으로 수행되므로 계산에 시간이 많이 소요되어 원격 영상전송에 적용하는 경우 시간지연의 요인이 될 수 있는 문제점이 있다.

원격 영상전송의 기법들로서 정적 영상의 압축 전송이나 상용의 비디오 서버를 이용하는 방법들이 다양한 분야에서 적용되고 있다.⁽³⁻⁷⁾ Chan 등⁽³⁾은 공항 변전소의 보안, 화재 예방, 장비에 대한 실시간 상태 감시를 위해 그리고 Huosheng 등⁽⁴⁾은 이동로봇의 시각제어를 위해 웹 브라우저를 이용한 원격 모니터링을 수행하였다. 이들은 JPEG 압축 영상을 전송하는 방식을 채택하였으며, 네트워크 특성에 대한 고려 없이 실시간성에 주안점을 두어 높은 압축률을 갖도록 압축 파라미터를 고정하였다.

한편 상용 비디오 서버의 시각제한은 데이터 버퍼링에 따른 시간지연의 문제점으로 인해 시간지연이 큰 고려사항이 될 수 없는 교육용 시뮬레이션 분야나 가상의 모델과 연계한 적용이 주를 이루고 있다. Nitin 등⁽⁵⁾은 MS NetMeeting을 이용하여 서버 컴퓨터의 화면을 전송받고 이를 통해 서버에서 구동되는 Matlab Simulink 모델을 원격으로 구성함으로써 제어 회로에 대한 설계를 공유할 수 있도록 하였다. Riko 등⁽⁶⁾은 상용 비디오 서버를 사용하는 경우 발생하는 비디오 데이터의 버퍼링에 따른 시간지연 문제를 VRML로 구성된 가상의 작업공간에 인위적인 시간지연을 도입하여 개선하고자 하였다. 또한 Bejczy 등⁽⁷⁾은 시간지연을 보상하기 위해 현재의 로봇 동작을 시뮬레이션을 통해 예측하고 이를 조작자의 화면에 겹쳐 보여주는 예측 디스플레이(predictive display) 기법을 사용하였다. 하지만 이러한 방식은 접촉 순간의 움직임을 예측하기 힘들며, 작업 대상의 모델이 완벽하지 않은 경우 예측 오류가 발생하는 문제점이 있다.⁽⁸⁾

시각기반 원격로봇의 직접제어 시스템에서는 영상정보와 제어 명령들이 동일한 물리적 연결을 통해서 공유되므로 제어되지 않는 영상 전송 또

는 비디오 스트리밍(streaming)은 제어 루프를 간섭하는 결과를 가져 전체 시스템의 안정성에 영향을 미치게 된다.⁽⁹⁾ 작업 특성에 따라 효율적인 원격 시각제한을 수행하기 위해 Matsumaru 등⁽¹⁰⁾은 원격작업을 영상 우선 모드와 제어 우선 모드로 구분하고, 작업의 성격에 따라 전송 데이터에 포함되는 영상 정보와 제어 정보의 비율을 조정함으로써 영상의 전송 주기를 조정하였다. 하지만 영상과 제어가 모두 중요한 작업에서 영상 데이터와 제어 데이터의 비율을 결정하는 문제가 발생된다.

본 논문에서는 네트워크 특성에 따라 영상압축 파라미터를 조정하는 적응 영상전송 기법에 대한 연구를 수행하였다. 압축률, 압축시간, PSNR 분석 등을 이용한 압축 영상의 평가를 통해 원격 시각제한에 적합한 압축 알고리즘을 선정하고, 압축 파라미터를 조정하기 위한 기준 모델식을 선정하였다. 제안된 기법에 대하여 네트워크 특성이 변화하는 가상의 상황을 설정하고 범용 입력장치와 5자유도 매니플레이터를 이용한 기준 제적 추종실험을 통해 그 효용성을 입증하였다.

2. 영상압축

2.1 영상압축 알고리즘

영상 데이터의 표현은 많은 양의 정보를 필요로 하므로 이를 전송하는데 높은 대역폭과 계산 부하 그리고 전송 에너지 부담을 요구한다. Fig. 1은 pan-tilt 장치에 설치된 카메라로부터 획득된 로봇 영상을 보여준다. 영상은 BMP 형식으로 획득

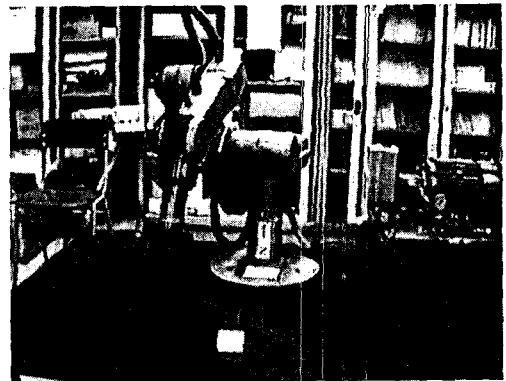


Fig. 1 Robot image captured by the pan-tilt device

Table 1 Comparison of various compression algorithms

| resolution | image size (kB) | | | | compression time (msec) | | | PSNR (dB) | |
|------------|-----------------|------|-----|-----|-------------------------|-------|-----|-----------|------|
| | BMP | JPEG | PNG | TIF | JPEG | PNG | TIF | JPEG | TIF |
| 640×480 | 901 | 53 | 445 | 143 | 92 | 1,030 | 185 | 34.0 | 37.5 |
| 320×240 | 226 | 19 | 125 | 50 | 25 | 216 | 45 | 32.0 | 36.0 |
| 160×120 | 57 | 7 | 37 | 19 | 19 | 47 | 16 | 29.3 | 32.9 |

특되며 24비트 컬러 정보를 담고 있어 그 크기가 상당히 크다. 예를 들어 640×480 영상의 경우 그 크기가 거의 1MByte에 이르러 이를 네트워크를 통해 전송하는 경우 실시간 시각회환이 거의 불가능하다. 원격조작 시스템에서는 조작자가 원격리의 상황을 원격 전시된 영상을 통해서 감시하고 판단하므로 이러한 실시간 전송의 정도는 전체 원격 시스템의 성능에 영향을 미치게 된다. 영상의 크기를 최소화하면서도 손실이 적은 압축 알고리즘을 선정하기 위해 Fig. 1의 BMP 포맷 영상에 대해 무손실 압축 방식의 PNG, 손실 압축 방식을 이용하는 JPEG와 TIF 압축 알고리즘 등을 적용하여 평가한 결과가 Table 1에 제시된다. 동일한 영상압축 알고리즘을 사용하더라도 대상 영상에 따라 압축률, 압축 시간, 그리고 손실 정도에 다소 차이가 있을 수 있으나, 전체적인 압축 알고리즘의 평가에 대해서는 무리가 없으리라 판단된다. JPEG 압축의 경우 양자화 계수를 75로 적용하였으며, VBS(virtual block size)가 8인 표준상태로 진행되었다. 평가 결과 JPEG 알고리즘이 압축 시간과 압축 정도에 있어 다른 알고리즘에 비해 우수함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 영상을 JPEG로 압축하여 전송하는 방법을 선택하였다.

2.2 JPEG 영상압축

Fig. 2는 JPEG 영상압축 알고리즘의 기본적인 흐름도를 보인다. 입력 영상은 중첩되지 않은 8×8 픽셀로 분할되며, 각각의 블록은 이산 코사인 변환(Forward Discrete Cosine Transform)에 의해 주파수 영역으로 변환된다. 다음 단계에서 각 주파수 요소들은 전송에 필요한 정보의 양을 줄이기 위해 양자화(quantization) 된다. 이러한 양자화 된 값들은 이미지 표현의 크기를 줄이기 위해 허프만(Huffman) 부호화 방법을 통해 부호화된다.

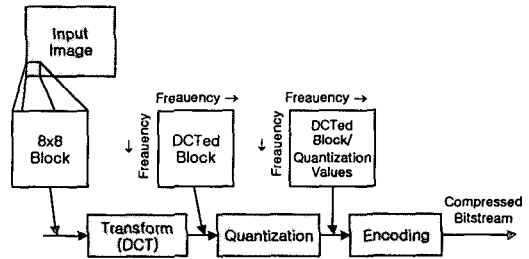


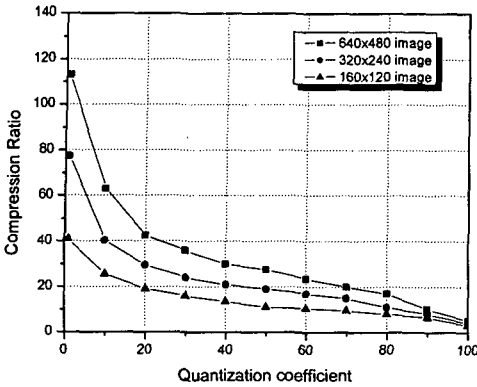
Fig. 2 Basic flow of the JPEG image compression algorithm

허프만 부호화 방법은 화소 값을 고정된 길이의 부호로 나타내지 않고 영상에서의 빈도수에 근거한 가변 길이 부호로 나타내는 방식이다. 즉 발생 빈도가 높은 화소 값은 보다 많은 비트로 각각 표시함으로써, 영상을 나타내기 위해 소요되는 전체 비트수를 감소시킨다.⁽²⁾

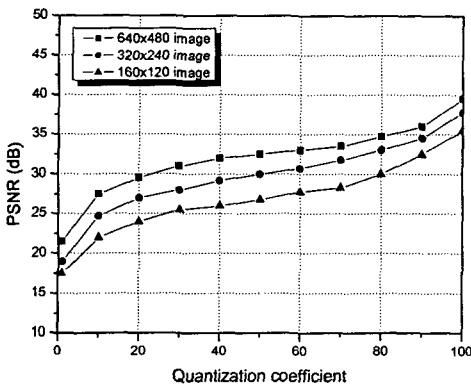
JPEG 표준은 특정한 양자화 테이블을 정의하고 있으며, 이는 최종 이미지의 질에 의존하여 크기를 키우거나 줄일 수 있도록 되어있다. 기존의 연구는 압축영상의 PSNR을 개선하기 위해 최적의 양자화 테이블을 구성하는 것이 주를 이룬다. 양자화 수준을 증가시킬수록 이미지의 질은 증가하며, 이에 따라 전송에 필요한 정보의 양이 증가된다. 양자화 값들은 IJG(Independent JPEG Group)에 정의된 양자화 계수 0, 50, 그리고 100 사이에서 선형적으로 보간된다.⁽¹¹⁾

2.3 압축 영상의 평가

압축 영상의 질을 객관적으로 평가하는 기준으로 압축률(compression ratio; CR), 픽셀당 비트수, RMSE(root mean squared error), PSNR(peak signal-to-noise ratio) 등이 있다. 압축률은 원영상과 압축된 영상의 크기 비를 나타낸다.⁽¹²⁾ 또한 PSNR은 원영상과 압축된 영상 사이의 질적 차이를 규정하는 척도로 사용되며, 한 화소를 8비트로 나타



(a) Compression ratio



(b) PSNR

Fig. 3 Effects of varying quantization levels

내는 영상에 대해 식 (1)의 평균자승오차(mean squared error; MSE)에 대한 RMSE를 이용하여 식 (2)와 같이 정의된다.⁽¹³⁾ 일반적으로 RMSE 값이 적을수록 또는 PSNR이 클수록 압축된 이미지의 질이 더 좋다는 것을 의미한다.

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} [I(x, y) - I'(x, y)]^2 \quad (1)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{RMSE} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

JPEG 영상압축 알고리즘에서는 압축률이나 PSNR 등을 조절하기 위해 양자화 계수를 파라미터로 사용한다. Fig. 3은 세 가지 서로 다른 크기의 BMP 영상에 대하여 양자화 계수를 변화시키면서 압축을 수행하여 압축률과 PSNR을 계산한 결과를 나타낸다. 영상 전송의 관점에서 양자화 수준의 증가는 이미지 질과 함께 전송되는 비트

의 수를 증가시키므로 네트워크 통신에 있어 대역폭을 증가시켜 정체를 유발할 수 있다. 따라서 네트워크 대역폭의 변화에도 실시간 전송이 유지 되도록 영상 압축 파라미터를 조정하는 연구가 필요하다.

3. 영상전송

3.1 영상전송 기법

다양한 원격제어 시스템에서 서버 푸시, 클라이언트 풀, 정적 이미지 압축전송 및 상용의 비디오 서버 등과 같은 영상전송기법들이 활발히 적용되고 있다. 서버 푸시는 전송의 주체가 서버가 되어 연결된 모든 클라이언트에게 지속적으로 데이터를 전송하는 방식이며, 클라이언트 풀은 클라이언트에서 서버로 데이터 제공을 요청하여 데이터를 가져오는 방식이다. 이러한 기법들은 통상 일정한 시간 간격으로 전송 또는 전송 요청을 하도록 프로그램화되어 사용되므로 구현하기는 비교적 용이하나 가용의 대역폭이 서로 다른 연결에 대해서도 동일한 전송률이 적용되는 단점을 갖는다. 한편 상용의 비디오 서버는 지속적으로 전송되는 데이터를 메모리 버퍼에 저장하고 일정한 크기 이상이 되었을 경우 표시를 하는 방식을 채택하고 있으므로 버퍼링에 따른 추가적인 시간지연이 발생된다.

3.2 네트워크 특성

대부분의 마스터/슬레이브형 원격조작 시스템들은 비공개 매체에 기초하며, 전송 지연과 데이터 손실이 잘 모델링 될 수 있다. 반면 인터넷은 대중적이고 자원을 공유하므로 다양한 사용자들이 복잡한 네트워크를 통해 동시에 데이터를 전송한다. 두 영역 사이의 전송로는 고정되지 않으며, 둘 또는 그 이상의 사용자가 동일한 경로를 통해 동시에 데이터를 전송할 때 충돌이 일어날 수 있다. 또한 인터넷 기반의 로봇들은 불확실한 전송 시간 지연과 데이터 손실 문제에 직면하게 되며, 특히 제어 명령과 탐사 정보의 통신 지연은 예측하거나 보상하기 어려우므로 원격제어 시스템의 안정성에 영향을 미치게 된다.

3.3 적응 이미지 전송

구성된 시스템은 시각 정보와 제어 신호 등 두

가지의 데이터 흐름이 존재한다. 따라서 이러한 시각 정보와 실시간 제어 정보가 동일한 연결을 공유할 때에는 상대적으로 크기가 훨씬 큰 영상 신호가 네트워크를 쉽게 포화를 시킬 수 있으므로 제어 루프에 대해 치명적인 방해할 유발할 소지가 있다. 예를 들어 원격 영상 정보가 동일한 압축률 및 동일한 샘플링률로 획득 및 전송되도록 프로그래밍 될 수 있지만, 가용 네트워크의 대역폭 같은 동작조건이 변화하거나 세밀한 작업을 위해 보다 고화질의 시각 정보가 필요한 경우 네트워크의 포화 등과 같은 문제가 발생할 수 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 네트워크 특성 적응하는 압축 파라미터의 조정이 필요하다.

가용의 대역폭 추정값 B 와 영상 프레임의 전송률 R 로부터 전송에 필요한 영상 데이터 크기 F 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$F = B/R \tag{3}$$

이러한 대역폭 구속조건을 만족시키기 위해 필요한 압축 파라미터를 추정할 필요가 있다. 이를 위해 서로 다른 내용을 담고 있고 340x240 크기를 갖는 10개의 24비트 컬러 영상에 대하여 양자화 수준을 변화시키며 압축률과 PSNR을 평가하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다. 동일한 압축률 또는 동일한 화질의 이미지를 얻기 위한 추정식을 각각 다음과 같은 다항식으로 근사화하였다. 여기서 q 는 양자화 계수이며, m 과 n 은 피팅 후 상관계수 값이 가장 큰 4와 5로 선정되었다.

$$q = \sum_{i=0}^m A_i CR^i \tag{4}$$

$$q = \sum_{i=0}^n B_i PSNR^i \tag{5}$$

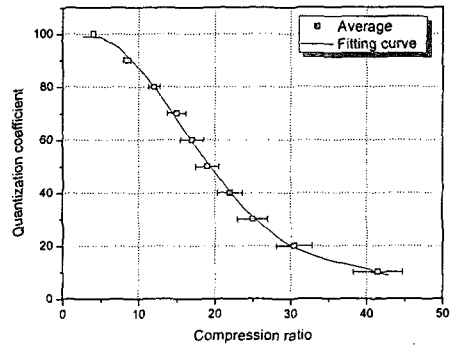
온라인 대역폭 추정을 통해 가용의 대역폭 변화가 감지되면, 식 (3)으로부터 계산된 압축률과 PSNR을 만족하도록 식 (4)와 (5)로부터 압축파라미터를 추정하는 데이터 흐름 관리가 수행된다.

4. 실험

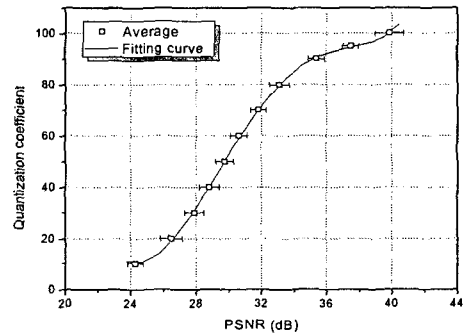
4.1 실험 장치

4.1.1 범용 입력장치

원격조작 시스템에서 사용되는 마스터 암은 슬레이브 매니플레이터와 기하학적으로 동일한 형



(a) Compression ratio



(b) PSNR

Fig. 4 Variation of quantization coefficient with compression ratio and image quality

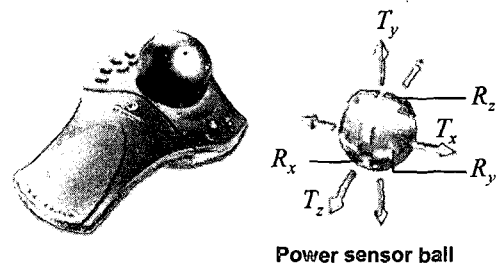


Fig. 5 SpaceBall 4000 model

상을 갖는 전용 마스터 암과 형상이 다른 이형 마스터 암으로 구분된다. 기하학적으로 동형인 경우는 슬레이브 암의 각 관절의 위치를 마스터 암의 대응되는 관절의 위치와 동일하도록 제어되므로 시스템의 제어가 쉬워지며, 역운동학(inverse kinematics)을 풀지 않아도 되므로 마스터 암의 설

계 시 작업자의 조작성이 고려되지 않고, 하나의 마스터 암은 한 가지 형상의 슬레이브 매니플레이터 밖에 대응하지 못하게 된다.

본 연구에서는 다양한 슬레이브 매니플레이터에 적용할 수 있도록 Fig. 5와 같은 3차원 그래픽 모델링 도구로 사용되는 Spacetec IMC 사의 SpaceBall 4000 모델을 범용 입력장치(universal input device)로 사용하였다. 이 장치는 손으로 power sensor ball을 밀고, 당기고, 비틀음에 따라 6자유도의 값을 얻을 수 있다. 여기서, T_x, T_y, T_z 는 각각 x, y, z 방향으로의 이동을 표시하며, R_x, R_y, R_z 는 각각 x, y, z 축에 대한 회전을 나타낸다. 초당 10회의 출력을 내는 입력장치 특성 때문에 로봇 제어가 과도하게 동작하지 않도록 하기 위해 특정 시간이내의 아주 근접한 출력 데이터에 대한 필터링이 수행된다.

4.1.2 원격로봇 제어시스템 구성

원격제어 시스템의 하드웨어는 Fig. 6과 같이 5 자유도 매니플레이터와 작업 공간을 감시하는 카메라가 부착된 pan-tilt 장치가 서버 쪽에, 로봇을 구동하기 위한 입력장치인 Spaceball이 클라이언트 쪽에 위치한다. 로봇 매니플레이터는 조인트

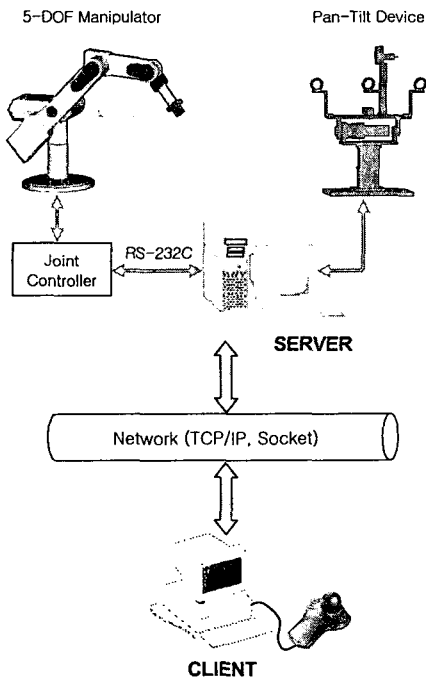


Fig. 6 Configuration of the system hardware

컨트롤러에 의해 구동되며, RS-232C 통식 규약에 따라 컴퓨터의 명령을 받을 수 있고 또한 로봇의 상태 정보를 전달한다.

소프트웨어는 Fig. 7과 같이 비디오 서버와 제어 서버 그리고 비디오 관리자와 제어 관리자로 구성된다. 비디오 서버는 영상획득, 영상압축, 영상전송 등을 담당하며, 제어 서버는 클라이언트의 전송 패킷을 분석하여 로봇을 구동하는 역할과 로봇의 상태 정보를 클라이언트로 전송하는 역할을 수행한다. 또한 비디오 관리자는 서버로부터 전송되는 영상을 저장하고 하나의 이미지가 완성되면 사용자 인터페이스를 통해 보여주는 역할을 한다. 제어 관리자는 입력장치의 출력을 로봇 제어 명령을 위한 패킷으로 변환하여 전송하고 로봇의 상태 정보를 사용자 인터페이스에 표시하는 역할을 수행한다.

서버와 클라이언트는 TCP/IP 소켓 통신에 의해 연결되었으며, 두 개의 전송 포트가 가상 채널을 만드는데 사용되었다. 하나는 원격 영상전송을 담당하며 다른 하나는 제어 명령들과 로봇 정보의 전송을 담당한다. 이러한 설계는 획득된 영상을 전송하는 동안 지속적으로 새로운 명령을 수

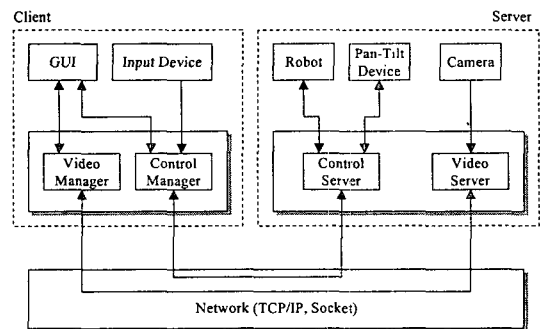


Fig. 7 Communication model between the client and the server

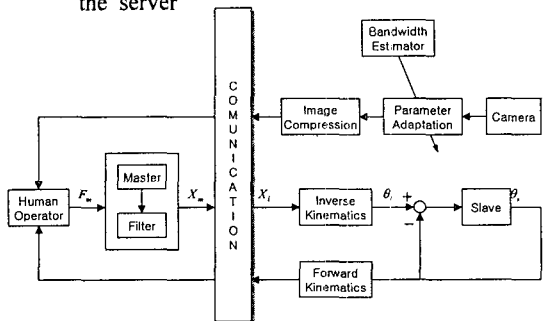


Fig. 8 Block diagram of the vision-based direct telerobot control

행하거나 로봇 정보를 얻을 수 있도록 한다. 서버는 Pentium III급 컴퓨터와 Windows 2000 환경에서 동작한다. 서버와 클라이언트 프로그램은 영상 처리나 로봇 제어 같은 시스템의 핵심 기능들을 구현하는데 적합한 도구인 Visual C++을 이용하여 구현하였다.

Fig. 8은 시각기반 원격작업을 수행하기 위해 구성된 시스템의 개략도를 나타낸다. 조작자는 범용 입력장치를 통해 로봇 end-effector의 위치와 자세를 제어한다. 영상 전송은 3.3절에 기술된 적응 영상전송기법에 의해 네트워크 대역폭 변화에 따라 영상의 압축률과 전송률이 조정된다.

4.2 실험 결과

영상전송에 대한 예비실험으로 로봇이 점대점(point to point) 움직임을 갖도록 동작을 시킨 후, 비디오 서버에서 로봇의 이동 장면을 저장하고 압축하여 클라이언트로 전송하는 실험을 수행하

였다. 로봇의 이동시간은 약 5초 정도 소요되었다.

Fig. 9는 영상압축 알고리즘의 양자화 계수를 75로 고정하고 전송 주기를 300msec에서 80msec까지 변화시킨 경우 로봇의 위치를 나타낸다. 계산에 의하면 서버 측에서는 초당 20 프레임 이상을 압축할 수 있었지만 소프트웨어의 overhead와 통신 특성에 의해 최대 15 프레임 이상의 전송 명령에 대해서는 제대로 동작되지 않았다.

Fig. 10은 입력장치를 이용하여 로봇의 끝점이 반원을 그리도록 조작하는 실험을 수행하는 초기 화면이다. 로봇의 움직임은 평면에 국한되므로 y, z 축 방향의 2차원 좌표만을 고려하였다. Fig. 11과 같이 가용의 대역폭이 500kbps에서 800kbps로 60%가 선형적으로 증가하는 가상의 상황을 설정하였다. 이러한 대역폭 추정값을 식 (3)에 대입하면 특정 전송률을 만족시키기 위한 영상 데이터 크기를 구할 수 있으며, 이를 기준으로 압축률이 계산된다 이러한 결과를 식 (4)에 대입하여 특정 압축률을 얻기 위한 양자화 계수값을 계산할 수 있으며, 결과가 Fig. 12에 나타나 있다.

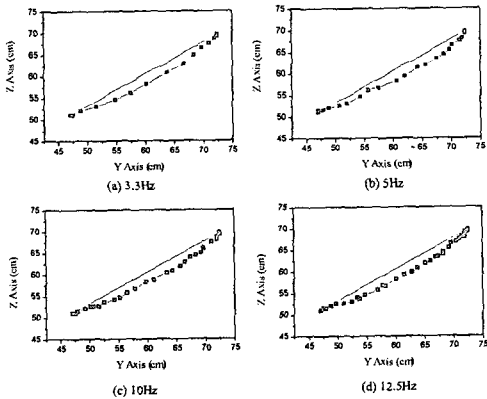


Fig. 9 Image transmission rate

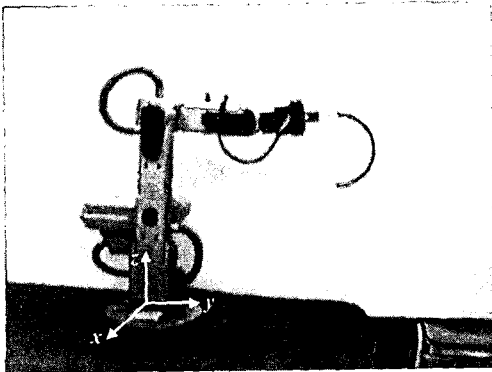


Fig. 10 Half circle following experiment

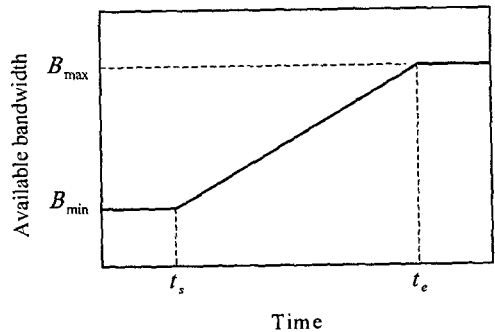


Fig. 11 Variation of the available bandwidth

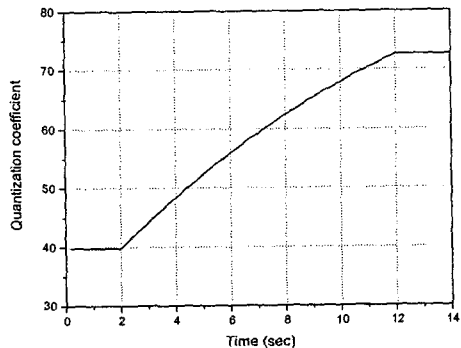


Fig. 12 Estimated quantization coefficient

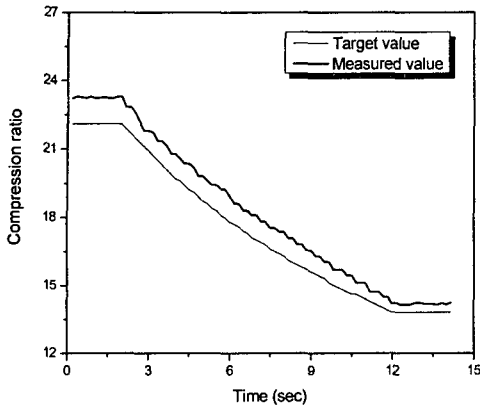
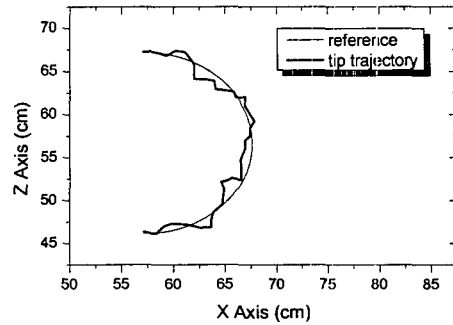


Fig. 13 Adaptation result of the compression ratio

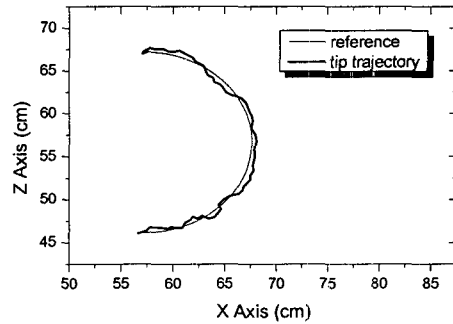
Fig. 13은 대역폭 조건을 만족시키기 위한 목표 압축률과 추정된 양자화 계수값으로부터 압축된 결과 사이의 비교를 보인다. Fig. 4의 추정식은 다양한 내용의 영상에 대한 통계적 결과를 나타내고 있지만, 실험에서는 배경을 흰색으로 한 상대적으로 단순한 영상을 사용하였으므로, 두 결과에 다소 차이를 보였다. 만약 로봇 작업 공간에 대한 영상들로부터 추정식이 만들어진다면 보다 정확한 추정이 가능하리라 판단된다.

Fig. 14는 이러한 가상의 상황에서 실험한 결과이다. 예를 들어 압축된 이미지가 20kByte의 크기를 갖는 경우, 이러한 네트워크 특성에서 안전한 전송률은 3 frame/sec로 설정하는 것이 바람직하다. Fig. 14의 (a)는 전송률이 3 frame/sec로 고정된 상황에서 실험한 결과를 나타낸다. 반면 Fig. 14의 (b)는 조작자가 거의 실시간으로 시각채환을 받는 것처럼 느낄 수 있도록 하기 위해 압축 파라미터를 조정하여 전송률을 6 frame/sec이 되도록 하여 실험한 결과를 나타낸다. 네트워크 특성에 적응하는 경우에도 기준선을 제대로 따라가지 못하는 것은 입력장치에 대한 조작 특성에 의한 것으로 판단된다.

압축영상의 정량적 평가에 있어 항상 적은 값의 RMSE(큰 값의 PSNR)가 복원 영상의 질이 우수하다고 평가할 수 있지만, 주관적 평가는 그 차이가 미미하거나 다르게 평가될 수 있다. 궤적 추종 실험 결과에 나타난 바와 같이 조작자의 관점에서는 영상의 질이 다소 감소하더라도 보다 실시간적으로 보이는 것이 작업 성능에 우수한



(a) Fixed frame rate (3 frame/sec)



(b) Adaptive frame rate (up to 6 frame/sec)

Fig. 14 Result of trajectory following

결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

원격로봇의 시각기반 직접제어를 위한 적응 영상 전송 기법이 제안되었다. 네트워크를 통한 영상 전송은 높은 대역폭이 요구되므로 영상 크기를 최소화하면서 손실이 적은 압축 알고리즘을 압축률, 소요시간, PNSR 등의 평가를 통해 선정하였다. 네트워크의 특성과 작업 조건에 따라 보다 효율적인 전송이 되도록 영상의 압축률과 전송률을 변화시키는 데이터 흐름 관리가 수행되었다. 가용의 대역폭 추정으로부터 필요한 압축률과 전송률을 결정하기 위해 다항식 형태의 추정식이 영상압축 파라미터를 선택하기 위해 사용되었다. 범용 입력장치를 이용하여 로봇의 끝점이 기준 궤적을 따르도록 조작하는 실험을 통해 제안된 기법이 보다 나은 실시간 전송 특성을 갖고 있으며, 이러한 결과는 원격로봇 시스템의 실시

간 시각궤환 제어에 대한 성능 향상의 잠재적 가능성을 보여준다.

참고문헌

- (1) Taylor, K. and Dalton, B., 2000, "Internet Robotics: a New Robotics Niche," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 7, No. 1, pp. 27~34.
- (2) Suhono, H. S. and Keinosuke, M., 1995, "Quantity Control for JPEG Data Compression Using Fuzzy Logic Algorithms," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 41, No. 1, pp. 42~48.
- (3) Chan, W. L., So, A. T. P and Lai, L. L., 1999, "Internet-Based Transmission Substation Monitoring," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 293~298.
- (4) Hu, H., Yu, L., Tsui, P. W. and Zhou, Q, 2001, "Internet-Based Robotics Systems for Teleoperation," *International Journal of Assembly Automation*, Vol. 21, No. 2, pp. 143~151.
- (5) Nitin, S. and Ognigen, K., 2002, "Internet-Based Educational Control Systems Lab Using NetMeeting," *IEEE Trans. on Education*, Vol. 45, No. 2, pp. 145~151
- (6) Riko, Š., Matjaž, D., Rob, M. P. and Suzana, U., 2001, "Telerobotics Experiments via Internet," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 2, pp. 424~431.
- (7) Bejczy, A. K., Kim, W. S. and Venema, S. C., 1990, "The Phantom Robot: Predictive Display for Teleoperation with Time Delay," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 546~551.
- (8) Mitsuishi, M., Hori, T. and Nagao, T., 1995, "Predictive Augmented and Transformed Information Display for Time Delay Compensation in Tele-handling/Machining," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 45~51.
- (9) Roberto, O., 2001, "Web-Interfaced, Force-Reflecting Teleoperation Systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 6, pp. 1257~1265.
- (10) Matsumaru, T., Kawabata, S., Kotoku, T., Matsuhira, N., Komoriya, K., Tanie and K., Takase, K., 1999, "Task-Based Data Exchange for Remote Operation System through a Communication Network," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 557~564.
- (11) Independent JPEG Group, Version 6a : <http://www.ijg.org>
- (12) Crane, R., 1997, A Simplified Approach to Image Processing, Prentice Hall.
- (13) Sung, M. M, Kim, H. J., Kim, E. K., Kwak, J. Y, Yoo, J. K. and Yoo, H. S., 2002, "Clinical Evaluation of JPEG2000 Compression for Digital Mammography," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 49, No. 3, pp. 827~832.