

레이저 구조광을 이용한 3차원 컴퓨터 시각 형상정보 연속 측정 시스템 개발

Development of the Computer Vision based Continuous 3-D Feature Extraction System via Laser Structured Lighting

임 동혁*	황 현*	최 태현*	송 기수*	김 시찬*
	정회원			정회원
D. H. Im	H. Hwang	T. H. Choi	K. S. Song	S. C. Kim

1. 서론

컴퓨터 시각기술을 이용한 농축산물의 형상정보 측정은 대부분의 경우 2차원 기하학적 정보나 색깔, 조직, 명암 등의 형상정보를 획득하는데 그치고 있는 상태이다. 하지만 농산물의 수확 가공작업, 축·수산물의 가공 공정 등에서는 대상체의 3차원 형상 및 대상체와 작업기 사이의 거리정보 등이 보다 유용할 수 있다.

컴퓨터 시각기술을 이용한 3차원 정보 획득은 카메라 보정 정확도와 밀접한 관계를 갖기 때문에 카메라 보정을 위한 다양한 연구들이 수행되었다. 황(1998) 등은 한 개의 레이저 구조광을 이용하여 정지물체의 3차원 형상정보를 추출하는 연구를 수행하였다. 레이저 구조광으로는 19개의 직선을 생성하는 평행 구조광 형태를 이용하였다.

Tsai(1986)는 영상 인식 파라미터들의 내부적인 요소뿐만 아니라 카메라의 위치나 자세 등 외부적인 요소의 산출에도 효과적인 2단계 기법을 개발하였다. Hung(1988)은 Off-line 단계와 On-line 단계로 나누어 처리하는 2단계 기법을 사용하였는데, Off-line 단계는 카메라, 로봇, 로봇-카메라(혹은 팔과 눈) 등의 관계를 이용하며, On-line 단계에서는 초기치를 계산하는 단계와 재보정 하는 단계로 이루어져 있다.

Heikkila(1997) 등은 종래의 2단계 카메라 보정 방법에 원 형태로 표현되어 발생하는 왜곡을 보정하는 단계와 왜곡된 영상좌표를 바로 잡아주는 2단계를 추가한 4단계 보정 방법을 개발하였다. Kubiak(1997)은 630~680nm의 파장을 갖는 레이저 광원을 원통형 렌즈에 투과시켜 생성되는 선 형태의 구조광을 밀에 투사하여 검출된 선의 형상변이로부터 밀의 3차원 형상정보를 추출하였다.

본 연구에서는 이송되는 농산물의 고속 선별 및 가공 공정에의 활용을 위한 기초연구로

본 연구는 한국과학재단 지원 “농산물비파괴품질 및 안전성평가 기술연구센터”의 연구비 지원에 의한 것임.

* 성균관대학교 생명자원과학부 생물기전공학과

전·후면 부에 두 개의 레이저 구조광을 설치하여 컨베이어로 이송되는 대상체에 대한 3차원 형상정보를 연속 측정하는 시스템을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

본 연구에서 구축한 실험장치는 크게 컴퓨터 영상처리 시스템, 레이저 구조광 발생장치 및 대상물 이송장치의 세 부분으로 구성된다. 컴퓨터 영상처리 시스템은 PULNIX사의 TM-7CN 흑백 CCD 카메라를 이용하여 입력된 2차원 영상정보를 2 MB의 영상메모리를 가진 Matrox사의 Meteor II 프레임 그래픽에 저장하고, 그 정보를 컴퓨터에서 처리하여 컬러 모니터에 화면으로 출력하는 동시에 계산된 3차원 형상정보를 파일로 출력하였다.

레이저 구조광 발생장치로 LASERAIM LTX 2(Emerging Technologies)를 2개 사용하였는데, 635nm 파장의 레이저 구조광을 생성하며 단일 직선광을 생성하는 원통형 헤드를 부착하였다. 또한, 움직이는 대상체의 영상을 획득하기 위하여 속도조절이 가능한 폭 200mm, 길이 1,500mm의 컨베이어 이송장치를 제작하였다.

나. 카메라 보정

본 연구에서는 2차원 영상좌표계를 3차원 기준좌표계로 변환하는데 따른 보정, 레이저 구조광의 형상변이에 따른 높이정보 추출과 관련한 보정, 그리고, 컨베이어의 이송에 따라 발생하는 움푹의 보정을 행하였다.

1) 2차원 영상 좌표의 3차원 기준 좌표계 변환

3차원 기준 좌표계와 2차원 영상 좌표계간의 관계는 식(1)과 같다.

$$C_h = P W_h \text{ ----- (1)}$$

여기서, C_h : 영상 좌표
 P : 변환행렬,
 W_h : 기준 좌표

본 연구에서는 카메라 자체를 하나의 측정장치로 사용하여 같은 평면에 존재하지 않는 기지의 6점에 대한 영상 정보를 가지고 실제의 3차원 공간 좌표를 추출하는 방법을 사용하였다. 3차원 기준 좌표계 상의 점 W_h 는 4×4 선형 좌표변환행렬 $P = [P_{ij}]$ 를 이용하여 소실되는 미지의 z 정보 w 를 무시하고 식(1)을 전개하여 다음 식을 얻는다.

$$K_u = P_{11}x + P_{12}y + P_{13}z + P_{14} \text{ ----- (2)}$$

$$K_v = P_{21}x + P_{22}y + P_{23}z + P_{24} \text{ ----- (3)}$$

$$K = P_{41}x + P_{42}y + P_{43}z + P_{44} \text{ ----- (4)}$$

그리고, 식(4)를 식(2)와 식(3)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$P_{11}x + P_{12}y + P_{13}z - P_{41}ux - P_{42}uy - P_{43}uz - P_{44}u + C_{14} = 0 \quad \text{----- (5)}$$

$$P_{21}x + P_{22}y + P_{23}z - P_{41}vx - P_{42}vy - P_{43}vz - P_{44}v + C_{24} = 0 \quad \text{----- (6)}$$

3차원 공간상의 한 점과 이에 대응되는 영상좌표로부터 식(5)와 식(6)을 얻을 수 있으므로 6점의 공간좌표와 대응되는 영상좌표로부터 12개의 식을 얻을 수 있다. 이를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ & & & & & & & \vdots & & \\ x_6 & y_6 & z_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_6x_6 & -u_6y_6 & -u_6z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_6 & y_6 & z_6 & -v_6x_6 & -v_6y_6 & -v_6z_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ \vdots \\ P_{43} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_6 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad \text{----- (7)}$$

식(7)을 $AP = B$ 로 두면, A의 의사역행렬을 B와 곱하여 원하는 변환행렬 P를 얻을 수 있다.

$$P = \{ (A^T \times A)^{-1} \times A^T \} \times B \quad \text{----- (8)}$$

식(8)의 결과로부터 얻은 행렬 P의 값을 식 (5), (6)에 대입하여 x와 y를 구한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \quad \text{----- (9)}$$

$$\text{여기서, } R_{11} = P_{11} - P_{41} \times u, \quad R_{12} = P_{12} - P_{42} \times u$$

$$R_{21} = P_{21} - P_{41} \times v, \quad R_{22} = P_{22} - P_{42} \times v$$

$$K_1 = -P_{13} \times z + P_{43} \times u \times z + u - P_{14}$$

$$K_2 = -P_{23} \times z + P_{43} \times v \times z + v - P_{24}$$

2) 레이저 구조광의 형상 변이에 따른 높이정보 추출

그림 1에서 점 O와 P는 y축을 따라서 임의의 물체 바닥 면에 위치한 점이다. 물체가 컨베이어에 존재하지 않을 때는 레이저 구조광이 항상 \overline{OP} 로 투사된다. 그러나, 컨베이어 상에 높이정보 Δz 를 가진 물체가 통과하게 되면 레이저 구조광은 \overline{OP} 에서 $\overline{O'P'}$ 로 Δx 만큼의 형상변이가 일어나게 된다. 따라서, Δz 값이 변할 때 카메라 영상 좌표상의 u축 방향으로 레이저 구조광의 형상 변이량을 측정하였다.

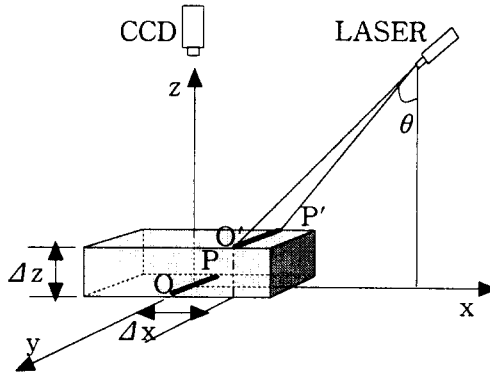


Fig. 1 Line shift of the object surface caused by the light interference.

이러한 상관관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Z_1 = \alpha \times (\Delta u_1)^2 + \beta \times (\Delta u_1) + \gamma \text{ ----- (10)}$$

$$Z_2 = \alpha \times (\Delta u_2)^2 + \beta \times (\Delta u_2) + \gamma \text{ ----- (11)}$$

$$Z_3 = \alpha \times (\Delta u_3)^2 + \beta \times (\Delta u_3) + \gamma \text{ ----- (12)}$$

$$Z_4 = \alpha \times (\Delta u_4)^2 + \beta \times (\Delta u_4) + \gamma \text{ ----- (13)}$$

$$Z_5 = \alpha \times (\Delta u_5)^2 + \beta \times (\Delta u_5) + \gamma \text{ ----- (14)}$$

$$Z_6 = \alpha \times (\Delta u_6)^2 + \beta \times (\Delta u_6) + \gamma \text{ ----- (15)}$$

식(10)~(15)를 행렬식으로 일반화할 때 계수항의 행렬을 M으로 식(16)과 같이 표현할 수 있다.

$$[Z^*] = [\Delta u^*] [M] \text{ ----- (16)}$$

의사역행렬을 이용하여 다음과 같이 M을 구할 수 있다.

$$[M] = [[\Delta u^*]^T [\Delta u^*]]^{-1} [\Delta u^*]^T [Z^*] \text{ ----- (17)}$$

3) 컨베이어 이송에 따른 옴셋

컨베이어가 이동하게 되면 그림 2의 (b)와 같이 물체가 없다면 \overline{OP} 에 투사되어야 할 레이저 구조광이 투사각 θ 로 일정한 투사면을 따라서 물체가 존재하는 윗면으로 이동하게 된다. \overline{OP} 는 아랫쪽 육면체 부위에서는 $\overline{O'Q}$ 로 윗쪽 육면체형태에서는 $\overline{Q'P'}$ 로 이동하게 된다. 카메라 영상은 2차원 형태로 나타나기 때문에 Δx 에 따라 영상좌표값 u 가 다르게 나타난다. 컨베이어는 x 방향으로 움직이므로 실제의 3차원 변환 좌표는 높이는 서로 다르더라도 같은 위치에 투사되는 레이저 구조광을 한쪽으로 일치시켜 주는 옴셋 보정을 실시하여야 한다.

이러한 옴셋은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

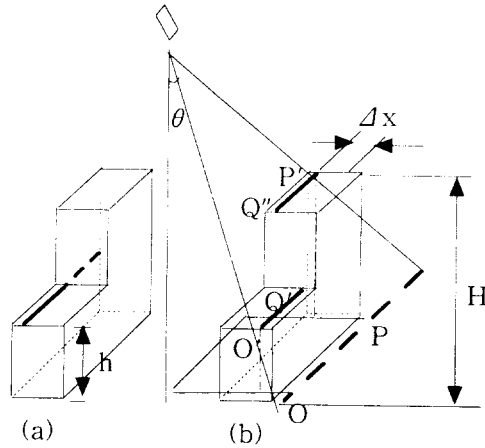


Fig. 2 Calibration of the geometric offset caused by the moving object.

$$\text{Offset} = \frac{h}{\tan \theta}$$

컨베이어 벨트에 설치된 2 세트의 포토 센서간 거리는 450mm이므로, 전체 영상파일의 수를 N 이라 할 때, 몇 개의 파일을 변경할 것인지를 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$n = \frac{\text{Offset} \times N}{450}$$

다. 컨베이어 이송물체의 3차원 형상정보 측정 알고리즘

1) 영상 획득

입력 장치인 CCD 카메라를 이용하여 움직이는 컨베이어 상에서 대상체의 영상을 획득하는 단계로써 포토센서로부터 전달받은 감지신호를 카메라의 동작신호로 사용하였다. 640 × 480 화소영역의 영상을 반복 획득하여 0~255의 화소값을 저장하였다.

2) 이치화

256 가지의 밝기 수준을 2개의 수준으로 변환하는 단계로써, 구분하고자 하는 밝기 수준의 경계값을 기준으로 이 값 보다 크면 백색(255), 작으면 흑색(0)으로 변환하였다.

3) 세선화

본 연구에서 사용한 레이저 구조광은 직선 형태로 투사되나 선의 굵기는 4~8개의 화소 폭을 갖는다. 따라서 선의 굵기를 1화소 단위로 만들어주는 세선화 작업을 수행하였다. 세선화 작업으로 다양한 알고리즘들이 있으나, 본 연구에서는 선의 중심을 연결하는 방법을 적용하였다.

4) 높이정보 추출

Δu 로부터 높이정보 z 값을 산출하는 단계로써, 식(17)에 의거하여 구한 회기방정식을

이용하여 높이정보 z 를 계산하였다.

5) 3차원 형상정보 산출

위에서 산출한 높이정보 z 와 세션화하여 얻은 레이저 구조광의 2차원 영상좌표(u, v)를 식(9)에 대입하여 3차원 기준 좌표계 상의 정보(x, y, z)를 추출하여 저장하였다.

라. 3차원 정보 추출 알고리즘의 검정

카메라 보정 과정을 실시하여 얻은 좌표변환행렬을 적용하여 2개의 레이저 구조광을 임의의 물체에 투사하여 추출한 3차원 정보(x, y, z)와 실측값을 비교함으로써 제안한 3차원 형상정보 측정 알고리즘의 타당성을 검정하였다. 검정을 위하여 제작한 보정 차트를 컨베이어 벨트면에서 100mm 높이까지 20mm 씩 상승시키면서 투사되는 레이저광 상의 임의의 점에 대하여 실시하였는데, 이러한 점들은 ($u=20\sim599, v=60\sim399$) 측정범위 내에 존재한다. 또한, 검정을 위하여 그림 3의 임의의 기하도형을 제작하여 사용하였다.

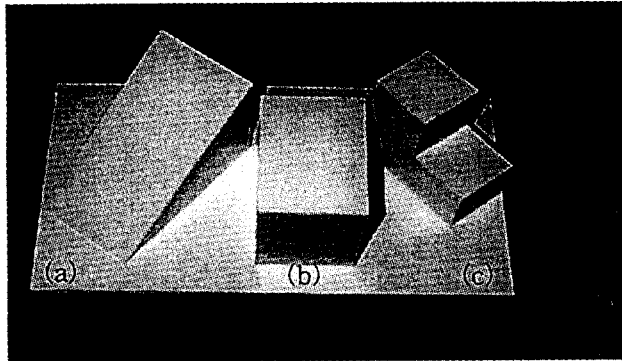


Fig. 3 Samples of 3-D geometric primitives.

3. 결과 및 고찰

가. 3차원 기준 좌표계 변환

6개 샘플점들의 영상좌표와 기준 좌표계 정보로부터 보정한 결과 산출한 좌표변환행렬 P 는 다음과 같았다.

$$P = \begin{bmatrix} -2.2019 & 0.0442 & -0.4310 & 321.4154 \\ 0.0009 & -2.1628 & -0.3150 & 239.7940 \\ 0.0000 & 0.0001 & -0.0013 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

좌표변환행렬 P 를 사용하여 높이정보(z)를 알고 있는 임의의 점의 영상좌표(u, v)를 식(9)에 대입하여 대응하는 기준좌표계 상의 3차원 좌표를 산출하였다.

표1은 보정차트에 표시한 6개 샘플점의 기준 좌표값(x, y, z)과 영상으로 획득하여 얻은

화소값(u, v), 변환행렬을 이용하여 계산한 좌표값(X, Y) 그리고, 오차를 보여준다.

Table 1 Measurement errors of sample points after camera calibration
(x, y, z unit : mm).

Node	Original coord.			Image coord.		Computed coord.		Error		
	x	y	z	u	v	X	Y	\Delta X	\Delta Y	\Delta E
1	25.0	0.0	3	266	240	25.1	-0.1	0.1	0.1	0.1
2	0.0	-50.0	23	320	352	-0.1	-49.9	0.1	0.1	0.1
3	-50.0	25.0	43	438	182	-51.3	25.8	1.3	0.8	1.5
4	-100.0	-75.0	63	559	418	-100.0	-75.0	0.0	0.0	0.0
5	75.0	-25.0	83	134	301	75.1	-25.0	0.1	0.0	0.1
6	100.0	25.0	103	67	177	100.0	25.0	0.0	0.0	0.0

나. 레이저 구조광의 형상 변이에 따른 높이정보 추출

기준선상의 u 좌표 평균값과 높이 증가시 획득한 u 좌표의 평균값 차이를 가지고 식(17)을 이용하여 높이정보를 추출하는 다음과 같은 상관관계식을 얻었다.

$$Z_L = -0.000239502 \times (\Delta u)^2 + 0.473767745 \times (\Delta u) - 0.700788002 \quad \text{---- (18)}$$

$$Z_R = -0.000169293 \times (\Delta u)^2 + 0.443874312 \times (\Delta u) - 0.561520672 \quad \text{---- (19)}$$

표 2는 각 높이별로 보정 차트에 투사된 영상을 이용하여 얻은 u 좌표의 평균값과 그 값을 위의 식에 대입하여 추출한 높이를 나타낸 것이다.

Table 2 Estimated heights of measured from each laser structured light using the correlative equation (Z unit : mm).

No	Z ₀	Left side laser structured light				Right side laser structured light			
		U _L	\Delta U _L	Z _L	E _L	U _R	\Delta U _R	Z _R	E _R
1	0	316.1413	0.0000	-0.7007	-0.7007	320.2742	0.0000	-0.5615	-0.5615
2	3	308.6815	7.4598	2.8201	-0.1799	328.4653	8.1911	3.0629	0.0629
3	23	264.4405	51.7008	23.1532	0.1532	374.3351	54.0609	22.9400	-0.0600
4	43	218.2189	97.9224	43.3952	0.3952	422.2908	102.0166	42.9251	-0.0409
5	63	171.9696	144.1717	62.6250	-0.3750	472.0194	151.7452	62.8960	-0.0140
6	83	120.3684	195.7729	82.8707	-0.1293	525.1218	204.8476	83.2611	0.2611
7	103	65.1136	251.0277	103.1359	0.1359	578.8116	258.5374	102.8808	-0.1192

다. 3차원 형상정보 측정 알고리즘

그림 4는 컨베이어 벨트의 이송속도를 10mm/sec으로 하고 0.7초 간격으로 획득한 오면체(그림 3(a))의 다치영상을 경계값 140을 기준으로 이치화한 것이다.

그림 5는 그림 4를 단일 화소선의 두께로 세션화한 결과로써, 중앙부의 기준면에 투사된 레이저 선을 제거하고 높이정보를 지닌 두 선만을 나타내었다.

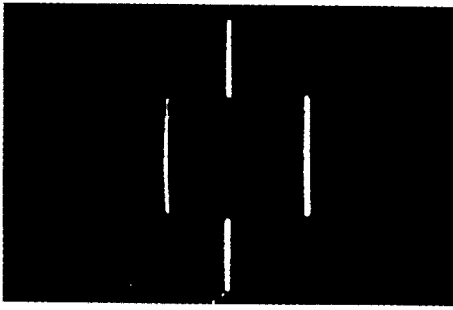


Fig. 4 Image after thresholding of the pentahedron.

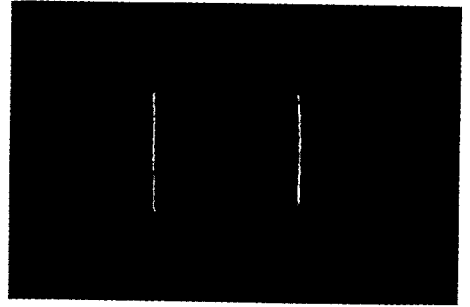


Fig. 5 Image of pentahedron after line thinning from two laser sources.

그림 6은 그림 3(c)에 나타난 계단형태의 기하도형에 대해 투사된 레이저 구조광의 형상변이를 하나의 파일로 합성한 결과이다. 레이저 구조광의 형상변이로부터 추출한 오면체의 높이정보를 MATLAB을 이용하여 그림 7에 재구성하였다.

그림 8은 그림 3(c)의 계단형 3차원 기하도형에 대하여 옴셋을 보정하기 전 원래 영상을, 그림 9는 옴셋을 보정하고 난 후의 형상을 MATLAB을 사용하여 나타낸 것이다.

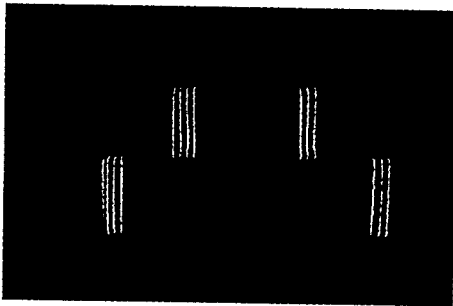


Fig. 6 Image of a stair type geometric primitive after line thinning from two laser sources.

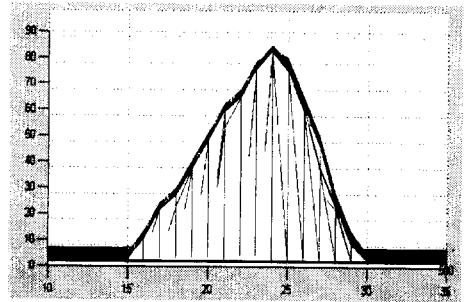


Fig. 7 Front view of the pentahedron image generated using MATLAB.

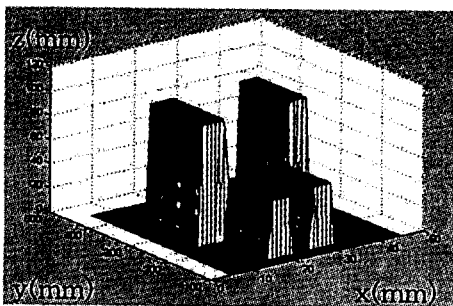


Fig. 8 3-D image of a stair type primitive before calibration.

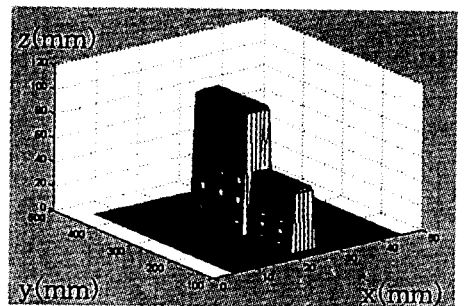


Fig 9 3-D image of a stair type primitive after calibration.

4. 요약 및 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 컨베이어에 설치한 센서를 이용하여 무작위로 이송되는 대상체를 감지한 후 레이저 구조광이 투사되는 영상을 획득하는 3차원 형상정보 측정 시스템을 구축하였다.
- 2) 3차원 공간상의 임의의 6점에 대한 2차원 영상좌표를 3차원 기준 좌표계로 변환하는 카메라 좌표변환행렬을 구하였으며, 이를 이용하여 카메라 보정을 실시하였고, 이 때 오차는 높이 측정범위 103mm 내에서 최대 1.5mm의 오차를 보였다.
- 3) 대상체의 높이변화에 따른 화소 이동량을 측정하고 이를 이용하여 높이를 추출할 수 있는 상관관계식을 획득하였다. 높이 보정 결과 오차는 측정영역 103mm 이내에서 최대 0.4mm의 높이 오차를 보였다.
- 4) 이송되는 대상체의 3차원 형상정보를 연속적으로 추출하는 알고리즘을 개발하였고 응용프로그램을 Microsoft Visual C++를 이용하여 개발하였다. 추출된 3차원 형상정보를 MATLAB을 이용하여 재구축하여 검정을 실시하였다.

본 연구에서 제안한 이송 대상체의 3차원 형상정보 연속 측정 방법은 손쉽고 정확하게 3차원 정보를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있으나 영상획득 간격을 줄이고 획득 영상의 수를 늘리게 되면 3차원 형상은 보다 정밀하게 추출할 수 있으나 상대적으로 연산 및 처리 시간이 길어지는 단점이 있다. 두 개의 레이저 구조광을 사용함으로써 비대칭형의 대상체 및 요철 형상의 인식이 가능하지만 한 개의 레이저 구조광을 사용하는 것보다 2배의 시간이 소요된다.

하지만 획득영상의 개수를 4개 정도로 제한하고 대개의 농산물이 그러하듯이 대상체 표면 형상에 있어 요철과 같은 급격한 형상변이가 없다면, 상대적으로 영상처리과정이 단순하여 고속 등급판정이 가능하다. 예로 본 연구에서 개발한 알고리즘을 적용하여 오이, 호박, 당근 등을 대상으로 크기, 높이, 길이, 굵은 정도 등 대상체의 간단한 외형 특징만을 추출하여 선별한다면 2차원 영상처리 기술에 의거한 선별장치를 능가하는 고속 선별기를 개발할 수 있다. 참고로 그림 11은 컨베이어 벨트의 속도를 6 mm/s로 하고 영상획득 시간을 0.7초 간격으로 당근(그림 10)에 투사하여 얻은 영상을 합성한 것이다.

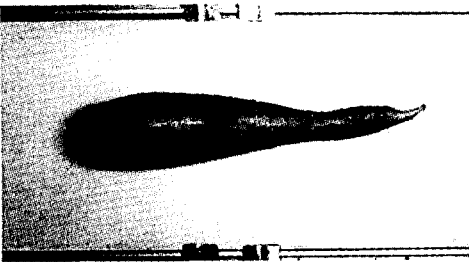


Fig. 10 An original image of carrot.

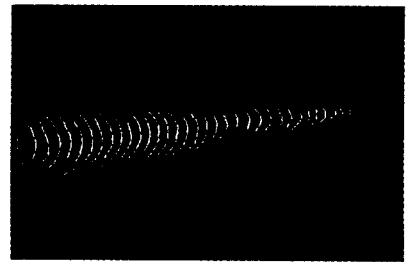


Fig. 11 Structured line image of carrot after thinning.

5. 참고문헌

1. 황헌, 장영창, 임동혁, 1998. 컴퓨터 시각과 레이저 구조광을 이용한 물체의 3차원 정보 추출, 한국농업기계학회지 제23권 제4호, pp.381~390.
2. Roger Y. Tsai, 1986. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision, IEEE, pp.364~374.
3. Yuncai Liu, Thomas S. Huang, 1990. Determination of camera location from 2-d to 3-d line and point correspondences, IEEE Transactions, Vol. 12, NO. 1, January, pp.28~37.
4. Janne Heikkila and Olli Silven, 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, IEEE, pp.1106~1112.
5. Aleksander Kubiak, 1997. Three-dimensional measurement of grain by line projection and computer image analysis, BIO-ROBOTICS '97, pp.101~104.