

소의 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 형상면이로부터 밀의 3차원 형상정보를 추출하였다.

본 연구에서는 이송되는 농산물의 고속 선별 및 가공 공정에서의 활용을 위한 기초연구로 전·후면부에 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 영상 처리 시스템, 대상물 이송장치 및 레이저 구조광 발생장치의 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 출력하는 동시에 계산된 3차원 형상정보를 파일로 출력하였다.

움직이는 대상체의 영상을 획득하기 위하여 구동 모터의 속도조절이 가능한 폭 200mm, 길이 1,500mm의 컨베이어 이송장치를 제작하였고, 중앙부 450mm 범위내에서만 영상을 획득하기 위하여 OMRON사의 BY500 포토센서 2 세트를 컨베이어 이송방향으로 450mm 간격을 두고 설치하였다.

벨트면으로부터 380mm 높이에 45°의 투사각을 갖도록 레이저 구조광 발생 장치 LASERAIM LTX 2

(Emerging Technologies) 2개를 컨베이어 벨트 좌·우측에 설치하였다. 각 발생장치에는 컨베이어 벨트면에 투사되는 선이 일치하도록 단일 평면광을 생성하는 원통형 헤드를 부착하여, 발생하는 레이저광은 635nm 파장을 갖는다.

나. 영상정보 분석 및 보정

본 연구에서는 2차원 영상 좌표계를 3차원 기준 좌표계로 변환하는데 따른 보정, 레이저 구조광의 형상변이에 따른 높이정보 추출과 관련한 보정, 그리고, 연속적으로 획득한 2차원 영상으로부터 3차원 형상곡면 생성시 컨베이어의 이송에 따라 발생하는 움직임의 보정을 행하였다.

(1) 2차원 영상 좌표의 3차원 기준 좌표계 변환

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

$$C_n = PW_n \dots\dots\dots (1)$$

여기서, C_n : 영상 좌표
 P : 변환행렬
 W_n : 기준 좌표

본 연구에서는 카메라 자체를 하나의 측정장치로 사용하여 동일평면에 존재하지 않는 기지의 6점에 대한 영상 좌표를 가지고 실제의 3차원 공간 좌표를 추출하는 방법을 사용하였다. 세부적인 방법은 황(1998)을 참고한다. 3차원 기준 좌표계 상의 점 W_n 는 4×4 선형 좌표변환행렬 $P = [P_{ij}]$ 를 이용하여 소실되는 미지의 z 정보 w를 무시하고 식(1)을 전개하여 다음 식을 얻는다.

$$Ku = P_{11}x + P_{12}y + P_{13}z + P_{14} \dots\dots\dots (2)$$

$$Kv = P_{21}x + P_{22}y + P_{23}z + P_{24} \dots\dots\dots (3)$$

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

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

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

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

3차원 공간상의 한 점과 이에 대응되는 영상 좌표로부터 식(5)와 식(6)을 얻을 수 있으므로 6점의 공간 좌표와 대응되는 영상좌표로부터 12개의 식을 얻을 수 있다. P_{44} 는 1로 둘 수 있으므로 이를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ x_6 & y_6 & z_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_6x_6 & -u_6y_6 & -u_6z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_6 & y_6 & z_6 & -v_6x_6 & -v_6y_6 & -v_6z_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ \vdots \\ P_{42} \\ P_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_6 \\ v_6 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

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

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

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

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

여기서, $R_{11} = P_{11} - P_{41} \times u$, $R_{12} = P_{12} - P_{42} \times u$
 $R_{21} = P_{21} - P_{41} \times v$, $R_{22} = P_{22} - P_{42} \times v$
 $K_1 = -P_{13} \times z + P_{43} \times u \times z + u - P_{14}$
 $K_2 = -P_{23} \times z + P_{43} \times v \times z + v - P_{24}$

(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

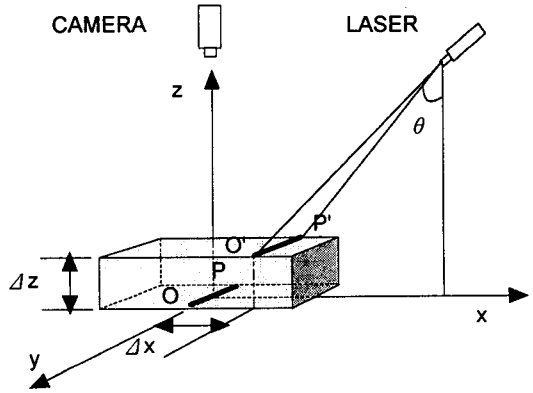


Fig. 1 Line shift of the object surface caused by the light interference.

$\overline{O'P'}$ 로 Δx 만큼의 형상변이가 일어나게 된다. 따라서, Δz 값이 변할 때 카메라 영상 좌표상의 u축 방향으로 레이저 구조광의 형상 변이량을 측정하였다.

이러한 상관관계를 광변이량과 비선형성을 고려하여 2차식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Z_1 = \alpha \times (\Delta u_1)^2 + \beta \times (\Delta u_1) + \gamma \dots\dots\dots (10)$$

$$Z_2 = \alpha \times (\Delta u_2)^2 + \beta \times (\Delta u_2) + \gamma \dots\dots\dots (11)$$

$$Z_3 = \alpha \times (\Delta u_3)^2 + \beta \times (\Delta u_3) + \gamma \dots\dots\dots (12)$$

$$Z_4 = \alpha \times (\Delta u_4)^2 + \beta \times (\Delta u_4) + \gamma \dots\dots\dots (13)$$

$$Z_5 = \alpha \times (\Delta u_5)^2 + \beta \times (\Delta u_5) + \gamma \dots\dots\dots (14)$$

$$Z_6 = \alpha \times (\Delta u_6)^2 + \beta \times (\Delta u_6) + \gamma \dots\dots\dots (15)$$

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

$$[Z^*] = [\Delta u^*] [M] \dots\dots\dots (16)$$

의사역행렬을 이용하여 다음과 같이 M을 구할 수 있다.

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

(3) 컨베이어 이송시 대상체 높이에 따라 투사되는 영상 획득시간 차이에 따른 옵셋 보정

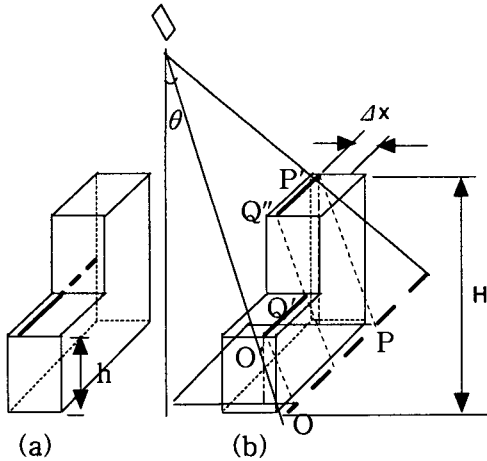


Fig. 2 Calibration of the geometric offset caused by the moving object.

대상체가 이송하게 되면 그림 2의 (b)와 같이 물체가 없다면 동일한 위치 \overline{OP} 에 투사되어야 할 레이저 구조광이 투사각 θ 로 일정한 투사면을 따라서 물체가 존재하는 윗면에 투사된다. \overline{OP} 는 아랫쪽 육면체 부위에서는 $\overline{O'Q'}$ 로 윗쪽 육면체 형태에서는 $\overline{Q''P'}$ 로 투사된다. 이 때의 두 레이저선은 u 좌표가 서로 다르지만 하나의 영상에 저장된다. 높이정보 추출과는 달리 영상획득시간과 대상체의 높이에 따라서 같은 u 좌표를 갖는 레이저 선이 서로 다른 영상으로 저장되므로 같은 u 좌표를 갖는 레이저선의 정보들을 같은 영상으로 저장할 수 있도록 n 만큼 앞의 영상에 저장하거나 혹은 뒤에 나타난 영상의 정보로 옮겨주는 오프셋 보정을 실시하여야 한다.

이러한 오프셋은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

컨베이어 벨트에 설치된 2세트의 포토 센서간 거리는 450mm이므로, 획득한 전체 영상의 수를 N이라 하면, 앞으로 당기거나 뒤로 밀어야 영상의 수 n은 다음과 같이 결정할 수 있다.

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

다. 컨베이어 이송물체의 3차원 형상정보 측정 알고리즘

(1) 영상 획득

입력장치인 CCD 카메라를 이용하여 움직이는 컨베이어 상에서 대상체의 영상을 획득하는 단계로써 첫 번째 포토센서에 물체가 감지되면 카메라를 동작시켰다. 640×480 화소영역의 영상을 두 번째 포토센서에서 감지되기 전까지 반복 획득하여 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 화소폭을 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 회귀방정식을 이용하여 높이정보 z를 계산하였다.

(5) 3차원 형상정보 산출

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

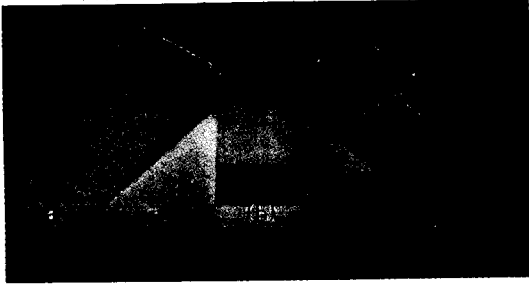


Fig. 3 Samples of 3-D geometric primitives.

라. 3차원 정보 추출 알고리즘의 검정

카메라 보정 과정을 실시하여 얻은 좌표 변환행렬을 적용하여 2개의 레이저 구조광을 임의의 물체에 투사하여 추출한 3차원 정보(x, y, z)와 실측값을 비교함으로써 제안한 3차원 영상정보 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 = 20~599화소, v = 60~399화소) 측정범위 내에 존재한다. 또한, 검정을 위하여 그림 3의 임의의 기하도형을 제작하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 3차원 기준 좌표계 변환

6개 샘플점들의 영상 좌표와 기준 좌표계 정보로

부터 보정한 결과 산출한 좌표 변환행렬 P는 다음과 같았다.

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

좌표 변환행렬 P를 사용하여 높이정보(z)를 알고 있는 임의의 점의 영상좌표(u, v)를 식(9)에 대입하여 대응하는 기준좌표계 상의 3차원 좌표를 산출하였다. 표 1은 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.

나. 레이저 구조광의 형상 변이에 따른 높이 정보 추출

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

$$Z_L = -0.000239502 \times (\Delta u_L)^2 + 0.473767745 \times (\Delta u_L) - 0.700788002 \dots\dots\dots (18)$$

$$Z_R = -0.000169293 \times (\Delta u_R)^2 + 0.443874312 \times (\Delta u_R) - 0.561520672 \dots\dots\dots (19)$$

where, $\Delta u_L = u_{center} - u_{shift}$

$\Delta u_R = u_{shift} - u_{center}$

Table 1 Calibration errors of sample points (x, y, z unit : mm)

No.	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

Table 2. Estimated heights for two laser structured lights using the correlative equations (z unit : mm)

No	z ₀	Left side laser structured light				Right side laser structured light			
		u _L	∠u _L	z _L	E _L	u _R	∠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

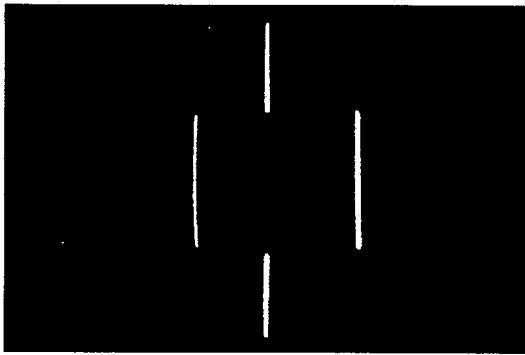


Fig. 4 Image after thresholding of the pentahedron.

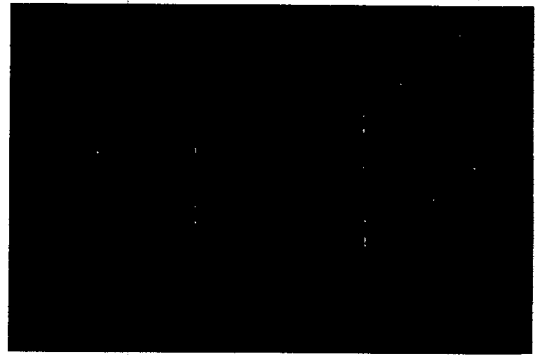


Fig. 5 Image of pentahedron after line thinning from two laser sources.

표 2는 각 높이별로 보정 차트에 투사된 영상을 이용하여 얻은 u 좌표의 평균값과 그 값을 식 (18) 및 식(19)에 대입하여 추출한 높이를 나타낸 것이다.

다. 3차원 형상정보 측정 알고리즘

그림 4는 컨베이어 벨트의 이송속도를 10mm/sec로 하고 0.7초 간격으로 획득한 오면체(그림 3(a))의 다치영상을 경계값 140을 기준으로 이치화한 것이다. 그림 5는 그림 4를 단일 화소선의 두께로 세선화한 결과로써, 중앙부의 기준면에 투사된 레이저 선을 제거하고 높이정보를 지닌 두 선만을 나타내었다.

그림 6은 그림 3(c)에 나타난 이송상태의 계단형

상 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 엡셋을 보정하기 전의 영상을, 그림 9는 엡셋을 보정하고 난 후의 형상을 나타낸 것이다.

본 연구에서 제한한 이송 대상체의 3차원 형상정보 연속 측정 방법으로 보다 정확하게 3차원 정보를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있으나, 영상획득 간격을 줄이고 획득 영상의 수를 늘리게 되면 3차원 형상은 보다 정밀하게 추출할 수 있는 반면 상대적으로 연산 및 처리 시간이 길어진다. 두 개의 레이저 구조광을 사용하므로 비대칭형의 대상체 및 요철 형상의

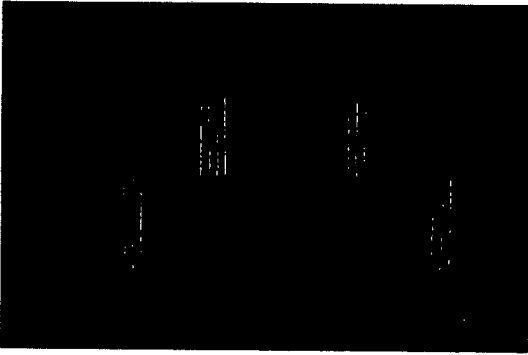


Fig. 6 Image of a stair type primitive after line thinning from two laser sources.

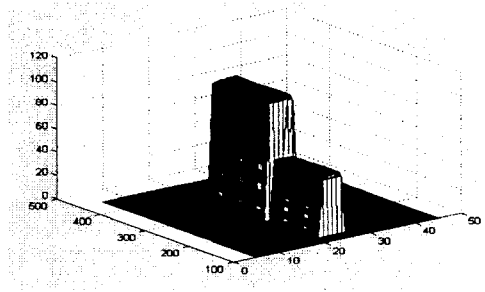


Fig. 9 Image of a stair type primitive after calibration.

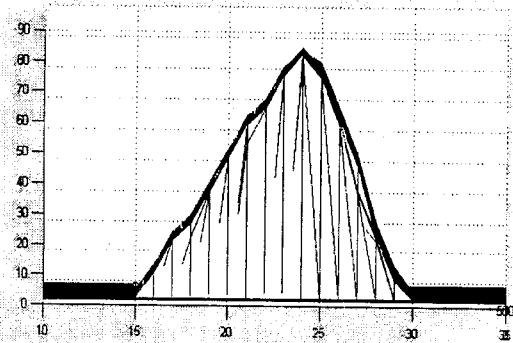


Fig. 7 Front view of the pentahedron image generated using MATLAB.

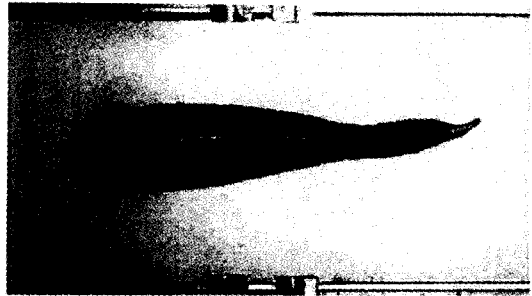


Fig. 10 An original image of carrot.

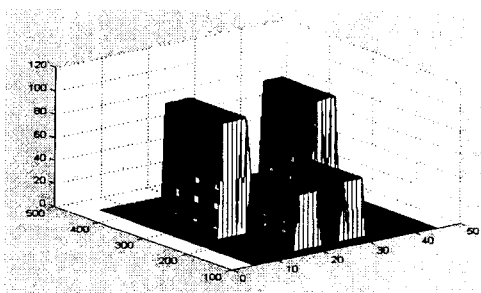


Fig. 8 Image of a stair type primitive before calibration.

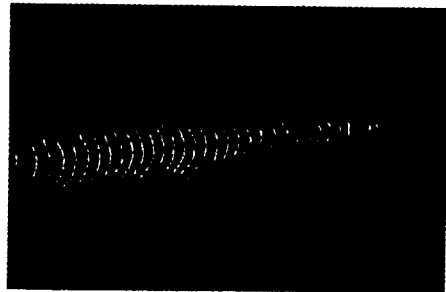


Fig. 11 Structured line image of carrot after thinning.

인식도 가능하지만 한 개의 레이저 구조광을 사용하는 것보다 2배의 시간이 소요된다.

하지만 획득영상의 갯수를 4개 정도로 제한하고 대개의 농산물이 그러하듯이 대상체 표면 형상에 있

어 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 있

다. 참고로 그림 11은 컨베이어 벨트의 속도를 6 mm/s로 하고 영상획득 시간을 0.7초 간격으로 당근 (그림 10)에 투사하여 얻은 영상을 합성한 것이다.

램을 Microsoft Visual C++를 이용하여 개발하였다. 추출된 3차원 형상정보를 MATLAB을 이용하여 재 구축하여 검정을 실시하였다.

4. 요약 및 결론

참 고 문 헌

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 컨베이어에 설치한 센서를 이용하여 무작위로 이송되는 대상체를 감지한 후 레이저 구조광이 투사 되는 영상을 획득하는 3차원 형상정보 측정 시스템을 구축하였다.

2) 3차원 공간상의 임의의 6점에 대한 2차원 영상 좌표를 3차원 기준 좌표계로 변환하는 카메라 좌표 변환행렬을 구하였으며, 이를 이용하여 카메라 보정을 실시한 결과 높이 측정범위 103mm 내에서 최대 1.5mm의 오차를 보였다.

3) 대상체의 높이변화에 따른 화소 이동량을 측정하고 이를 이용하여 높이를 추출할 수 있는 상관관계식을 구하였다. 높이 보정 결과, 측정영역 103mm 이내에서 최대 0.4mm의 오차를 보였다.

4) 이송되는 대상체의 3차원 형상정보를 연속적으로 추출하는 알고리즘을 개발하였고 응용프로그램

1. 황 현, 장영창, 임동혁. 1998. 컴퓨터 시각과 레이저 구조광을 이용한 물체의 3차원 정보 추출. 한국농업기계학회지-23(4):381-390.
2. Aleksander Kubiak. 1997. Three-dimensional measurement of grain by line projection and computer image analysis. BIO-ROBOTICS '97:101-104.
3. Janne Heikkila, Olli Silven. 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. IEEE:1106-1112.
4. Roger, Y. Tsai. 1986. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. IEEE:364-374.
5. Yuncai Liu and S. Thomas Huang. 1990. Determination of camera location from 2D to 3D line and point correspondences. IEEE Transactions 12 (1):28-37.