

# 시각 서보 제어에 있어서 대응점 선택 알고리즘 개발

## Development of a Correspondence Point Selection Algorithm for Visual Servo Control

문 용 선\*, 정 남 채\*\*

(Yong Seon Moon\*, Nam Chae Jung\*\*)

※본 연구는 순천대학교 공과대학 학술재단 학술연구비에 의해 수행되었음

### 요 약

본 논문은 스테레오 카메라를 대응점 문제가 발생하지 않을 만큼 병진 및 전진 이동시켜 고속으로 양안 시차 정보를 획득할 수 있다는 것을 제안한다.

병진 이동하는 스테레오 비전에 있어서 오차가 없고 신뢰성이 높은 시차 정보를 획득할 수 있다는 것과 전진 이동하는 스테레오 비전에 있어서는 통상의 스테레오 비전으로는 검출할 수 없는 수평성분을 획득할 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 좌우 화상사이의 대응을 미리 한정하기 때문에 한정하지 않을 때에 비해 대응점이 밝고 작게 되므로 고속으로 스테레오 비전을 행할 수 있다.

그러나 전진 이동하는 스테레오 비전에 있어서 화상중심 부근과 폐색영역이 일치하면 바른 양안 시차 정보를 얻을 수 없는 문제가 있다.

### ABSTRACT

This paper proposes that can take at high speed the information of binocular disparity with moving translational and forward stereo camera to the extent that does not occur the problem of a correspondence point.

It shows that in case of stereo vision with translational motion, can take the information of binocular disparity being devoid of error and putting high confidence in, and that in case of stereo vision with forward motion, can take the horizontal component which can not be detected in common stereo vision. Besides, the stereo vision can be done at high speed due to being bright and small a correspondence point comparing not to do, because a correspondence between right and left images is previously limited.

But there are problem that a reasonable information of binocular disparity can not be taken, if the vicinity of center of image is in accord with the region of occlusion in stereo vision with forward motion.

### 1. 서 론

현재의 로봇은 한정된 환경에서는 큰 힘을 발휘하지만 환경이 바뀌면 인간이 로봇 주위의 3차원 정보를 고쳐주어야 한다. 이 같은 로봇을 현실화하기 위해서는 주변의 3차원 정보를 고속으로 처리하는 시각 센서가 부착된 로봇이 반드시 필요하다. 지금까지는 시각에 의해 정량적인 거리정보를 얻기 위해 광 레이더 빔 등이 제안되어 왔지만, 본 논문에서는 인간의 양안과 같이 세계를 자연 그대로 관측하는 수동적 계측법인 스테레오 비전에 중점을 두고자 한다<sup>(1,2)</sup>.

스테레오 비전이란 좌우의 카메라에 비치는 작은 시점의 빛나간 화상사이에서 대응한 점의 2차원적인 위치의 차이를 계산하고 삼각측량법에 의해 깊이를 구하는 방법이다<sup>(3)</sup>. 이 방법은 어떤 의미를 갖는 에너지를 대상물에照射하지 않는 수동적인 방법이기 때문에, 적용할 수 있는 환경에 대한 제한이 적다. 또한, 능동적인 방법은 불특정 다수의 시스템이 같은 영역의 거리정보를 동시에 얻으려고 할 경우 그 조사한 에너지의 간섭에 의해 올바른 거리정보를 얻을 수 있을지는 보증할 수 없지만 수동적인 방법인 스테레오 비전에서는 거리 정보를 쉽게 구할 수 있다는 것과 카메라 두 대만을 사용하므로 기구가 간소하다는 이점도 가지고 있다.

스테레오 비전에 있어서 중심적인 문제는 좌우 두 장의 화상사이에서 대응하는 점을 발견하고 그 위치 오차

\* 순천대학교 공과대학 전자공학과

\*\* 초당대학교 정보통신공학과

접수일자: 1998년 11월 2일

(양안시차)를 검출하는 대응점 문제이다. 스테레오 비전에 의해 정확한 거리 정보를 얻기 위해서는 넓은 시차범위와 특징을 추출할 수 있도록 분해능이 높아야 하지만, 양자 모두 가정한 시차후보의 수를 증가시켜 대응시킨다는 것은 곤란하다. 가정한 시차 후보의 수를 작게 하도록 하면 충분한 시차범위와 분해능을 설정할 수는 있지만, 양자를 동시에 만족시킬 수는 없다. 원활함(smoothness) 등의 구속 조건을 부가하여 해의 존재 범위를 한정하고 이완법 등을 구사함으로써 반복계산에 의해 총체적인 최적 해를 구하여 대응점 문제를 해결하는 방법이 있다<sup>3,6)</sup>. 그러나 가정한 후보점이 많은 채로 이 방법을 적용할 경우 반복계산에 의하여 계산량이 많아지고 실시간에 거리 정보를 얻을 수 없다<sup>7,8)</sup>.

본 논문에서는 상기 문제점을 해결하기 위해 스테레오 카메라를 대응점 문제가 발생하지 않는 거리만큼 움직여서 단안의 개략적인 시차정보를 얻는다. 이렇게 하여 얻어진 개략적인 거리 정보를 사용함으로써 스테레오 비전의 경우, 양안시차의 탐색범위를 한정하는 것을 제한한다. 미리 좌우 화상사이의 대응을 한정하기 때문에 한정하지 않을 때에 비해 대응점이 밝고 작게 되므로 고속으로 양안 스테레오 비전을 행할 수 있는데, 본 연구에서는 스테레오 카메라가 기준 방향으로 병진이동과 전진이동하는 경우를 고찰하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 일반적인 스테레오 비전에 있어서, 원리, 이점과 문제점 등을, 3장에서는 이동하는 단안 카메라에 있어서 기하학, 원리, 이점과 문제점을 병진이동과 전진이동으로 나누어서 논술한다. 4장에서는 3장에서 얻은 단안 카메라의 정보를 사용하여 스테레오 카메라의 시차검출의 능력 향상을 다루며, 5장에서는 실험조건과 결과를 고찰한다. 끝으로 6장에서는 본 연구를 총괄적으로 검토하고 금후의 연구 과제를 제안한다.

## II. 스테레오 카메라를 이용한 거리정보의 획득

스테레오 비전에 있어서 주된 관심분야는 좌우 카메라에 의해 얻어진 화상사이에서 대응점의 2차원적인 위치를 구하고 삼각측량법에 의해 시각 시스템으로부터 물체가 지의 거리 또는 깊이 정보 (Depth Information)를 획득하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 스테레오 카메라로 구성된 시각 시스템을 기하학적으로 모델링하면 그림 2.1과 같다.

그림 2.1에서 카메라 중심사이의 거리(Baseline Length)는  $b$ 이고, 광축(Optical Axis)은 2대의 카메라 렌즈의 중심을 연결하는 선분인 기선(Baseline)에 대해서 직각이다. 왼쪽 카메라의 광축과 기선과의 교점을 카메라 좌표계  $(x, y, z)$ 의 원점으로 한다. 카메라 중심으로부터 초점거리  $f$ 만큼 떨어진 위치에 광축과 직각으로 만나는 평면이 우 화상평면  $I_L(X_L, Y_L)$ 과 좌 화상평면  $I_R(X_R, Y_R)$ 이 된다.

공간의 임의의 점  $P(x, y, z)$ 을 카메라 좌표계에 투영할 때의 좌 화상 평면과 우 화상 평면에서  $x$ 좌표의 위치 차를 시차(Disparity)  $D$ 라 표시하면, 그림 2.1의 카메라 배치를 다음 식으로 표시할 수 있다.

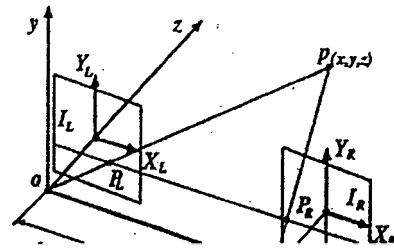


그림 2.1. 스테레오 카메라의 기하학적 구성  
Fig. 2.1. Geometric configuration of stereo camera.

$$\begin{cases} X_L - X_R = D \\ Y_L - Y_R = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

여기서, 식 (2.1)은 한쪽의 화상평면상의 1 점에 대응하는 다른 쪽의 화상평면상의 대응점은 같은 높이의 주사선상에 존재한다는 것을 표시하고 있는데 일반적으로 에피폴라(Epipolar) 조건이라고 한다.

시각 시스템으로부터 기선길이를  $b$ , 카메라 초점 거리를  $f$ 라고 하면 점  $P$ 의 거리  $z$ 는 삼각측량법에 의하여 다음과 같이 유도된다.

$$z = f \frac{b}{X_L - X_R} = f \frac{b}{D} \quad (2.2)$$

기선 길이  $b$ 와 카메라 초점거리  $f$ 를 미리 알고 있으면 양안시차  $D$ 를 구함으로써 점  $P$ 의 거리  $z$ 를 계산할 수 있다.

스테레오 비전은 어떤 의미를 갖는 에너지를 대상물에 조사하지 않는 수동적인 방법이기 때문에 환경에 관계없이 적용하여 광범위한 3 차원 정보를 접촉하지 않고 얻을 수 있을 뿐 아니라 불특정 다수의 시스템이 같은 영역의 거리정보를 동시에 얻으려고 하는 경우에도 간섭 등의 염려 없이 쉽게 거리정보를 획득할 수 있다. 또한, 스테레오 비전은 카메라 2 대만을 이용하므로 기구가 간단하지만 좌우 2 장의 화상사이에서 대응점을 발견한다는 것이 대단히 어려운데 이것을 대응점 문제라고 한다.

종래의 많은 연구에서는 "원활한 구속" 등의 휴어리스틱한 구속조건을 부가하여 가능한 대응을 한정하고 반복 계산에 의해 그 문제를 해결하도록 하고 있지만 가정한 대응점 후보가 많은 채 이 방법을 적용할 경우 반복계산을 행하기 때문에 계산량이 많아져서 실시간에 거리 정보를 획득할 수가 없다<sup>12,6)</sup>. 이 문제를 해결하는 한가지 방법은 기선길이를 짧게 하여 대응점 후보를 줄이는 것이다. 기선길이가 길 경우 좌우 화상사이의 차이는 크게 되기 때문에 대응점 후보가 많이 존재하지만, 기선길이가 짧을 경우 그 화상 사이의 차이는 적으므로 대부분 대응점을 바로 결정할 수 있다.

III. 1 대의 이동 카메라에 의한 거리정보의 획득

보통 스테레오 비전에서는 기선 길이가 길기 때문에 좌우 화상 평면의 대응점이 바로 결정되지 않는 문제가 발생한다. 일반적으로 이러한 대응점 문제를 해결하기 위해 원활함 등의 구속조건을 부여하는 상관법 등을 이용하여 바로 후보점을 한정하지만 후보점이 많은 경우 계산량이 많아져 실시간에 거리 정보를 구할 수 없다. 그러나 기선 길이를 짧게 하면 어떤 곳에서 대응점이 바로 결정된다. 결국 1대의 카메라를 미소로 움직여 이동 전후에 스테레오 비전을 행하면 개략적인 시차정보가 대단히 빨리 얻어진다.

3.1 병진 이동에 의한 방법

그림 3.1에 나타낸 바와 같이 1 대의 카메라가 화상평면과 평행 또는 수평으로 거리  $b$ 만큼 이동한다고 할 때, 2 개의 화상평면은 동일 평면상에 있고 각각은 수평이다. 공간상의 점  $p$ 가 이동전의 화상평면  $I_0$ 에 투영된 점을  $(X_0, Y_0)$ , 이동후의 화상평면  $I_1$ 에 투영된 점을  $(X_1, Y_1)$ , 이동거리를  $b$ , 초점거리를  $f$ 라고 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{cases} X_0 = f \frac{x}{z} \\ X_1 = f \frac{x-b}{z} \end{cases} \quad (3.1)$$

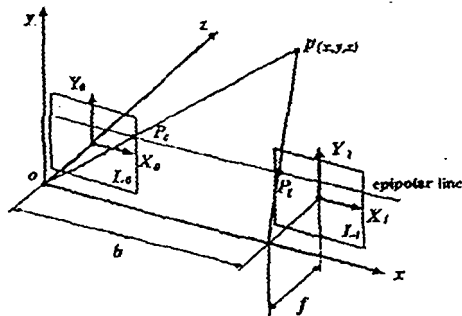


그림 3.1. 카메라의 병진이동  
Fig. 3.1. Lateral movement of camera.

위의 관계로부터 거리  $z$ 는 다음과 같이 유도되며,

$$z = f \frac{b}{X_0 - X_1} = f \frac{b}{D} \quad (3.2)$$

에피폴라 구속은 다음과 같다.

$$Y_1 = Y_0 \quad (3.3)$$

이제 시스템이 측정 가능한 깊이의 최소치를  $z_{min}$  이라고 하면, 식 (3.2)에 의해

$$f \frac{b}{X_0 - X_1} \geq z_{min} \quad (3.4)$$

또, 시차의 정의에 의해 식 (3.5)로 표시되는 관계가 성립한다.

$$D = X_0 - X_1 \geq 0 \quad (3.5)$$

따라서, 식 (3.3), (3.4), (3.5)에 의해 화상평면대  $I_0 - I_1$ 에 있어서 운동시차에 대한 다음과 같은 한정조건을 구할 수 있다.

$$\begin{cases} X_0 - f \frac{b}{z_{min}} \leq X_1 \leq X_0 \\ Y_0 = Y_1 \end{cases} \quad (3.6)$$

이동전의 화상  $I_0$ 의 각 특징점에 대해 그것에 대응하는 에피폴라 라인상에서 식 (3.6)을 만족하는 것과 같은 특징을 갖는 특징점을 이동후의 화상  $I_1$ 으로부터 탐색한다. 탐색범위 내에서 대응이 바로 결정되면 식 (3.2)에 의해 그 점의 거리 정보를 구할 수 있다.

3.2 전진 이동에 의한 방법

그림 3.2에 표시된 것처럼 카메라는 화상평면에 대해 수직으로 이동된다. 2 개의 화상평면은 평행이고, 무한원 점은 화상평면의 원점에 투영된다. 공간상의 점  $p(x, y, z)$ 가 이동전의 화상평면  $I_0$ 에 투영된 점을  $(X_0, Y_0)$ , 이동후의 화상평면  $I_1$ 에 투영된 점을  $(X_1, Y_1)$ , 이동거리를  $b$ 라고 하면 점  $p$ 의 거리  $z$ 는 다음과 같이 유도된다.

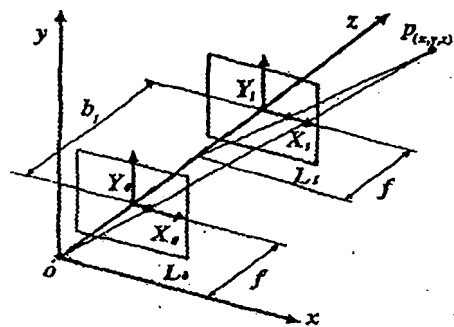


그림 3.2. 카메라의 전진이동  
Fig. 3.2. Forward movement of camera.

$$\begin{cases} X_0 = f \frac{x}{z} \\ X_1 = f \frac{x}{z-b} \\ z = b \frac{X_1}{X_1 - X_0} \end{cases} \quad (3.7)$$

표준 양안 스테레오 비전에 대한 등가 운동 시차로서  $D$ 를 아래와 같이 정의한다. 이것에 의해 기선 길이  $b$ , 초점거리  $f$ , 거리  $z$ 에 대해 양안 스테레오 비전과 똑같이 취급할 수 있으며,

$$\begin{aligned} z &= f \frac{b}{D} \\ D &= f \frac{X_1 - X_0}{X_1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

에피플라 라인은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{X}{Y} = \frac{X_0}{Y_0} = K \quad (3.9)$$

(단,  $K$ 는 각 에피플라 라인 상에서 일정)

그림 3.2에 나타난 좌표계에서 대상물이 존재하는 거리의 최소값을  $z_{min}$ 라 하고 카메라는 대상물을 추월하지 않는다고 하면 다음 식이 성립한다.

$$z > z_{min} > b > 0 \quad (3.10)$$

한편,  $x > 0 (0 < X_0 < X_1)$ 와  $x < 0 (X_1 < X_0 < 0)$ , 그리고 식 (3.7), (3.10)에 의해서  $X_1$ 에 대해 각각 정리하면

$$X_1 \leq \frac{1}{1 - \frac{b}{z_{min}}} X_0, \quad X_1 \geq \frac{1}{1 - \frac{b}{z_{min}}} X_0 \quad (3.11)$$

즉  $(X_1, Y_1)$ 의 탐색범위는

$$\begin{cases} X_0 \leq X_1 \leq \frac{1}{1 - \frac{b}{z_{min}}} X_0 \\ X_0 Y = X_1 Y_0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{1 - \frac{b}{z_{min}}} X_0 \leq X_1 \leq X_0 \\ X_0 Y_1 = X_1 Y_0 \end{cases} \quad (3.13)$$

이동전에 화상의 각 특징점에 대응하는 방사상의 에피플라 라인 상에서 식 (3.12)와 (3.13)을 만족시키는 동일한 특징을 갖는 특징점을 이동후의 화상으로부터 탐색한다. 아주 미소하게 이동한다면 후보는 바로 결정되므로 개략적인 시차 정보를 고속으로 결정할 수 있다.

공통의 이점으로서 어떤 구속조건을 부가하지 않고도 거리정보를 고속으로 얻을 수 있다. 병진이동에서 특정화상에 수평 예지가 존재할 경우, 이동거리를 0으로 하지 않으면 대응점 문제를 회피할 수 없다. 만약 수평 예지(에피플라 라인 방향의 예지)가 특징점으로서 포함되어 있으면 그것들을 전부 처리대상에서 제거해야 한다. 결국, 병진이동에서는 수평성분의 정보를 얻을 수 없고

전진 이동에서는 원점을 중심으로 하는 방사선 방향의 정보를 얻을 수 없다.

거리정보의 精度는 식 (3.2)와 (3.8)로부터 알 수 있듯이 이동거리  $b$ 가 큰 만큼 높아지므로 미소 이동에 의해 얻어진 거리정보는 상당히 개략적인 것이다.

식 (3.2)를 미분하면

$$\frac{dz}{z} = -\frac{dD}{D} \quad (3.14)$$

$$z > 0, D \leq 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{|dz|}{z} = \frac{|dD|}{D} \quad (3.16)$$

식 (3.4)에 의해, 임의의 공간상의 점  $p$ 의 시차  $D$ 는 이동거리  $b$ 가 작아지면 그것에 비례하여 작아진다. 즉

$\frac{|dD|}{D}$ 는 보다 크게 된다. 그런데 식 (3.16)으로부터

$\frac{|dD|}{D}$ 가 커지면  $\frac{|dz|}{z}$ 도 커지고, 이동거리  $b$ 가 작아지면 거리 측정 精度는 낮아진다.

#### IV. 이동하는 스테레오 카메라에 의한 거리정보의 획득

스테레오 카메라를 대응점 문제가 발생하지 않을 거리만큼 이동시키고 단안 스테레오 비전에 의해 개략적인 거리 정보를 얻을 수 있으며, 그 알고리즘의 flowchart는 그림 4.1과 같다. 이렇게 얻은 단안의 개략적인 거리 정보를 사용함으로써 양안 스테레오 비전일 경우에, 시차의 탐색범위를 한정할 수 있다. 미리 좌우 화상사이의 대응점 후보를 한정하기 때문에 한정하지 않을 때에 비해 대응점이 명확히 작아지므로 고속으로 양안 스테레오 비전을 행할 수 있다. 또, 기선길이가 길기 때문에 이미 얻어진 운동시차에 비해 아주 상세한 거리 정보를 얻을 수 있다.

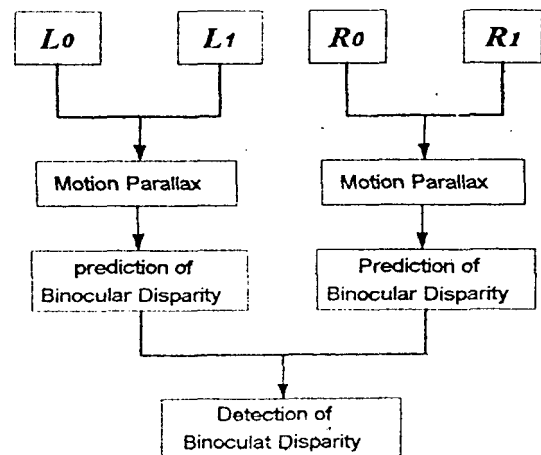


그림 4.1. 알고리즘의 개요  
Fig. 4.1. Outline of the algorithm.

4.1 운동시차와 양안 시차의 기하학적 관계

그림 4.2와 그림 4.3에 나타난 것처럼 좌우 카메라의 광축이 서로 평행이고, 각각 기선과 직교하고 있는 표준 배치의 스테레오 카메라가 그 상대적인 위치 관계를 유지한 채 기선을 따라 오른쪽으로 병진이동하는 경우를 고찰한다. 좌 카메라에서 이동전의 화상평면을  $L_0$ , 이동 후의 화상 평면을  $L_1$ 이라고 한다. 우 카메라에서 이동하기 전의 화상평면을  $R_0$ , 이동후의 화상평면을  $R_1$ 이라고 한다. 좌우사이의 기선길이를  $b$ , 스테레오 카메라의 병진 거리나 전진거리를  $b_1$ 이라고 한다. 또한 공간속의 임의의 점을  $p$ 라 하고  $p$ 의  $L_0$ 로의 투영점을  $(X_0, Y_0)$ ,  $L_1$ 으로의 투영점을  $(X_1, Y_1)$ ,  $R_0$ 로의 투영점을  $(X_R, Y_R)$ 이라고 한다.

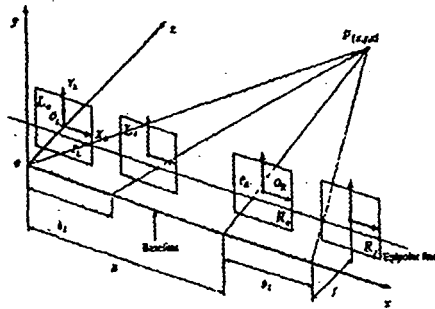


그림 4.2. 스테레오 카메라의 병진이동과 기하학적 구성  
Fig. 4.2. Lateral movement and geometric configuration of stereo camera.

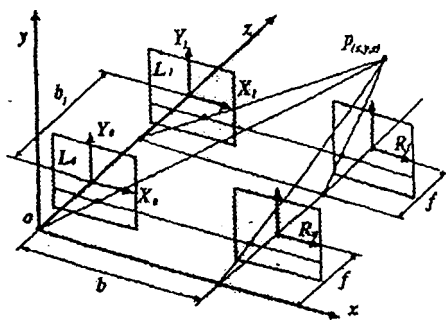


그림 4.3. 스테레오 카메라의 전진이동과 기하학적 구성  
Fig. 4.3. Forward movement and geometric configuration of stereo camera.

이제,  $L_0$ 와  $L_1$ 를 이용한 스테레오 비전을 고찰하면 (그림 4.2와 그림 4.3 참조) 점  $p$ 의 거리  $z$ 는 3각 측량법에 의해 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$z(\text{병진}) = f \frac{b_1}{D_s}, z(\text{전진}) = f \frac{b_1}{D_f} \tag{4.1}$$

여기서  $f$ 는 카메라의 등가초점거리,  $D_s$ 는 점  $p$ 의 병진 운동시차,  $D_f$ 는 점  $p$ 의 전진 운동시차를 나타내고 있다.

다음에  $L_0$ 와  $R_0$ 를 이용한 스테레오 비전을 고찰하면 점  $p$ 의 거리  $z$ 는 마찬가지로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$z(\text{병진 및 전진}) = f \frac{b}{D} \tag{4.2}$$

여기서  $D$ 는 점  $p$ 의 양안시차를 나타내고 있다. 따라서 식 (4.1), (4.2)를 연립시킴으로써 공간 중의 점  $p$ 의 양안시차  $D$ 는 병진 운동 시차  $D_s$ 와 전진 운동 시차  $D_f$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(\text{병진}) = \frac{b}{b_1} D_s, D(\text{전진}) = \frac{b}{b_1} D_f \tag{4.3}$$

윗 식은 양안시차가 이동거리에 대한 기선길이의 비율 검출된 운동시차에 곱함으로써 얻어진다는 것을 나타내고 있다.

4.2 운동시차에 기초한 양안시차 후보의 한정

4.2.1 병진이동의 경우

실제로 검출된 운동시차나 양안시차에 특징점의 양자화 오차에 의한 애러가 포함되어 있고 식 (4.3)은 엄밀히는 성립하지 않으므로, 이것들의 오차를 고려하여 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\frac{b}{b_1} D_s - \Delta \leq D \leq \frac{b}{b_1} D_s + \Delta \tag{4.4}$$

여기서,  $\Delta$ 는 운동시차  $D_s$ 에 의한 양안 시차  $D$ 의 예측 오차를 나타내고 있다. 이제

$$F(D, D_s) = D - \frac{b}{b_1} D_s \tag{4.5}$$

로 하면 (이동 오차는 시차 오차에 비해 충분히 작으므로 무시했다.)  $\Delta$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta = \left| \frac{\partial F}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial F}{\partial D_s} \right| \Delta D_s \tag{4.6}$$

여기서

$$\Delta D = \left| \frac{\partial D}{\partial X_0} \right| \Delta X_0 + \left| \frac{\partial D}{\partial X_1} \right| \Delta X_1 \tag{4.7}$$

$$= \Delta X_0 + \Delta X_1 \leq D_{\max}$$

$\Delta D_{\max}$  : 시차 검출 오차

이며,  $\Delta D_s$ 에 대해서는 식 (4.3)에 의해

$$\begin{aligned} \Delta D_s &= \left| \frac{\partial D_s}{\partial X_0} \right| \Delta X_0 + \left| \frac{\partial D_s}{\partial X_1} \right| \Delta X_1 \\ &= \frac{b}{b_1} \Delta X_0 + \frac{b}{b_1} \Delta X_1 \\ &\leq \frac{b}{b_1} (\Delta X_0 + \Delta X_1) \\ &\leq \frac{b}{b_1} \Delta D_{\max} \end{aligned} \tag{4.8}$$

따라서, 양안 시차의 예측 오차  $\Delta$ 는

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta D + \frac{b}{b_1} \Delta D_f \\ &\leq \Delta_{\max} = \left(1 + \frac{b}{b_1}\right) \Delta D_{\max} \end{aligned} \quad (4.9)$$

과 같이 어떤 값  $\Delta_{\max}$  (=0)이하로 줄일 수 있다. 그러므로 운동시차  $D_f$ 를 이용하면 점  $p$ 의  $L_0$ 로의 투영점의 양안시차의 탐색범위는 다음과 같이 한정할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_0 - \frac{b}{b_1} D_f(X_0, Y_0) - \Delta_{\max} &\leq X_R \\ X_R &\leq X_0 + \frac{b}{b_1} D_f(X_0, Y_0) + \Delta_{\max} \\ &\quad , Y_R = Y_0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\Delta_{\max} = \left(1 + \frac{b}{b_1}\right) \Delta D_{\max}$$

상기의 범위에 존재하는 특징점 중 검출된 운동시차가 유사한 점은 양안시차 후보로서 선택된다. 즉

$$\begin{cases} D_f(X_0, Y_0) - \Delta D_{\max} \leq D_f(X_R, Y_R) \\ D_f(X_R, Y_R) \leq D_f(X_0, Y_0) + \Delta D_{\max} \end{cases} \quad (4.11)$$

를 만족할 만족시키는 특징점  $(X_R, Y_R)$ 이 점  $(X_0, Y_0)$ 의 양안 시차 후보로서 선택된다.

#### 4.2.2 전진이동의 경우

병진이동의 경우와 마찬가지로 실제로는 검출된 운동시차나 양안시차에는 오차가 포함되어 있고 식 (4.3)은 엄밀히 성립하지 않는다. 그래서 이들 오차를 고려하여 다음과 같이 바꿔 쓴다.

$$\frac{b}{b_1} D_f - \Delta \leq D \leq \frac{b}{b_1} D_f + \Delta \quad (4.12)$$

여기서  $\Delta$ 는 등가 운동시차  $D_f$ 에 의한 양안시차  $D$ 의 예측오차를 나타내고 있다. 이제  $\Delta$ 를 구하기 위해

$$F(D, D_f) = D - \frac{b}{b_1} D_f \quad (4.13)$$

이라고 쓴다(이동오차는 시차오차에 비해 충분히 작으므로 무시했다).  $\Delta$ 는

$$\Delta = \left| \frac{\partial F}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial F}{\partial D_f} \right| \Delta D_f \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta D &= \left| \frac{\partial D}{\partial X_0} \right| \Delta X_0 + \left| \frac{\partial D}{\partial X_R} \right| \Delta X_R \\ &= \Delta X_0 + \Delta X_R \leq D_{\max} \end{aligned} \quad (4.15)$$

와 같으며, 식 (3.8)에 의해  $\Delta D_f$ 는

$$\begin{aligned} \Delta D_f &= \left| \frac{\partial D_f}{\partial X_0} \right| \Delta X_0 + \left| \frac{\partial D_f}{\partial X_1} \right| \Delta X_1 \\ &= \frac{f}{|x_1|} \Delta X_0 + \frac{f}{X_1^2} |X_1| \Delta X_1 \\ &= \frac{f}{X_1^2} [|X_1| \Delta X_0 + |X_0| \Delta X_1] \\ &\leq \frac{f}{X_1^2} |X_1| (\Delta X_0 + \Delta X_1) \\ &\leq \frac{f}{|X_1|} \Delta D_{\max} \end{aligned} \quad (4.16)$$

와 같다. 여기서,  $\Delta$ 는

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta D + \frac{b}{b_1} \Delta D_f \\ &\leq \Delta D_{\max} + \frac{b}{b_1} \left[ \frac{f}{|X_1|} \Delta D_{\max} \right] \\ &= \Delta_{\max} \\ &= \left[ 1 + \frac{b}{b_1} \frac{f}{|X_1|} \right] \Delta D_{\max} \end{aligned} \quad (4.17)$$

에 의해 등가운동시차  $D_f$ 에 의한 양안시차 후보의 한정조건은

$$\begin{aligned} X_0 - \frac{b}{b_1} D_f(X_0, Y_0) - \Delta_{\max} &\leq X_R \\ X_R &\leq X_0 + \frac{b}{b_1} D_f(X_0, Y_0) + \Delta_{\max} \\ &\quad , Y_R = Y_0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\Delta_{\max} = \left[ 1 + \frac{b}{b_1} \frac{f}{|X_1|} \right] \Delta D_{\max}$$

상기의 범위에 존재하는 특징점 중 검출된 등가운동시차가 유사한 점이 양안 시차 후보로서 선택된다. 즉,

$$\begin{cases} D_f(X_0, Y_0) - \frac{f}{|X_0|} \Delta D_{\max} \leq D_f(X_R, Y_R) \\ D_f(X_R, Y_R) \leq D_f(X_0, Y_0) + \frac{f}{|X_0|} \Delta D_{\max} \end{cases} \quad (4.19)$$

를 만족시키는 특징점  $(X_R, Y_R)$ 이 점  $(X_0, Y_0)$ 의 양안시차 후보로서 선택된다. 본 연구에서는 이와 같이 한정된 양안시차 후보에 대해서 종래의 수동적인 스테레오 알고리즘을 이용하여 양안시차를 검출한다(4.5).

#### 4.3 이점과 문제점

병진 이동의 경우 기하학적 조건이 표준 스테레오 비전과 동일하므로 이동에 의한 단안의 운동시차를 변환하지 않고 그대로 양안시차의 탐색범위를 한정할 수 있지만, 전진이동의 경우 기하학적 조건이 표준 스테레오 비전과 다르기 때문에 이동에 의한 단안 운동시차를 직접 양안시차의 탐색범위 한정에 이용할 수 없으므로 병진이동 쪽의 알고리즘이 간단하다.

운동시차의 검출오차는 병진이동에서는 식 (4.8)에 의해

$$\Delta D \leq \Delta D_{\max} \quad (4.20)$$

전진이동에서는 식 (4.16)에 의해

$$\Delta D_i \leq \frac{f}{|X_i|} \Delta D_{\max} \quad (4.21)$$

으로 나타낼 수 있다. 병진이동을 할 때 운동시차의 검출 오차는 화상에서 특징점의 위치에 관계없이 어떤 일정한 값  $\Delta D_{\max}$ 로 줄일 수 있지만 전진이동의 경우에는 그 오차가 식 (4.21)에 의해 화상에서의 위치에 따라 크게 다르고 특히 화상중심 부근 오차는 크게 됨을 알 수 있다. 즉, 전진이동에서는 화상중심 부근에 있어서 대응점 후보의 한정이 충분하지 않다는 결점이 있다.

한편, 스테레오 비전과 에피폴라 라인 방향이 동일한 병진이동에서는 수평성분을 원리적으로 검출할 수 없지만 스테레오 비전의 기선과 다른 방향으로 이동되는 전진이동이라면 에피폴라 라인은 스테레오 비전과 달리 모든 방향의 성분을 검출하는 것이 가능하다.

## V. 실험 및 고찰

본 장에서는 제안한 방법을 실험 환경에 대해 적용한 실험결과에 대해 기술하고 그 유효성을 검증하고 고찰한다.

### 5.1 시스템의 구성

본 연구에서 사용하는 스테레오 비전 시스템의 외관을 그림 5.1에 나타낸다. 이 시스템은 인간의 시각계를 참고한 것으로 표시한 것처럼 그 본체는 2대의 CCD카메라와 4개의 DC 서보모터로 구성되어 있고 인간과 같이 양안 카메라의 폭주각 및 전체의 시선 (Tilt 각 및 Pan 각)을 제어할 수 있다. 또, 시스템 전체의 직선이동이 가능한 슬라이드 이동기구도 장비되어 있고, 전체의 이동도 고정도로 제어할 수 있다.

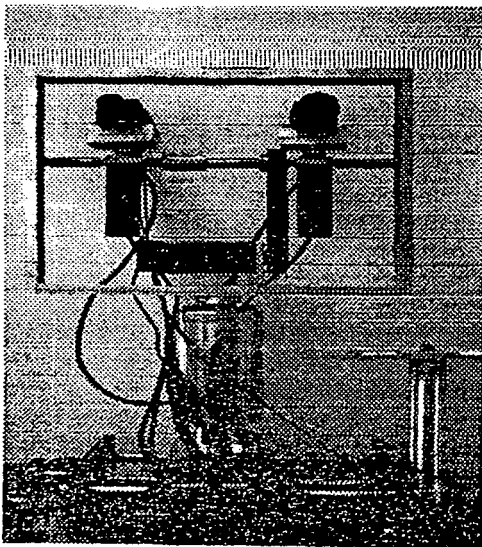


그림 5.1. 이동하는 스테레오 시스템의 구성  
Fig. 5.1. Configuration of moving stereo system.

2 대의 카메라에 의해 촬영된 화상은 화상처리장치 MEC(OS-9168020 VME System)의 frame buffer가 내장된 Sun SPARC station 1 상에서 동작하는 C언어를 이용한 프로그램에 따라 직접 액세스하여 처리된다. 여기서, 촬영된 화상은  $256 \times 384$  화소의 분해능으로 각 점 8(bit)의 농도값을 갖는다.

시스템의 주된 파라미터는 표 5.1에 나타냈다. 표 5.1에  $\delta b_{\max}$ 는 시스템의 이동거리 제측 오차의 최대값을,  $z_{\min}$ 은 시스템이 측정가능한 길이(깊이)의 최소값을 나타내고 있다. 또 이미 기술한 것처럼 본 연구에서는 표준 카메라 배치의 스테레오 카메라 시스템을 고려하고, 시스템을 2 대의 카메라의 상대적인 위치 관계를 유지한 채 기선에 따라 병진이동하는 경우와 기선에 대해 수직 방향으로 전진이동하는 경우를 상정하고 있다. 그러므로, 어떤 절대좌표계로 표현한 3차원 위치를 이미 알고 있는 Test pattern을 이용하여 2대의 카메라 파라미터의 캘리브레이션 한 다음 산출된 각 파라미터를 이용하여 위에서 설명한 것처럼 카메라를 표준배치하고 고정된 채로 모든 실험을 한다.

표 5.1. 시스템 구성의 파라미터

Table 5.1. Parameter of system configuration.

Focal length : $f$	16[mm]
Baseline length : $B$	120[mm]
$\delta b_{\max}$	0.001[mm]
$z_{\min}$	1200[mm]
Image size	$256 \times 384$ [pixel], 8[bit]
Host computer	Sun SPARC Station

### 5.2 특징추출(전처리)

여기서는 대응시켜 원래의 특징점을 화상으로부터 추출하는 방법에 대해서 기술한다(3). 카메라가 평행이동하는 경우 표준편차 2.0[pixel]의 Gauss 함수의 라플라시안  $\nabla^2 G$ 를 컨볼루션 연산을 한 화상으로부터 수평방향 이외의 방향을 갖는 Zero 교차점을 부호와 함께 구하여 특징화상이라고 했다. 카메라가 전진 이동하는 경우 원화상을 화상중심 주위의 극좌표계로 변환한다. 변환된 화상에 대해 표준편차 2.0[pixel]의 Gauss 함수의 라플라시안  $\nabla^2 G$ 를 컨볼루션연산을 하고 수평방향 이외의 방향을 갖는 zero 교차점을 부호와 함께 구하여 특징화상이라고 했다.

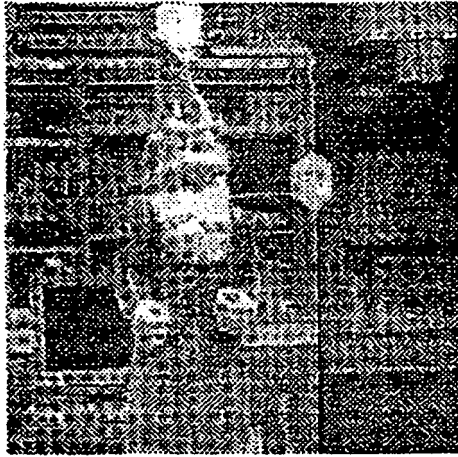
### 5.3 실험결과

#### 5.3.1 병진이동의 경우

병진이동의 경우 실험 장면을 그림 5.2에 나타내었는데, 그림 5.2에 바로 앞의 인형은 시스템으로부터 대략 1.2[m], 선반은 약 5[m]의 거리에 배치하고 병진 이동거리를 5[mm]로 한다.

그림 5.2의 원화상  $L_0, R_0$ 로부터 특징 추출을 위한 전처리 과정을 이용하여 만들어진 특징화상을 그림 5.3에

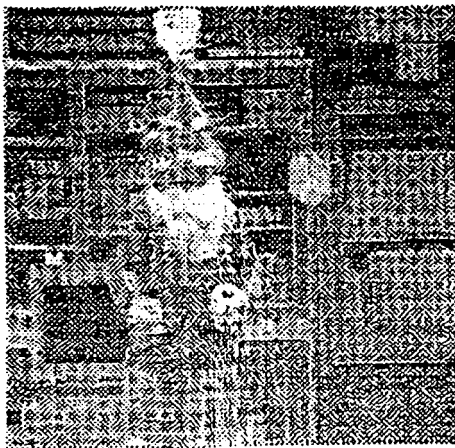
나타내었으며, 좌로부터 우로 주사할 때 그 부호가 정에서 부로 변화하는 zero 교차점을 1(밝은부분)로, 그 역을 0(어두운부분)으로 표시하고 있다



$L_0$



$R_0$

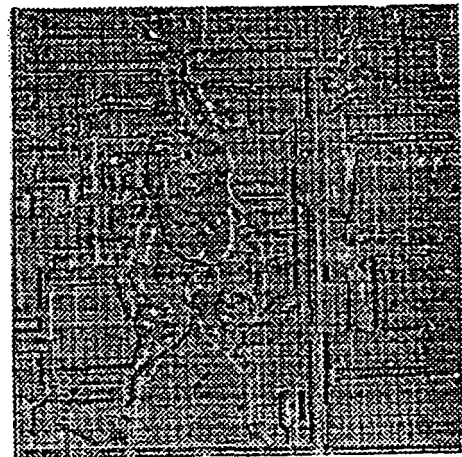


$L_1$

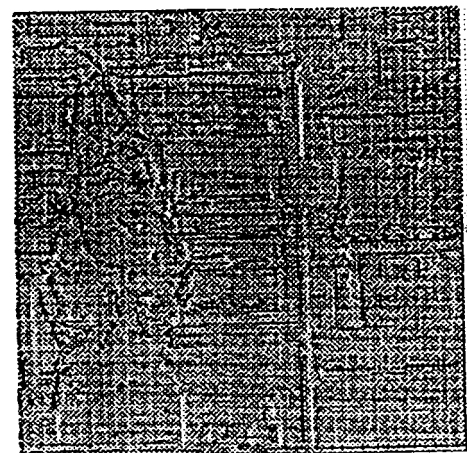


$R_1$

그림 5.2. 병진이동에서의 스테레오 화상  
Fig. 5.2. Stereo image in lateral movement.



$L_0$



$R_0$

그림 5.3. 병진이동에서의 특징화상  
Fig. 5.3 Feature image in lateral movement.



표 5.2에 좌우의 카메라에 의해 얻어진 운동 시차와 양안시차에 관한 대응점 후보수, 초기 융합률, 최종융합률, 계산 시간을 나타내었는데, 초기 융합률이란 아무 것도 하지 않아도 대응점이 바로 결정되는 비율이다. 표 5.3은 같은 실험 장면에 대해 이동시키는 것 없이 종래의 방법에 의해 거리정보를 얻은 결과이다. 운동시차는 대응점이 거의 바로 결정되어 있다는 것을 알 수 있다.

계산시간에 있어서 제안한 방법은 종래의 방법과 비교하여 현저히 개선된 것을 초기 융합률의 차이로부터 설명할 수 있는데, 제안한 방법에서는 운동시차에 의해 대응점 후보를 한정하고 있기 때문에 초기 융합률이 높다. 이것은 가정한 대응점 후보가 적다는 것을 의미하고 있고 이후에 이완법 등을 이용하여 더욱 시차 후보를 한정할 때에 적은 시간으로 거리 정보를 얻을 수 있다. 최종 융합률로 의미를 갖는 차는 없었으며, 본 방법에 의해 거리 정보를 고속으로 획득할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

표 5.2. 병진이동에 의한 양안 시차의 검출  
Table 5.2. Detection of binocular disparity with lateral movement.

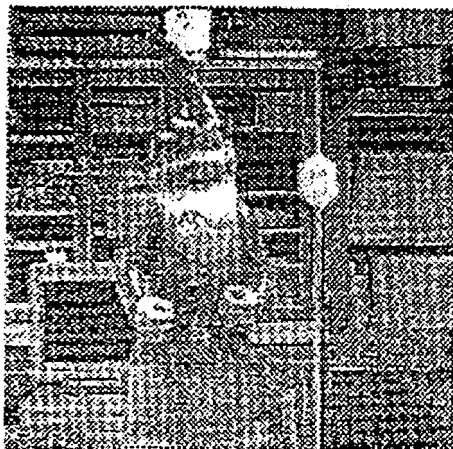
	Candidate No.	One shot Rate(%)	Fusion Rate(%)	Time(sec)
$L_0 - L_1$	1.02	99.7	99.7	3.63
$R_0 - R_1$	1.02	99.4	99.4	3.60
$L - R$	1.77	55.5	82.6	38.80

표 5.3. 병진이동이 없는 경우의 양안시차 검출  
Table 5.3. Detection of binocular disparity without lateral movement.

	Candidate No.	One shot Rate(%)	Fusion Rate(%)	Time(sec)
$L - R$	2.26	35.6	76.0	133.72

5.3.2 전진이동의 경우

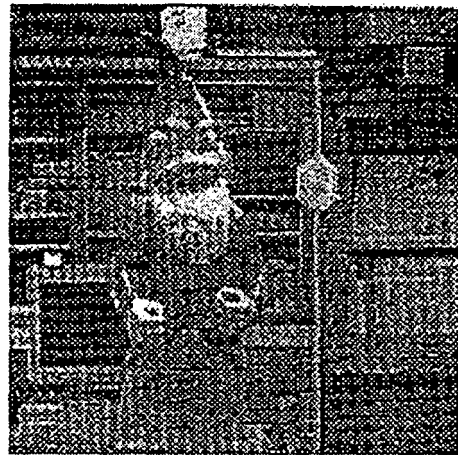
그림 5.4의 실험 장면에서 바로 앞의 인형은 시스템으로부터 약 1.2[m], 선반 약 5[m]의 거리에 배치하고, 또 전진이동거리는 100[mm]로 한다.



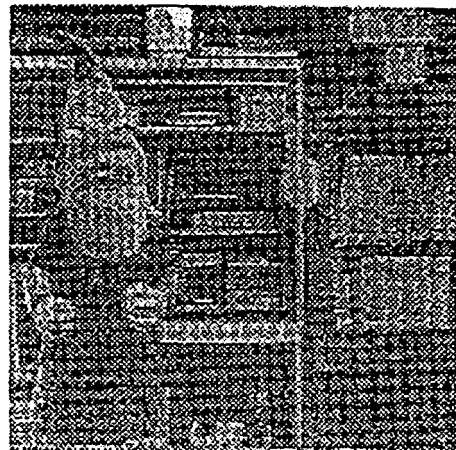
$L_0$



$R_0$

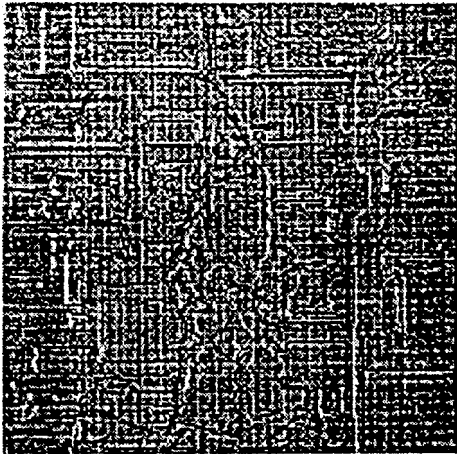


$L_1$

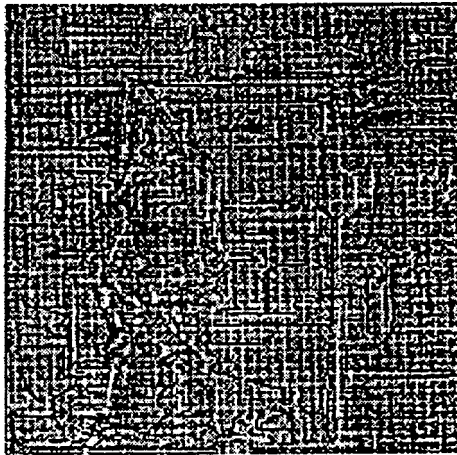


$R_1$

그림 5.4 전진이동에서의 스테레오 화상  
Fig. 5.4. Stereo image in forward movement.



$L_0$



$R_0$

그림 5.5. 전진이동에서의 특징화상  
Fig. 5.5. Feature image in forward movement.

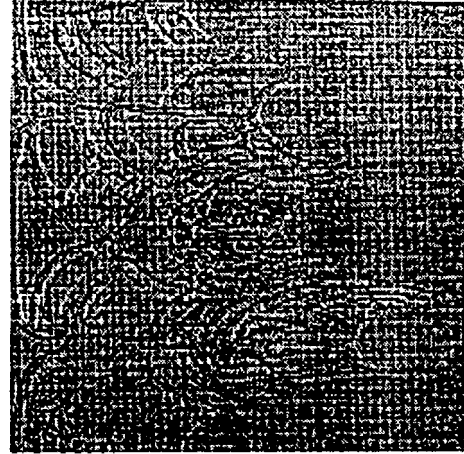
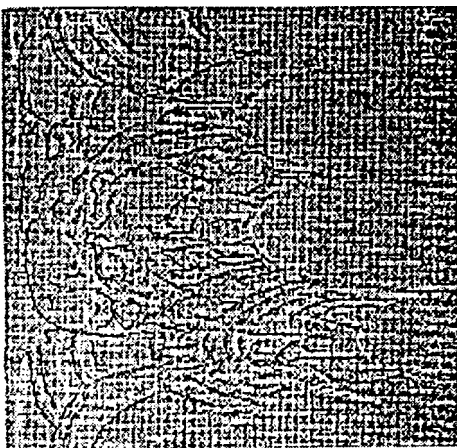


그림 5.6. 극좌표계로 변환된 특징화상  
Fig. 5.6. Feature image converted into the polar coordinate system.

원화상의  $L_0$ ,  $R_0$ 로부터 특징 추출을 위한 전처리 과정을 이용하여 만들어진 특징화상을 그림 5.5에 나타내고, 극좌표계로 변환된 특징 화상을 그림 5.6에 나타낸다.

제안한 방법에 의해 얻은 양안시차 화상에서 인형 오른쪽에 잘못된 거리정보가 존재한다. 이 영역은 화상중심 부근에 해당한다. 화상 중심 부근에서는 전진 이동에 의한 운동시차로부터 유효한 시차 정보를 얻을 수 없다. 또, 좌우 스테레오 비전에 있어서 인형의 겨드랑이는 폐색(Occlusion) 영역으로 시차를 검출할 수 없다. 따라서 화상중심과 폐색 영역이 일치하면 바른 거리정보를 획득할 수 없다는 것을 나타내고 있다.

표 5.4에 좌우 카메라에 의해 얻어진 운동시차와 양안시차에 관한 대응점 후보 수, 초기 융합률, 최종융합률, 계산시간을 나타낸다. 표 5.5는 같은 실험 장면에 대해 이동시키지 않고, 종래의 방법에 의해 거리정보를 얻은 결과이다. 운동시차는 대응점이 거의 바로 결정되어 있다는 것을 알 수 있다. 계산 시간에 있어서 제안된 방법이 종래의 방법과 비교하여 현저하게 개선된 것은 병진이동의 경우와 마찬가지로 초기 융합률이 높기 때문이다. 계산시간의 개선은 병진이동과 마찬가지로 운동시차의 정보가 유효하게 움직인다고 생각된다.

표 5.4. 전진이동에 의한 양안시차의 검출  
Table 5.4. Detection of binocular disparity with forward movement.

	Candidate No.	One shot Rate(%)	Fusion Rate(%)	Time(sec)
$L_0 - L_1$	1.35	83.9	89.1	6.10
$R_0 - R_1$	1.33	86.4	87.0	7.38
$L - R$	2.25	47.7	75.1	36.50

표 5.5. 전진이동이 없는 경우의 양안시차의 검출  
Table 5.5. Detection of binocular disparity without forward movement.

	Candidate No.	One shot Rate(%)	Fusion Rate(%)	Time(sec)
$L - R$	2.48	33.5	77.9	153.68

VI. 결 론

본 연구에서는 스테레오 카메라를 대응점 문제가 발생하지 않을 정도의 거리만큼 이동시킴으로써 양안시차를 고속으로 검출하는 방법을 제안했다. 그리고 실제로 스테레오 카메라를 병진이동 및 전진이동시켜 제안한 방법이 실 환경에 있어서 고속으로 거리정보를 획득할 수 있다는 것을 확인했다. 병진이동에서는 종래의 방법과 비교하여 신뢰성이 높은 거리 정보를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

전진이동에 있어서는 모든 방향의 에지를 검출할 수 있기 때문에, 스테레오 비전의 구조적인 문제점을 2대의 카메라만으로 해결할 수 있다는 것을 나타낸다. 그러나 화상중심 부근에서는 유효한 운동시차를 얻을 수 없고 특히 양안시차의 폐쇄 영역과 겹친 경우 바른 거리정보를 획득할 수 없는 영역이 남았다. 이 문제를 해결하는데는 화상중심 부근을 회피하고 운동시차를 획득하는 방법이 있다.

본 논문에서는 간략화를 위해, 전진이동이라 했지만 직선운동에 있어서 무한원점을 알면 그대로 이 방법을 적용할 수 있을 뿐 아니라 화상중심 부근의 문제를 회피할 수 있다. 또 자동차나 비행기 등의 자율적인 이동을 상정할 경우, 전진이동은 어떤 부가 장치를 필요로 하지 않는다. 이동물체에 이 스테레오 기구를 부착하면 고속 이동에 필요한 거리정보를 얻을 수가 있다.

본 연구에서는 환경을 완전히 정적인 것으로 하여 취급했지만 스테레오 비전에 의해 거리정보가 환경의 변화에 비해 충분히 고속으로 얻어지면 동적인 환경에 적용하는 것도 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. A. J. Koive and N. Houshngi, "Real Time vision feedback for servoing of a Robotic manipulator with self-tuning controller," IEEE Trans., Syst., ManCybern, vol. 21, no. 1, pp. 134 -142, 1991
2. Nobuhiro OKADA and Tadashi NAGATA, "A Paris Picking System with a Range Finder and a Camera System," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1410-1415, 1995
3. P. K. Allen et al, "Real-time visual servoing," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp. 851-856, Apr. 1991
4. J. T. Feddema, C. S. George Lee, and O. R. Mitchell, "Weighted Selection of Image Features for Resolved Rate Visual Feedback Control", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, no. 7, pp. 31-47, 1991
5. B. Nelson and P. K. Khosla, "Vision resolvability for visually servoed manipulation," Journ. of Robot. and Syst., vol. 13, no. 2, 1351-1356, 1994
6. N. P. Papanikolopoulos, P. K. Khosla, and T. Kanade, "Visual Tracking of a Moving Target by a Camera Mounter on a Robot," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9, no. 1, pp. 14-35, 1993
7. L. E. Weiss, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman,

"Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback," IEEE Journal of Robotics and Automation, no. 3, pp. 404-417, 1987

8. C. Laugier, A. Ijel, and J. Troccaz, "Combining Vision based Information and Partial Geometric Models in Automatic Grasping," In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 676-682, 1990
9. R. Sharma and S. Hutchinson, "Motion perceptibility of Robot Motion Under Active Camera Control," In Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 162- 167, 1994

▲ 문 음 선(Yong Seon Moon)



1983년 2월 : 조선대학교 전자공학과 (공학사)  
 1985년 2월 : 조선대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1989년 2월 : 조선대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1992년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 전자공학과 부교수

※ 주관심분야 : Vision-based Control

▲ 정 남 체(Nam Chae Jung)



1984년 2월 : 조선대학교 전자공학과 (공학사)  
 1987년 2월 : 조선대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1992년 8월 : 조선대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1996년 3월 ~ 현재 : 초당대학교 정보통신공학과 조교수

※ 주관심분야 : Digital 신호처리, Robotics, 의용전자공학