

컨테이너의 자동랜딩을 위한 레이저센서 기반의 절대위치 검출 알고리즘: 3차원 측정 (Part I)

홍금식* · 임성진* · 홍경태**

*부산대학교 기계공학부

**부산대학교 지능기계공학과

Position Detection Algorithm for Auto-Landing Containers by Laser-Sensor, Part I: 3-D Measurement

KEUM-SHIK HONG*, SUNG-JIN LIM* AND KYUNG-TAE HONG**

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

**Department of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: 3D position measurement 3차원 위치측정 Transformation matrix 변환행렬 Laser sensor 레이저센서 Crane automation 크레인 자동화

ABSTRACT: In the context of auto-landing containers from a container ship to a truck or automatic guided vehicle and vice versa, this research investigates three schemes, one in Part I and two in Part II, for measuring the absolute position of a container. Coordinate transformations between the reference-coordinate, sensor-coordinate, and body-coordinate systems are briefly discussed. The scheme explored in Part I aims the use of three laser-slit sensors, which are relatively inexpensive. In this case, nine nonlinear equations are formulated for six unknown variables (three for orientation and three for position), so a closed-form solution is not available. Instead, an approximate solution through linearization was derived. An advantage of the method in Part I is its ability to measure an absolute position in 3D space, while a disadvantage is the computation time required to obtain pseudo-inverses and the approximate nature of the obtained solution. Numerical examples are provided.

1. 서 론

전 세계적으로 국가간 물류의 규모가 커지면서 해로를 통한 수출입 물동량이 비약적으로 증가하고 있다. 이에 따라 10,000 TEU급 이상의 초대형 선박이 등장하고, 컨테이너 터미널의 규모도 초대형 선박이 접안할 수 있을 정도로 커지고 있다. 그리고 하역장비 및 컨테이너 터미널의 자동화에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. Fig. 1은 세계 최초의 자동화된 터미널인 네덜란드의 ECT 터미널에서 운행중인 AGV(Automatic guided vehicle)와 무인 야드크레인을 보이고 있다.

자동화 터미널에서는 야드트랙터(Yard tractor)의 기능을 AGV가 맡게 되고, 그 주행(Navigation)은 상위 계층으로부터 지시를 받게 된다. 따라서, 터미널 내에서 AGV가 빠른 속도로 주행하고 정확한 위치에 정지할 수 있도록 정지위치를 안내해주는 자동랜딩시스템(Auto-landing system)이 필요하다. 이는 컨테이너크레인의 스프레더(Spreader)가 컨테이너를 AGV나 트랙터 위에 싣거나 내리기 위해 스프레더의 정확한 절대위치를 검출하고, AGV와 크레인 간의 통신에 의해 자동으로 위치를 보

정하는 기능을 필요로 한다. 레이저센서를 이용하는 방법으로, 이형록과 김재훈(1994)은 컨테이너크레인보다 상대적으로 낮은 높이와 소규모의 야드크레인에 대한 무인화를 추진하면서 컨테이너의 유무를 자동으로 인식하고 적재하는 연구결과를 발표하였다. 박병석 등(1999)은 크레인에 달려있는 다양한 물체에 대하여 좌표인식 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 앞의 연구들은 센서가 트롤리(Trolley)에 붙어있어서 트롤리 자체의 위치오차 발생을 감안하지 못하고 있다.

또한, 비전센서를 이용하는 방법으로 Kunimitsu et al.(2002)



Fig. 1 An automated container terminal: ECT

교신저자 홍금식: 부산광역시 금정구 장전2동 산 30번지

051-510-2454 kshong@pusan.ac.kr

은 스프레더에 4개의 카메라를 장착하여 컨테이너의 각 코너를 측정하는 방법을 연구하였다. 이는 컨테이너의 코너에 있는 구멍을 촬영하여 영상처리를 거쳐서 컨테이너와 스프레더가 정확하게 도킹할 수 있게끔 하는 연구이다. 하지만 이 방법도 스프레더가 컨테이너와 도킹하는 상황에서만 사용 가능하고, 영상신호이기 때문에 항만의 거친 환경에 대하여 내구성이 떨어지고, 야간에 사용하기 어렵다는 단점이 있다.

자동랜딩을 성공적으로 수행하기 위해서는 랜딩 전에 컨테이너의 정확한 3차원 위치정보가 필요하며, 다중센서시스템에서 얻은 데이터로부터 이에 대한 위치정보를 추출하여 사용할 수 있다. 기존의 연구로 스테레오 비전에 의한 3차원 형상의 측정이나(Reimark and Rogery, 1988; 신호필 등, 2000), 2D 비전카메라와 거리측정용 초음파센서의 조합에 의한 3차원 위치추정(Nilsson and Hilmberg, 1994), 레이저센서를 사용하여 차체의 위치보정에 관한 연구(홍금식 등, 1996) 및 2D 비전센서를 다중으로 사용하여 공간상에 위치한 물체의 기준좌표계에 대한 자세를 측정하는 알고리즘에 관한 연구(김정관과 한명철, 1999) 등이 있다.

본 논문의 공헌은 다음과 같다. 첫째, 하역분야에서 레이저슬릿광센서를 사용하여 이동중인 화물의 위치를 측정하는 방법을 제시한다. 세 개의 슬릿광센서를 사용하면 3차원 공간에서 강체의 위치와 방향을 측정할 수 있다는 사실에 기인하여, 구체적인 방법론을 제시한다. 둘째, 슬릿광센서로부터 얻어진 비선형방정식에 대한 Analytic solution을 구하는 것이 어렵기 때문에 선형화한 후 근사해를 구하는 방법을 제시한다. 하역기술의 발달과 더불어 Dual-trolley dual-hoist 크레인의 사용이 증가하는 것을 고려하면, 본 논문의 결과는 하역작업의 자동화에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 레이저센서와 좌표계 변환

2.1 레이저슬릿광센서

물체의 위치측정을 위하여 항만의 경우 실외환경에서 비바람과 강열한 태양열을 견디고 오랜 시간동안 센서의 기능이 저하되는 앓는 레이저 장비의 사용이 추천된다. 본 논문에서는 스프레더의 절대위치 측정을 위하여 레이저슬릿광센서를 사용한다. 레이저슬릿광센서는 일반적인 비전카메라와는 달리 광원으로 슬릿광을 사용한다. 따라서 대상물에서 반사된 빛으로부터 얻는 이미지는 선(Line)의 형상이다.

Fig. 2는 본 논문에서 사용된 레이저 슬릿광센서의 구조를 보여준다. 먼저 레이저 다이오드로부터 슬릿광이 주사되면 Field of view(FOV: 측정 가능 범위)내에 위치한 측정물에 비추지며 그로부터 반사된 선 모양의 이미지는 센서 내부에 장착된 CCD matrix에 보내진다. CCD matrix 상의 임의의 위치는 FOV와 대응되어 있다. 따라서 이렇게 얻어진 이미지 데이터로부터 측정된 코너 또는 선단의 좌표값을 센서좌표계에 대해 산출할 수 있다. 제안하는 레이저센서에서 센서좌표계는 슬릿광이 나아가는 방향을 z 축, 슬릿광 평면에 수직한 방향을 x 축으로 정의하며, 오른손 법칙에 의해 y 축이 결정된다. 센서좌표계의 원점은 FOV

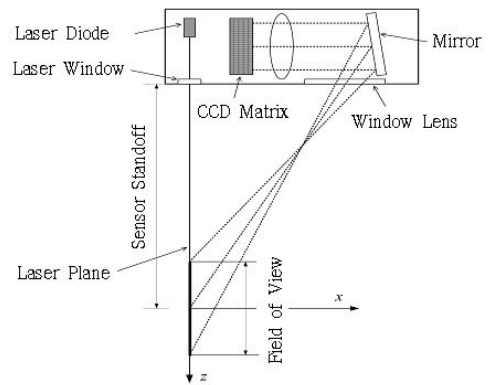
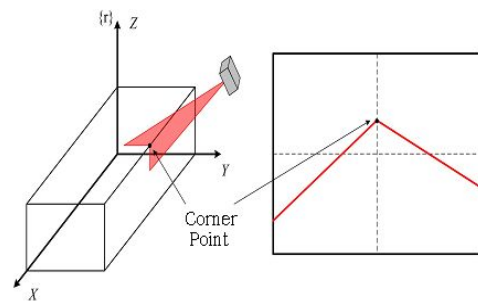


Fig. 2 Schematic of the laser slit-light sensor



(a) Corner measurement (b) An image on the CCD matrix

Fig. 3 Corner measurement using a laser slit-light sensor

의 중앙으로 설정되어있다.

Fig. 3(a)와 같이 센서로부터 나온 레이저 슬릿광이 측정물의 코너 라인에 비추지면 측정물에 레이저 라인이 생기며, 그에 대응하는 CCD matrix 상의 이미지가 Fig. 3(b)와 같이 모니터에 나타난다. Fig. 3(b)에서, 측정된 코너점의 위치는 표시된 두 직선이 만나는 곳이 된다. 모니터 상의 코너점은 CCD matrix 상의 대응하는 CCD matrix 상의 이미지가 Fig. 3(b)와 같이 모니터에 나타난다. Fig. 3(b)에서, 측정된 코너점의 위치는 표시된 두 직선이 만나는 곳이 된다. 모니터 상의 코너점은 CCD matrix 상의 좌표값으로 표현되어진 후 다시 센서좌표계에 대한 좌표값으로 변환된다. 즉 물체의 코너점 좌표를 센서좌표계에서 좌표값을 읽어 들일 수 있다. 특히 이와 같은 구조의 센서에서는 측정점이 항상 센서로부터 주사되는 슬릿광의 평면 위에 존재하므로 측정된 점의 x 축에 대한 좌표값은 항상 0으로 출력된다.

2.2 좌표계의 정의 및 좌표변환

모든 것의 기준이 되는 기준좌표계 외에 레이저슬릿광센서에 부착된 레이저 빔이 나가는 부분이 원점이 되고 스캔되는 면이 xy -평면이 되는 센서좌표계가 있고, 또한 측정하고자 하는 움직이는 물체의 한 점을 기준으로 하는 물체좌표계가 있다. 여기서 좌표계의 정의를 살펴보고, 좌표계 간의 변환관계를 알아보자.

기준좌표계(Reference coordinate system) $\{r\}$ 은 모든 좌표변환에 있어서 절대적 기준이 되는 좌표계로서 센서에서 측정된

값이나 변환 알고리즘의 결과가 모두 최종적으로 기준좌표계로 표현된다. 여기서 실제로 적용할 때 기준좌표계의 z 축을 중력 방향으로, 컨테이너크레인의 레일 방향을 x 축으로, 그리고 붉어 뻗어있는 방향을 y 축으로 설정한다. 좌측윗첨자 r 은 기준좌표계에 대한 정보를 의미한다.

센서좌표계(Sensor coordinate system) $\{s\}$ 는 센서 자체에 정의된 것으로서, 센서에 의해 측정된 값을 최초로 표현하는 좌표계이다. 본 논문에서는 센서좌표계의 원점은 FOV의 중앙으로 설정되어 있으며, 슬릿광이 나아가는 방향을 z 축, 슬릿광평면에 수직인 방향을 x 축으로 정의하며, 오른손 법칙에 의해 y 축이 결정된다. 좌측윗첨자 s 는 센서좌표계에 대한 정보를 의미한다.

물체좌표계(Body coordinate system) $\{b\}$ 는 측정 대상물의 임의의 위치에 고정되어 있는 좌표계로 정의한다. 여기서는 좌표계의 변환관계를 간단히 하기 위해 컨테이너의 한 모서리점을 물체좌표계의 원점이 되도록 정의하며, 윗면이 b_z 축에 수직인 평면이 된다. 좌측윗첨자 b 는 물체좌표계에 대한 정보를 의미한다. 컨테이너가 크레인에 매달려서 흔들리게 되면 그 움직임에 따라 물체좌표계도 공간상을 움직이게 된다.

논문을 전개하기 위하여 먼저 기준좌표계와 센서좌표계간의 변환관계를 알아볼 필요가 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 센서에 의해 측정된 점의 좌표값은 센서좌표계에 대한 값이며, 이것을 기준좌표계에 대한 값으로 변환하여야 한다. 이를 위해 먼저 크레인 밖의 어느 한 점을 원점으로 하는 기준좌표계를 두고 크레인은 고정되어 있다고 가정한다. 그러면 두 좌표계 간의 변환관계를 나타내는 변환행렬(Transformation matrix)을 구할 수 있다. 변환행렬은 회전행렬과 병진벡터의 조합으로 이루어지는데, 먼저 회전행렬에 대해 살펴보자.

두 좌표계 간의 방위(Orientation)관계의 규명은 $z-y-x$ 오일러 각을 이용하며, 두 축 간의 회전량은 오른손 법칙에 따라 그 부호를 결정한다(Tsai, 1999). 일반적으로 두 좌표계간의 방위를 결정하는 데는 서로 독립인 세 개의 각이 필요하다. 그리고 기준좌표계를 고정시키고, 고정된 기준좌표계 $\{r_x, r_y, r_z\}$ 에 대한 센서좌표계 $\{s_x, s_y, s_z\}$ 는 z, y, x 축들에 대한 각변위를 나타내는 α, β, γ 와 각 축들에 대한 병진운동 dx, dy, dz 로서 여섯 개의 미지수가 존재한다. 먼저 회전행렬은 α, β, γ 오일러 각으로 표현할 때 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} {}^rR &= R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

여기서 $c\alpha = \cos\alpha$, $s\alpha = \sin\alpha$ 이다.

기준좌표계의 원점에서 센서좌표계의 원점까지의 병진벡터를 ${}^rP_{bORG}(dx, dy, dz)^T$ 라고 표현하면 기준좌표계에 대한 좌표값

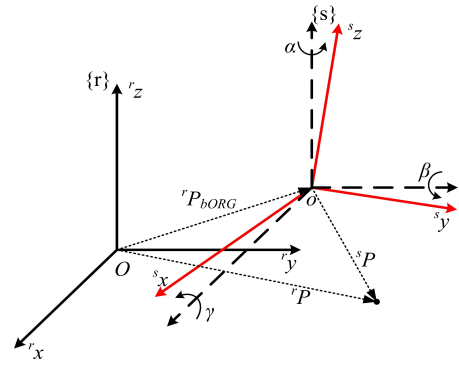


Fig. 4 Transformation relationship of two coordinate systems

rP 과 센서좌표계에 대한 좌표값 sP 의 관계는 식 (2)와 같아진다.

$${}^rP = {}^rR {}^sP + {}^rP_{bORG} \quad (2)$$

따라서 센서좌표계로 얻어진 값을 기준좌표계에 대한 값으로 변환할 수 있는 변환행렬은 아래의 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} {}^rP &= \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & dx \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & dy \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= {}^rT {}^sP \quad (3) \end{aligned}$$

지금까지 일반적인 3차원 좌표변환에 대하여 알아보았다. 실제로 센서를 설치할 때 기준좌표계에 대한 센서좌표계의 회전행렬과 병진벡터를 명확히 결정하여야 하겠다. 먼저 회전행렬은 기준좌표계에 대하여 센서좌표계를 회전시킬 때, 센서좌표계의 z 축의 회전각 α , y 축의 회전각 β , x 축의 회전각 γ 를 측정하여 결정한다. 그리고 병진벡터는 기준좌표계 원점에서 센서좌표계 원점까지 각 축에 대한 거리를 측정하여 dx, dy, dz 를 결정한다. 또한 식 (3)과 같은 맥락으로 센서좌표계와 물체좌표계 간에도 변환행렬을 사용하여 그 회전량과 병진량을 알 수 있다.

3. 컨테이너의 자동랜딩을 위한 전략

세계의 선진항만에서는 자동화 및 무인화 된 컨테이너터미널을 운영하고, 새로운 방식의 크레인이나 AGV를 개발하여 기존의 항만기능을 확장하고 있다. 특히 야드 쪽의 장비들은 완전 무인화를 목표로 개발을 하거나 이미 상용화되어 실제 항만에 적용하여 사용 중이다. 하지만 컨테이너크레인에서는 정박된 컨테이너선의 흔들림과 긴 호이스트 로프 때문에 매달려있는 스프레더의 위치를 측정하기 힘들며, 컨테이너크레인을 자동화나 무인화 하기엔 아직까지 많은 어려움이 있다.

이에 본 논문에서는 컨테이너선에서 컨테이너를 AGV에 싣기 위한 상황(하역작업)과 컨테이너선에 컨테이너를 싣기 위해서 AGV에서 스프레더를 이용하여 컨테이너를 들어올리는 상황(선

적작업)의 자동화를 연구대상으로 하고, 자동랜딩시스템을 위하여 꼭 필요한 스프레더의 절대위치 측정에 대하여 다루고자 한다. 그리고 항만의 하역효율을 높이기 위해 점차 도입되고 있는 이중트롤리(Double trolley) 컨테이너크레인의 육측의 트롤리에 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 응용하면 육측 트롤리의 무인화가 가능하기 때문에 본 논문의 결과는 유용하게 사용될 수 있다. 반면에 해상측에서는 선박의 흔들림으로 인하여 인식하고자 하는 컨테이너가 고정되지 않고, 컨테이너선에서 직접 선적/하역할 때 주변 컨테이너 때문에 인식하고자 하는 컨테이너의 위치를 측정하기 어려우며, 스프레더 절대위치 검출을 위한 센서를 설치할 공간이 없기 때문에 무인화가 어려운 실정이다. Dual trolley의 육측 이송구간에서는 이송하는 처음과 끝에서 컨테이너의 흔들림이 없고, 주변에 다른 컨테이너가 없어서 위치측정이 용이하며, 레이저센서를 설치할 공간이 충분하다.

본 논문에서 제안하는 컨테이너 자동랜딩의 절차는 다음과 같다. 먼저, 하역 시 컨테이너의 랜딩 가능여부를 판단하기 위해 컨테이너와 AGV간의 간격이 0.2m, 선적 시 스프레더와 컨테이너간의 간격이 0.2m가 되면 호이스팅을 멈추게 하여 스프레더의 절대위치를 검출하기 위한 측정을 한다. 0.2m의 간격은 하역 현장의 경험에 의해서 얻어진 양으로 AGV의 측면 가이드와 같은 구조물들을 고려하여 본 논문에서 제안하는 것이며, 스프레더가 호이스팅 되어지는 높이는 크레인 줄의 길이를 측정함으로써 쉽게 측정할 수 있다.

일단 레이저슬릿광센서로 스프레더의 좌표를 측정하면 알고리즘을 통하여 변환행렬을 구한다. 그리고 기준에 알고 있는 표준좌표와의 변환행렬 즉 표준변환행렬과의 크기 차가 랜딩이 가능한 허용오차범위 안에 드는지 판별한다. 그리고 기준좌표계에 대하여 좌표를 알고 있는 고정된 AGV와 기준좌표계에서 xy -평면에 대한 위치오차가 허용오차범위 내에 들어오면 컨테이너를 내리거나 들어올리기 위해서 랜딩한다. 본 논문에서는 스프레더의 좌표가 연속으로 2초간 허용오차범위 안에 들어가면 랜딩이 가능하다고 제안한다. 그러기 위해서 측정위치에서 레이저센서는 10Hz의 측정 주파수를 가지고 스프레더의 좌표를 측정한다.

4. 슬릿광을 사용한 절대위치 검출

4.1 레이저슬릿광센서를 이용한 좌표검출 알고리즘

이제 레이저슬릿광센서를 이용하여 어떻게 스프레더의 좌표를 알아내고 변환행렬을 구하는지 알아보자. 2절에서 기준좌표계와 센서좌표계간의 변환관계를 알아보았다. 센서좌표계와 물체좌표계의 관계는 아래와 같이 주어진다.

$${}^sP = {}^sT {}^bP \quad (4)$$

센서는 크레인에 고정이 되어 있기 때문에 센서의 위치가 한번 결정되면 이에 따라 변환행렬도 상수행렬이 된다. 따라서 센서좌표계와 물체좌표계의 관계는 식 (3)에 의해 기준좌표계와 물체좌표계의 관계로 아래와 같이 나타낼 수 있다. 그러면 기준

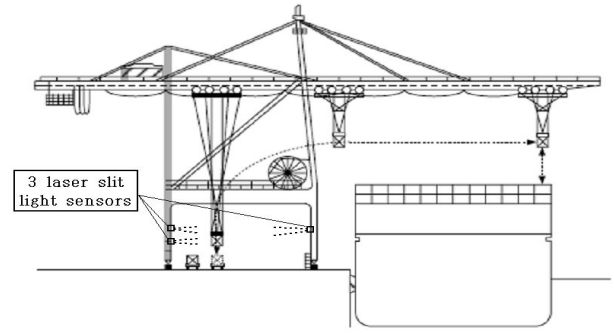


Fig. 5 The proposed sensor locations for measuring the position of containers

좌표계와 물체좌표계에 대한 변환행렬을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$${}^rP = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ca c\beta & ca s\beta s\gamma - sa c\gamma & ca s\beta c\gamma + sa s\gamma & dx \\ sa c\beta & sa s\beta s\gamma + ca c\gamma & sa s\beta c\gamma - ca s\gamma & dy \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^rT {}^bP \quad (5)$$

식 (5)를 전개하면 rT 의 요소들과 ${}^b x, {}^b y, {}^b z$ 에 대한 3개의 방정식이 만들어진다. 이때 ${}^b x, {}^b y, {}^b z$ 를 rT 의 함수로 표현할 수 있다. 즉, 물체좌표계에 대한 슬릿광의 평면방정식과 기준좌표계에 대한 직선의 방정식 $\bar{a} \bar{b}$ 의 교점이 ${}^bP({}^b x, {}^b y, {}^b z)$ 가 되므로 ${}^b x, {}^b y, {}^b z$ 의 값들은 rT 의 요소들의 함수로 표현될 수 있다. Fig. 5와 같이 크레인의 Sill beam 혹은 Leg에 장착되는 3개의 센서로 세 지점을 측정한다고 하자. 먼저, 센서 1에 대해 분석한 후 다른 두 센서에 대해서도 똑같이 적용하기로 한다.

센서 1의 슬릿광의 기준좌표계에 대한 평면방정식을 다음과 같이 둔다.

$$a_1 {}^r x + b_1 {}^r y + c_1 {}^r z + d_1 = 0 \quad (6)$$

식 (5)를 풀어쓰면 다음과 같다.

$$r_x = r_{11} {}^b x + r_{12} {}^b y + r_{13} {}^b z + dx \quad (7)$$

$$r_y = r_{21} {}^b x + r_{22} {}^b y + r_{23} {}^b z + dy \quad (8)$$

$$r_z = r_{31} {}^b x + r_{32} {}^b y + r_{33} {}^b z + dz \quad (9)$$

식 (7)~(9)를 식 (6)에 대입하여 물체좌표계에 대한 평면방정식을 구하면 다음과 같다.

$$(a_1 r_{11} + b_1 r_{21} + c_1 r_{31}) {}^b x + (a_1 r_{12} + b_1 r_{22} + c_1 r_{32}) {}^b y + (a_1 r_{13} + b_1 r_{23} + c_1 r_{33}) {}^b z + a_1 dx + b_1 dy + c_1 dz + d_1 = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 다음과 같이 간단히 쓴다.

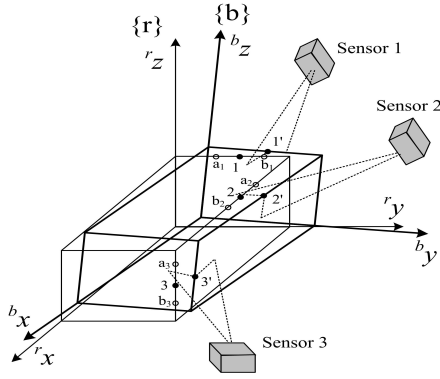


Fig. 6 Locations of the three slit-lights for a 3D measurement

$$a_1{}^b x + b_1{}^b y + c_1{}^b z + d_1{}' = 0 \quad (11)$$

여기서 $a_1{}' = a_1 r_{11} + b_1 r_{21} + c_1 r_{31}$, $b_1{}' = a_1 r_{12} + b_1 r_{22} + c_1 r_{32}$, $c_1{}' = a_1 r_{13} + b_1 r_{23} + c_1 r_{33}$, $d_1{}' = a_1 dx + b_1 dy + c_1 dz + d_1$ 이다.

이제 물체가 운동하기 전의 물체좌표계에 대한 $\bar{a}_1 \bar{b}_1$ 직선방정식을 다음과 같이 두자.

$$\frac{{}^b x - x_{a1}}{x_{b1} - x_{a1}} = \frac{{}^b y - y_{a1}}{y_{b1} - y_{a1}} = \frac{{}^b z - z_{a1}}{z_{b1} - z_{a1}} = k_1 \quad (12)$$

따라서

$${}^b x = (x_{b1} - x_{a1})k_1 + x_{a1} \quad (13)$$

$${}^b y = (y_{b1} - y_{a1})k_1 + y_{a1} \quad (14)$$

$${}^b z = (z_{b1} - z_{a1})k_1 + z_{a1} \quad (15)$$

이 된다.

Fig. 6에서 운동 후 센서 1에 의해 측정되어지는 측정점의 물체좌표계에 대한 좌표를 ${}^b P_1$ 으로 나타내며, 이동 후의 정보는 우측상첨자 '을 사용하여 표현하기로 한다. 물체좌표계에 대한 점 ${}^b P_1$ 의 좌표값은 직선방정식 (12)와 평면방정식 (11)의 교점이므로 식 (13)~(15)를 식 (11)에 대입하면

$$\begin{aligned} & \{a_1{}'(x_{b1} - x_{a1}) + b_1{}'(y_{b1} - y_{a1}) + c_1{}'(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 \\ & = -d_1{}' - a_1{}'x_{a1} - b_1{}'y_{a1} - c_1{}'z_{a1} \end{aligned} \quad (16)$$

이 되며, 다음과 같이 k_1 을 구할 수 있다.

$$k_1 = \frac{-(a_1{}'x_{a1} + b_1{}'y_{a1} + c_1{}'z_{a1} + d_1{}')}{a_1{}'(x_{b1} - x_{a1}) + b_1{}'(y_{b1} - y_{a1}) + c_1{}'(z_{b1} - z_{a1})} \quad (17)$$

다음으로, 계산된 k_1 으로부터 ${}^b P_1$ 의 좌표값인 ${}^b x_1$, ${}^b y_1$, ${}^b z_1$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^b x_1 = (x_{b1} - x_{a1})k_1 + x_{a1} \quad (18)$$

$${}^b y_1 = (y_{b1} - y_{a1})k_1 + y_{a1} \quad (19)$$

$${}^b z_1 = (z_{b1} - z_{a1})k_1 + z_{a1} \quad (20)$$

식 (17)의 k_1 은 α , β , γ , dx , dy , dz 의 함수이므로 ${}^b P_1$ 의 좌표값도 역시 ${}^b T_1$ 요소들의 함수이다. 위에서 구한 ${}^b x_1$, ${}^b y_1$, ${}^b z_1$ 을 식 (7)~(9)에 대입하면 다음과 같은 센서 1에 대한 세 개의 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} {}^r x_1 &= \{r_{11}(x_{b1} - x_{a1}) + r_{12}(y_{b1} - y_{a1}) + r_{13}(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 \\ &+ r_{11}x_{a1} + r_{12}y_{a1} + r_{13}z_{a1} + dx \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} {}^r y_1 &= \{r_{21}(x_{b1} - x_{a1}) + r_{22}(y_{b1} - y_{a1}) + r_{23}(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 \\ &+ r_{21}x_{a1} + r_{22}y_{a1} + r_{23}z_{a1} + dy \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} {}^r z_1 &= \{r_{31}(x_{b1} - x_{a1}) + r_{32}(y_{b1} - y_{a1}) + r_{33}(z_{b1} - z_{a1})\} k_1 \\ &+ r_{31}x_{a1} + r_{32}y_{a1} + r_{33}z_{a1} + dz \end{aligned} \quad (23)$$

위의 ${}^r x_1$, ${}^r y_1$, ${}^r z_1$ 은 절대좌표계에 대한 측정점의 위치벡터 ${}^r P_1$ 의 세 성분이다. 식 (21)~(23)에서 좌변의 ${}^r x_1$, ${}^r y_1$, ${}^r z_1$ 은 모두 ${}^b T_1$ 의 요소들의 함수이다. 따라서 세 개 이상의 센서에 대해 이와 같은 과정을 거치면 기준좌표계와 물체좌표계 간의 변환행렬 ${}^b T$ 의 미지수의 수(6개: α , β , γ , dx , dy , dz .)보다 많은 관계식(9개)을 얻을 수 있다.

4.2 선형화된 근사해

앞 절과 같이 3차원 위치측정을 위하여 센서를 3개 사용하였을 경우, 방정식들의 수가 미지수보다 많아 실제적으로 Closed-form solution을 구하지 못하게 된다. 일반적으로, 물체의 2차원 운동에 대한 자세측정은 해석적으로 간단하게 나올 수 있지만, 3차원 운동에 대한 자세측정은 강한 비선형성으로 인해 해석적인 해를 구하기가 매우 어려우므로 선형화를 통해 해결한다 (Åström and Wittenmark, 1984; 홍금식 등, 1996; 김정관과 한명철, 1999). Anti-sway controller가 작동하는 상황에서 트롤리가 목표지점에 도달하였을 시 컨테이너의 잔류 흔들림은 매우 작은 상황이므로 이러한 선형화 접근법은 타당하다 하겠다.

본 논문에서는 측정위치에서 스프레더를 정상상태에 대한 미소운동으로 가정하고 선형화하기 위한 알고리즘을 유도할 것이다. 우선, 센서 1에 대하여 ${}^r x_1$, ${}^r y_1$, ${}^r z_1$ 을 다음과 같이 정의한다.

$${}^r x_1 = f_1(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz) \quad (24)$$

$${}^r y_1 = g_1(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz) \quad (25)$$

$${}^r z_1 = h_1(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz) \quad (26)$$

위 식을 선형화한 후 다음과 같이 쓴다.

$${}^r x_1 = k_{110} + k_{111}\alpha + k_{112}\beta + k_{113}\gamma + k_{114}dx + k_{115}dy + k_{116}dz \quad (27)$$

$${}^r y_1 = k_{120} + k_{121}\alpha + k_{122}\beta + k_{123}\gamma + k_{124}dx + k_{125}dy + k_{126}dz \quad (28)$$

$${}^r z_1 = k_{130} + k_{131}\alpha + k_{132}\beta + k_{133}\gamma + k_{134}dx + k_{135}dy + k_{136}dz \quad (29)$$

여기서 k_{ijk} (i =센서번호(1~3), j =축(1~3), $k=0\sim6$)는 부록에 나타내었다. 센서 2와 센서 3에 대하여도 똑같이 전개하여 (30)~(35)을 얻는다.

$${}^r x_2 = k_{210} + k_{211}\alpha + k_{212}\beta + k_{213}\gamma + k_{214}dx + k_{215}dy + k_{216}dz \quad (30)$$

$${}^r y_2 = k_{220} + k_{221}\alpha + k_{222}\beta + k_{223}\gamma + k_{224}dx + k_{225}dy + k_{226}dz \quad (31)$$

$${}^r z_2 = k_{230} + k_{231}\alpha + k_{232}\beta + k_{233}\gamma + k_{234}dx + k_{235}dy + k_{236}dz \quad (32)$$

$${}^r x_3 = k_{310} + k_{311}\alpha + k_{312}\beta + k_{313}\gamma + k_{314}dx + k_{315}dy + k_{316}dz \quad (33)$$

$${}^r y_3 = k_{320} + k_{321}\alpha + k_{322}\beta + k_{323}\gamma + k_{324}dx + k_{325}dy + k_{326}dz \quad (34)$$

$${}^r z_3 = k_{330} + k_{331}\alpha + k_{332}\beta + k_{333}\gamma + k_{334}dx + k_{335}dy + k_{336}dz \quad (35)$$

(27)~(35)을 다음과 같이 행렬식으로 쓴다.

$$\begin{bmatrix} k_{111} & k_{112} & k_{113} & k_{114} & k_{115} & k_{116} \\ k_{121} & k_{122} & k_{123} & k_{124} & k_{125} & k_{126} \\ k_{131} & k_{132} & k_{133} & k_{134} & k_{135} & k_{136} \\ k_{211} & k_{212} & k_{213} & k_{214} & k_{215} & k_{216} \\ k_{221} & k_{222} & k_{223} & k_{224} & k_{225} & k_{226} \\ k_{231} & k_{232} & k_{233} & k_{234} & k_{235} & k_{236} \\ k_{311} & k_{312} & k_{313} & k_{314} & k_{315} & k_{316} \\ k_{321} & k_{322} & k_{323} & k_{324} & k_{325} & k_{326} \\ k_{331} & k_{332} & k_{333} & k_{334} & k_{335} & k_{336} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^r x_1 - k_{110} \\ {}^r y_1 - k_{120} \\ {}^r z_1 - k_{130} \\ {}^r x_2 - k_{210} \\ {}^r y_2 - k_{220} \\ {}^r z_2 - k_{230} \\ {}^r x_3 - k_{310} \\ {}^r y_3 - k_{320} \\ {}^r z_3 - k_{330} \end{bmatrix}$$

또는

$$A \underline{u} = \underline{v} \quad (36)$$

이 얻어진다.

식 (36)에서 보듯이 주어진 방정식의 수가 미지수의 수보다 3개 더 많다. 그러나 모든 방정식들이 선형독립이지는 않다. 레이저슬릿광센서는 2차원의 정보를 제공하므로 9개의 식들 중 6개만이 서로 선형독립이다. 본 논문에서는 식 (36)의 \underline{u} 를 선형방정식의 최소자승법 해법을 이용하여 구하고자 한다. 만일 $m \times n$ 행렬 A 에 대하여 $m > n$ 이고, 행렬 A 의 랭크가 n 이면 (36)의 \underline{u} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\underline{u} = A^\# \underline{v} \quad (37)$$

여기서 $A^\# = (A^T A)^{-1} A^T$ 이다. \underline{u} 를 구함으로써 우리는 변환행렬 ${}^r T$ 의 미지수 $\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz$ 를 구할 수 있다. 지금까지 알려진 알고리즘을 이용하여 스프레더가 기준위치에 위치할 경우의 결과값을 구하고, 운동 후의 좌표값을 측정하여 얻어지는 결과값을 비교함으로써 스프레더의 기준좌표에 대한 절대위치와 자세를 알 수 있다.

4.2 컨테이너 크레인에 적용 및 수치 예제

지금까지 알아본 알고리즘을 컨테이너크레인에 적용하는 방법에 대해 알아보자. 선박으로부터 컨테이너를 잡아 AGV 위에 내려 놓는 상황을 고려한다. Auto-landing 을 위한 스프레더의 절대위치 측정은 컨테이너가 Landing zone에 도달한 후 실시하게 된다. Auto-move 과정을 통하여 트롤리가 목표위치에 도착하였을 시 컨테이너의 바닥과 AGV와의 거리는 0.2m 정도를 유지하면 되므로 Hoisting 제어를 위해서는 엔코더로도 충분하지만 보다 정밀한 제어를 위해서는 레이저거리센서를 사용할 수도 있겠다. 이렇게 하여 컨테이너와 AGV간의 간격이 0.2m 정도로 유지되고, 레이저슬릿광센서를 이용하여 스프레더의 3차원 절대위치를 측정할 준비가 되었으며, 크레인 본체에 고정된 센서좌표계들과 기준좌표계와의 변환행렬은 상수행렬로써 식 (3)에 의해 알고 있다고 가정한다. 또한, 세 개의 슬릿광센서로 스프레더의 세 코너점을 측정하여 코너점의 절대좌표에 대한 정보를 얻는다. 이 정보를 본 논문의 알고리즘에 대입하면 스프레더에 부착된 물체좌표계와 기준좌표계 사이의 변환행렬의 6개의 미지수 $\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz$ 를 구할 수 있다.

이제, 오차분석을 목적으로 먼저 스프레더의 중심, 즉 물체좌표계의 원점을 기준좌표계의 중심과 일치시켜 놓은 이미 알고 있는 변화량을 부여한 다음 발생되게 되는 변환행렬의 요소를 구한다. 이때의 변환행렬을 표준변환행렬이라 부르기로 한다. 그리고 기준위치로부터 이동을 한 후의 스프레더의 물체좌표계와 기준좌표계간의 변환행렬의 요소를 구하여 표준변환행렬과의 오차를 판단하여 이때의 오차가 허용오차범위 내에 들면 도킹이 가능하게 된다. 허용오차범위는 상하/좌우 5cm로 제한하며, 이 값은 경험에 의해 얻어진 값이며, 실제 항만에서 적용되고 있는 값이다.

4.3 수치예제 및 오차분석

본 논문의 알고리즘을 적용 시 선형화에 따른 오차가 발생할 수 있으므로 이것을 고려하여 랜딩 가능한 허용오차범위를 설정하는 것이 합리적이며, 수치예제를 통하여 발생하는 오차의 크기를 살펴보도록 하자. 4.2절에서 설정한 상황은 컨테이너가 스프레더에 고정되어 있어 함께 운동하게 되므로 컨테이너의 위치를 측정하는 경우가 되겠다.

먼저 컨테이너가 기준위치에 위치하는 경우에 대하여 컨테이너의 물체좌표계와 기준좌표계를 일치하도록 설정하고, 대상 컨테이너에 대해 세 개의 코너점을 측정하며, 특징점들은 40ft (12.19m)컨테이너의 실제 치수를 고려하여 다음과 같이 설정한다.

$$a_1(4, 0, 0), \quad b_1(8, 0, 0) \quad (38)$$

$$a_2(12.034, 0.4, 0), \quad b_2(12.034, 2, 0) \quad (39)$$

$$a_3(12.034, 2.348, -0.4), \quad b_3(12.034, 2.348, -2) \quad (40)$$

기준좌표계에 대하여,

$$\begin{aligned} \text{센서 1의 slit 광의 평면방정식} &: X = 6 & (41) \\ \text{센서 2의 slit 광의 평면방정식} &: Y = 1.2 & (42) \\ \text{센서 3의 slit 광의 평면방정식} &: Z = -1.2 & (43) \end{aligned}$$

이 되도록 각 센서들을 Fig. 7과 같이 설치한다. 이상과 같이 셋업된 시스템에 대하여 선형화된 계수들을 구하고, 식 (36)의 행렬식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -6 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12.034 & 1.2 & 0 & 0 & 1 \\ -2.348 & -1.2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 12.034 & 0 & 1.2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4.441e-16 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1}-6 \\ r_{y_1}-0 \\ r_{z_1}-0 \\ r_{x_2}-12.034 \\ r_{y_2}-1.2 \\ r_{z_2}-0 \\ r_{x_3}-12.034 \\ r_{y_3}-2.348 \\ r_{z_3}+1.2 \end{bmatrix}$$

또는, $A\underline{u} = \underline{v}$ (44)

본 예제에 대한 행렬 A는 9×6이고, Rank(A)가 6이므로 아래와 같이 행렬 A의 의사 역행렬(Pseudo-inverse)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A^\# &= (A^T A)^{-1} A^T \\ &= \begin{bmatrix} -6.46e-12 & -3.824 & 3.824 & -19.23 & 3.124e-13 \\ 6.44e-12 & 3.659 & -3.569 & 19.23 & -3.125e-13 \\ 3.244e-11 & 18.4 & 18.4 & 90.7 & -1.569e-12 \\ -7.579e-12 & -4.589 & -4.589 & -22.08 & 3.673e-13 \\ 3.879e-11 & 23.93 & -22.95 & 115.4 & -1.876e-12 \\ 3.861e-11 & 21.95 & 21.95 & 115.4 & -1.867e-12 \\ -3.824 & 19.23 & 3.824 & -1.779e-12 \\ 3.659 & -19.23 & -3.659 & 1.774e-12 \\ 19.23 & -96.7 & -18.4 & 8.934e-12 \\ -4.589 & 23.08 & 4.589 & -2.092e-12 \\ 22.95 & -115.4 & -22.95 & 1.068e-11 \\ 21.95 & -115.4 & -22.95 & 1.064e-11 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (45)$$

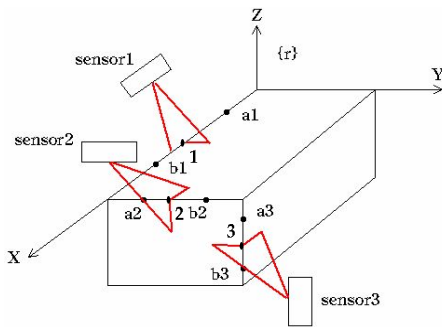


Fig. 7 Example of 3-D position estimation

마지막으로, 구하고자 하는 변환행렬의 요소 \underline{u} 는 식 (37)과 같이 $A^\#$ 과 센서로 측정된 데이터 \underline{v} 를 곱하여 얻을 수 있다. 컨테이너가 기준위치에 위치하는 경우, 센서로 측정된 측정점의 데이터 \underline{v} 와 이 값에 의해 구해진 변환행렬의 요소 \underline{u} 는 다음과 같이 얻어진다.

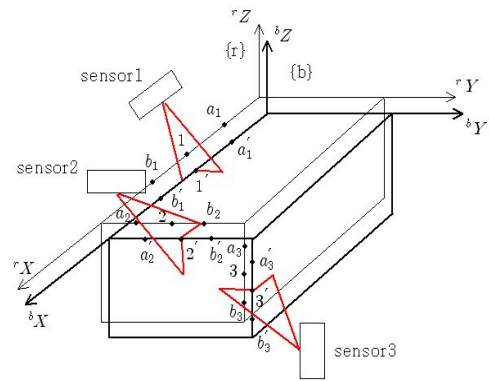
$$1(r_{x_1}, r_{y_1}, r_{z_1})^T = (6, 0, 0)^T \quad (46)$$

$$2(r_{x_2}, r_{y_2}, r_{z_2})^T = (12.034, 1.2, 0)^T \quad (47)$$

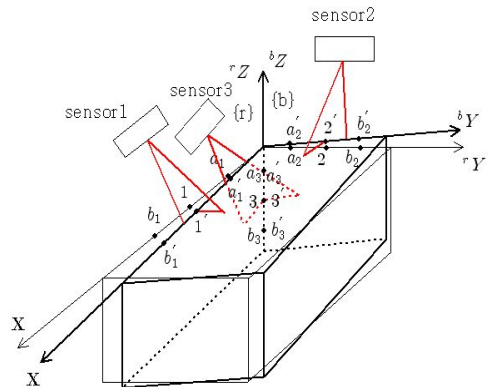
$$3(r_{x_3}, r_{y_3}, r_{z_3})^T = (12.034, 2.348, -1.2)^T \quad (48)$$

$$(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz)^T = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T \quad (49)$$

이제 운동 후의 컨테이너의 변환행렬을 구해보자. 알고리즘의 선형화 Operating point가 0 이므로 원점으로부터의 이동 및 회전이 증가할수록 선형화에 의한 오차는 증가할 것이다. 따라서 이 알고리즘의 유용성을 판단하기 위해서 랜딩 허용오차 한계점에 컨테이너가 위치한 경우에 대해 알고리즘의 오차 및 유용성을 판단하는 것이 적절할 것이다.



(a) Translation along the x- and y-axis



(b) Rotation about the z-axis

Fig. 8 Detection of a 3-D motion

Fig. 8(a)와 같이 $dx=5cm$, $dy=5cm$ 인 병진운동 후의 컨테이너에 대해서 센서에 의해 측정된 측정점의 데이터는 다음과 같아진다.

$$1'(r_{x_1}', r_{y_1}', r_{z_1}')^T = (6.00, 0.05, 0)^T \quad (50)$$

$$2'(r_{x_2}', r_{y_2}', r_{z_2}')^T = (12.084, 1.2, 0)^T \quad (51)$$

$$3'(r_{x_3}', r_{y_3}', r_{z_3}')^T = (12.084, 2.398, -1.2)^T \quad (52)$$

이 데이터와 최초 시스템 설정 시 결정되어지는 $A^\#$ 에 의해 변환행렬의 요소 \underline{u} 의 값은 다음과 같이 구해진다.

$$(\alpha', \beta', \gamma', dx', dy', dz')^T = (8.882e-16, -9.437e-16, -5.44e-15, 0.05, 0.05, -5.329e-15)^T \quad (53)$$

위의 결과는 기준좌표계의 x, y, z 축에 대한 물체좌표계의 회전 각 $(\alpha', \beta', \gamma')$ 의 결과값이 모두 '0'에 매우 근접한 결과를 보이며, 기준좌표계의 원점으로 부터의 물체좌표계의 원점까지의 거리를 나타내는 병진벡터의 성분 (dx', dy', dz') 역시 $(0.05, 0.05, 0)$ 에 매우 근접한 결과값을 가진다. 즉, 알고리즘에 의해 얻어진 결과값은 매우 정확한 결과를 보여준다.

다음은 회전운동 후 컨테이너의 절대좌표 및 자세를 알기 위해 변환행렬의 요소 \underline{u} 의 값을 구해보기로 한다. 계산을 간단히 하기위해 Fig. 8(b)와 같이 센서를 설치하고 측정하는 경우에 대해 결과값을 살펴보기로 한다. 랜딩 가능한 허용오차범위(5cm)에 의해 주어지는 z 축에 대한 회전 허용 한계값은 \sin 함수를 이용하여 $0.25^\circ(0.004363\text{rad})$ 가 됨을 알 수 있다. z 축에 대해 0.25° 회전한 경우 센서에 의해 측정되어지는 측정점의 데이터와 이 값에 의해 구해지는 변환행렬의 요소 \underline{u} 는 다음과 같다.

$$1'(r_{x_1}', r_{y_1}', r_{z_1}')^T = (6, 6\tan 0.25^\circ, 0)^T \quad (54)$$

$$2'(r_{x_2}', r_{y_2}', r_{z_2}')^T = (-1.2\tan 0.25^\circ, 1.2, 0)^T \quad (55)$$

$$3'(r_{x_3}', r_{y_3}', r_{z_3}')^T = (0, 0, -1.2)^T \quad (56)$$

$$(\alpha', \beta', \gamma', dx', dy', dz')^T = (0.004363, 0, 0, 0, -1.735e-18, -1.735e-18)^T \quad (57)$$

위의 결과값은 rad의 단위를 가지는 값으로, 회전에 대한 결과 역시 매우 정확한 결과를 보여준다. 따라서 실제 하역현장에서 쓰여지는 랜딩 가능한 허용오차범위를 본 논문의 알고리즘에 의해 얻어지는 결과에 그대로 적용하여도 무난할 것이다.

일반적으로 선형화에 의한 오차는 파라미터 값들이 Operating point와 차이가 클수록 오차는 증가한다. 선형화되어진 알고리즘을 컨테이너크레인에 적용할 경우, 앞의 결과와 같이 랜딩 가능한 허용오차범위가 컨테이너의 실제 크기에 비해 매우 작은 값이다. 따라서 이 범위 내에서 발생하는 알고리즘에 의한 오차

는 매우 작은 값을 보여주므로 본 논문의 알고리즘을 컨테이너크레인에 적용할 경우 만족스러운 결과를 얻을 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 레이저슬릿광센서를 이용하여 컨테이너크레인의 스프레더의 절대위치를 측정하기 위한 알고리즘을 제시하였다. 먼저 트롤리와 스프레더를 연결하는 줄의 길이를 측정함으로써 호이스팅 되어지는 스프레더의 높이를 측정한다. 하역 시 컨테이너와 AGV간의 간격이 0.2m, 선적 시 스프레더와 컨테이너간의 간격이 0.2m가 되면 호이스팅을 멈추게 하여 스프레더의 절대위치를 검출하기위한 측정을 한다. 3개의 레이저 슬릿광센서로 스프레더의 코너점을 측정하여 물체좌표계와 기준좌표계간의 변환행렬을 구함으로써 물체의 3차원 좌표 및 자세를 나타낼 수 있었다. 하지만 강한 비선형성으로 인하여 해석적인 해를 구하지 못하였고, 선형화하여 근사해를 구하였다. 따라서 본 알고리즘의 적용 시 선형화에 의해 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차는 수치예제를 통해 랜딩 가능한 허용오차범위 내에서 아주 작은값을 가짐을 보였다. 이 결과를 바탕으로 실제 항만에 본 논문의 알고리즘을 적용 시 만족할만한 성능을 얻을 수 있을 것으로 예상되며, 슬릿광센서가 다른 레이저센서에 비해 저가임을 고려해볼 때 비용적인 측면에서도 유리하다.

본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하면 컨테이너크레인에 스프레더의 절대좌표를 검출할 수 있고, 검출된 좌표와 기준좌표의 차를 이용하여 그 값이 오차범위보다 작을 때 도킹이 가능하므로 이는 컨테이너크레인의 완전자동화에 응용할 수 있다. 본 연구에서는 AGV가 지면에 정지한 후 기준좌표계에 대하여 그 위치를 알 수 있다고 가정하였지만, 실제로는 AGV가 항상 정확한 위치에 정지하지 않기 때문에 추후 연구를 통해서 AGV가 고정되지 않고 저속으로 움직일 때에도 자동랜딩을 하기 위해 어떤 알고리즘이 추가되어야 하는지에 대해 알아볼 것이다.

후 기

본 논문은 2007년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지방연구중심대학육성사업/차세대물류IT기술연구사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- 김정관, 한명철 (1999). "2-D 슬릿광 비전센서를 이용한 물체의 자세측정", 한국정밀공학회지, 제16권 제12호, pp 133-142.
- 박병석, 권달안, 윤지섭 (1999). "크레인 자동화를 위한 물체 위치측정 알고리즘 개발", 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제5호, pp 829-838.
- 신효필, 이종광, 강이석 (2000). "비전센서를 이용한 유연한 로봇 팔의 끝점 위치 측정", 제어·자동화·시스템공학논문지, 제6

권 제8호, pp 682-688.

이형록, 김재훈 (1994). "무인 컨테이너 적재를 위한 소프트웨어 및 컨테이너 인식방법", '94 한국자동제어학술회의논문집, pp 1155-1160.

홍금식, 한명철, 윤중선, 이석 (1996). "차체의 위치보정에 관한 연구: Perceptron 시스템의 분석 및 P4000 시스템을 통한 알고리즘의 구현", 부산대학교 기계기술연구소 보고서, pp 146.

Åström, K. J. and Wittenmark, B. (1984). *Computer Controlled Systems: Theory and Design*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kunimitsu, S., Asama, H., Kawabata, K. and Mishima, T. (2002). "Measuremet of Relative Position between Spreader and Target Container with Image Processing", The 2002 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computer and Communications, pp 1224-1227.

Nilsson, A. and Hilmborg, P. (1994). "Combining a Stable 2D Vision Camera and an Ultrasonic Range Detector for 3D Position Estimation", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 43, No 2, pp 272-276.

Reimark, K. and Rogery, Y. (1988). "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology", IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, Vol 10, No 5, pp 713-720.

Tsai, L. W. (1999). *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, Wiley-Interscience, New York.

부 록

$$k_{110} = x_{a1} - \frac{(x_{b1} - x_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{111} = \frac{(y_{b1} - y_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})} - \frac{(x_{b1} - x_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(b_1 x_{a1} - a_1 y_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(b_1(x_{b1} - x_{a1}) - a_1(y_{b1} - y_{a1}))] - y_{a1}$$

$$k_{112} = \frac{-(z_{b1} - z_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})} - \frac{(x_{b1} - x_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(a_1 z_{a1} - c_1 x_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(-c_1(x_{b1} - x_{a1}) + a_1(z_{b1} - z_{a1}))] + z_{a1}$$

$$k_{113} = \frac{-(x_{b1} - x_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(c_1 y_{a1} - b_1 z_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(c_1(y_{b1} - y_{a1}) - b_1(z_{b1} - z_{a1}))]$$

$$k_{114} = 1 - \frac{a_1(x_{b1} - x_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{115} = \frac{-b_1(x_{b1} - x_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{116} = \frac{-c_1(x_{b1} - x_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{120} = y_{a1} - \frac{(y_{b1} - y_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{121} = \frac{-(x_{b1} - x_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})} - \frac{(y_{b1} - y_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(b_1 x_{a1} - a_1 y_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(b_1(x_{b1} - x_{a1}) - a_1(y_{b1} - y_{a1}))] + x_{a1}$$

$$k_{122} = \frac{-(y_{b1} - y_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(a_1 z_{a1} - c_1 x_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(a_1(z_{b1} - z_{a1}) - c_1(x_{b1} - x_{a1}))]$$

$$k_{123} = \frac{(z_{b1} - z_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})} - \frac{(y_{b1} - y_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(c_1 y_{a1} - b_1 z_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(c_1(y_{b1} - y_{a1}) - b_1(z_{b1} - z_{a1}))] - z_{a1}$$

$$k_{124} = \frac{-a_1(y_{b1} - y_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{125} = 1 - \frac{b_1(y_{b1} - y_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{126} = \frac{-c_1(y_{b1} - y_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{130} = z_{a1} - \frac{(z_{b1} - z_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{131} = \frac{-(z_{b1} - z_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(b_1 x_{a1} - a_1 y_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(b_1(x_{b1} - x_{a1}) - a_1(y_{b1} - y_{a1}))]$$

$$k_{132} = \frac{(x_{b1} - x_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})} - \frac{(z_{b1} - z_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(a_1 z_{a1} - c_1 x_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(a_1(z_{b1} - z_{a1}) - c_1(x_{b1} - x_{a1}))] - x_{a1}$$

$$k_{133} = \frac{-(y_{b1} - y_{a1})(a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})} - \frac{(z_{b1} - z_{a1})}{[a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})]^2} \cdot [(c_1 y_{a1} - b_1 z_{a1})(a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})) - (a_1 x_{a1} + b_1 y_{a1} + c_1 z_{a1} + d_1)(c_1(y_{b1} - y_{a1}) - b_1(z_{b1} - z_{a1}))] + y_{a1}$$

$$k_{134} = \frac{-a_1(z_{b1} - z_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{135} = \frac{-b_1(z_{b1} - z_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

$$k_{136} = 1 - \frac{c_1(z_{b1} - z_{a1})}{a_1(x_{b1} - x_{a1}) + b_1(y_{b1} - y_{a1}) + c_1(z_{b1} - z_{a1})}$$

센서2, 센서3에 대해서도 같은 방법으로 k 를 전개할 수 있다.

2007년 3월 5일 원고 접수

2007년 7월 4일 최종 수정본 채택