



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

광 변위센서를 사용한 선체 청소로봇의 위치추정 시스템 개발

Development of the position estimation system of the hull
cleaning robot using the optical displacement sensor



指導教授 吳 珍 錫

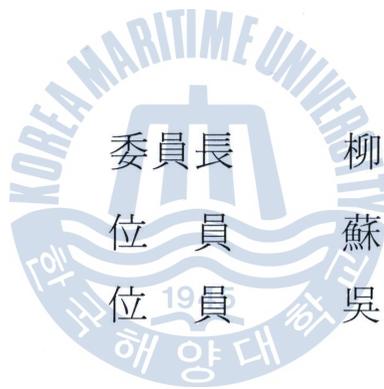
2013年 8月

韓國海洋大學校 大學院

메카트로닉스공학과

姜 勳

本 論 文 을 姜 勳 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .



委 員 長 柳 熙 漢
位 員 蘇 明 玉
位 員 吳 珍 錫



2013 年 6 月 7 日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Nomenclatures	vi
Abstract	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	5
1.3 연구내용 및 구성	6
제 2 장 선체 청소로봇 시스템	7
2.1 선체 청소로봇 운용환경	7
2.2 선체 청소로봇 시스템 구성	8
2.2.1 선체 청소로봇 구조	8
2.2.2 청소로봇 지원 장치	9
2.3 선체 청소로봇의 주행특성	11
제 3 장 위치추정 알고리즘	13
3.1 위치추정 개요	13
3.2 평면상에서의 위치추정 알고리즘	14
제 4 장 위치추정 시스템 설계	20
4.1 광 변위센서	20
4.1.1 광 변위센서 개요	20
4.1.2 광 변위센서의 동작 특성	24
4.1.3 광 변위센서 교정	30
4.2 위치추정 시스템 구성	33

제 5 장 실험 및 분석	39
5.1 위치추정 실험	39
5.2 위치추정 실험 결과	42
제 6 장 결 론	50
참고문헌	52
감사의 글	57



List of Tables

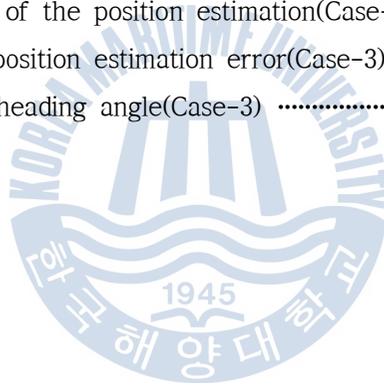
Table 1.1 Estimated savings due to selected measures applied to various types of ships	2
Table 2.1 Specifications of the hull cleaning robot	9
Table 4.1 Specifications of the optical sensor	22
Table 4.2 Specifications of the linear stage	26
Table 4.3 Average sensitivity according to the surface type	30
Table 5.1 Experimental conditions for position estimation	42
Table 5.2 Experimental results of position estimation to the five cases	49



List of Figures

Fig 1.1 Conventional hull cleaning method	3
Fig 2.1 Hull surface conditions	7
Fig 2.2 Hull cleaning robot structures	9
Fig 2.3 Support units for the hull cleaning robot	10
Fig 2.4 Entire system configuration of the hull cleaning robot system	11
Fig 2.5 Ideal moving path of the hull cleaning robot	12
Fig 2.6 Drive motion of the hull cleaning robot	12
Fig 3.1 Schematic diagram of the dead reckoning	14
Fig 3.2 Kinematic model for position estimation algorithm on the 2-D plane	16
Fig 3.3 Linear algebraic calculation of the position estimation algorithm using the Maple 15	17
Fig 4.1 Photograph of the optical displacement sensor for 2-axis translational motion measurement	21
Fig 4.2 Optical sensor and its operation principle	21
Fig 4.3 SPI communication procedures for motion data acquisition	23
Fig 4.4 Motion data acquisition via SPI communication	24
Fig 4.5 Experimental apparatus for performance test of the optical displacement sensor under the various conditions	25
Fig 4.6 Optical displacement sensor performance test program	26
Fig 4.7 Motor drive control program for the linear stage	27
Fig 4.8 Effect of the measurement direction on the sensitivity	28
Fig 4.9 Effect of the speed on the sensitivity	29
Fig 4.10 Effect of the acceleration on the sensitivity	29
Fig 4.11 Effect of the height on the sensitivity	29
Fig 4.12 Measurements of the displacement after calibration	33
Fig 4.13 Schematic diagram of the position estimation system	34
Fig 4.14 Data flow in the position estimation process	35
Fig 4.15 Circuit diagram of the data acquisition board	36
Fig 4.16 Circuit diagram of the optical displacement sensor	36

Fig 4.17 Prototype PCB drawings	37
Fig 4.18 Photographs of the manufactured prototype PCB	37
Fig 4.19 Photographs of the data acquisition system with ZigBee network	37
Fig 4.20 Graphical user interface screen of the position estimation program	38
Fig 4.21 Source code of the position estimation program	38
Fig 5.1 Comparison between the hull cleaning robot and the scale model	40
Fig 5.2 Configuration of the scale model for position estimation experiments	41
Fig 5.3 Experimental result of the position estimation(Case-1)	44
Fig 5.4 Histogram of the position estimation error(Case-1)	44
Fig 5.5 Estimation of the heading angle(Case-1)	45
Fig 5.6 Experimental result of the position estimation(Case-2)	46
Fig 5.7 Histogram of the position estimation error(Case-2)	46
Fig 5.8 Estimation of the heading angle(Case-2)	47
Fig 5.9 Experimental result of the position estimation(Case-3)	48
Fig 5.10 Histogram of the position estimation error(Case-3)	48
Fig 5.11 Estimation of the heading angle(Case-3)	49



Nomenclatures

- \mathbf{xy} : 절대좌표계(absolute coordinate system)
 \mathbf{XY} : 상대좌표계(relative coordinate system)
 $\mathbf{X}_R\mathbf{Y}_R$: 선체 청소로봇 내의 상대좌표계
 $\mathbf{X}_O\mathbf{Y}_O$: 광 변위센서의 상대변위 측정 좌표계
 C : 선체 청소로봇의 기하학적 중심의 위치
 ϕ : 주행 방향각 [rad]
 \mathbf{P}_{ICR} : 순간회전중심 위치벡터(position vector)
 R : 순간회전중심에 대한 선체 청소로봇의 주행 회전반경 [m]
 $\delta\theta$: 순간회전중심에 대한 선체 청소로봇의 회전각도 [rad]
 A_X : 선체 청소로봇의 중심에 대한 \mathbf{X}_R 축 광 변위센서 설치위치 [m]
 A_Y : 선체 청소로봇의 중심에 대한 \mathbf{Y}_R 축 광 변위센서 설치위치 [m]
 $\mathbf{R}(\theta)$: z축 방향으로 θ 만큼 좌표계를 회전시키는 회전형렬(rotation matrix)
 θ : 상대좌표계의 z축 방향 회전각도 [rad]
 X_{i0} : 광 변위센서로 측정한 교정 전 \mathbf{X}_O 축 방향 이동변위 [m]
 Y_{i0} : 광 변위센서로 측정한 교정 전 \mathbf{Y}_O 축 방향 이동변위 [m]
 X_o : 광 변위센서로 측정한 교정 후 \mathbf{X}_O 축 방향 이동변위 [m]
 Y_o : 광 변위센서로 측정한 교정 후 \mathbf{Y}_O 축 방향 이동변위 [m]
 ψ : 선체 청소로봇 상대좌표계 기준의 광 변위센서 설치각도 [rad]
 μ : 절대좌표계 기준의 광 변위센서의 위치각도 [rad]
 X_c : 광 변위센서로 측정한 \mathbf{X}_O 축 방향 이동변위 [count]
 Y_c : 광 변위센서로 측정한 \mathbf{Y}_O 축 방향 이동변위 [count]
 K : 교정계수(calibration factor)
 C_{ax} : 측정방향 계수
 C_{sp} : 속도 계수
 C_{ac} : 가속도 계수
 C_{sf} : 표면 재질 계수

- R_0 : 광 변위센서에서 설정된 초기 해상도 [counts/inch]
 S_{avg} : 측정방향에 대한 평균 민감도 [counts/inch]
 S_{ax} : 해당 축 방향에 대한 평균 민감도 [counts/inch]
 S_{sp} : 광 변위센서가 운용되는 속도영역에 대한 평균 민감도 [counts/inch]
 S_{ac} : 해당 가속도영역에 대한 평균 민감도 [counts/inch]
 S_{sf} : 대상 표면 재질에 대한 평균 민감도 [counts/inch]
 K_X : 광 변위센서의 X_0 축 방향에 대한 교정계수
 K_Y : 광 변위센서의 Y_0 축 방향에 대한 교정계수
 R_{MX} : 광 변위센서의 특성을 반영한 X_0 축 방향 수정해상도 [counts/inch]
 R_{MY} : 광 변위센서의 특성을 반영한 Y_0 축 방향 수정해상도 [counts/inch]



Development of the position estimation system of the hull cleaning robot using the optical displacement sensor

Kang, Hoon

Department of Mechatronics Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

An industrial robot has been applied on the hull cleaning method to enhance an operational efficiency of entire cleaning process. Especially, autonomous robotic system is necessary for more efficient cleaning hull cleaning and the position estimation system is indispensable part in this system. Position estimation system of the hull cleaning robot, therefore, was studied for the autonomous hull cleaning process in this paper. Conventional position estimation method with rotary encoders is unsuitable for the hull cleaning robot on account of slippage between the robot wheel and the hull surface. Thus, a novel position estimation system using optical displacement sensors was suggested to solve this problem.

Operation environments and drive characteristics of the hull cleaning robot were analyzed to design the position estimation system effectively. Reflecting the results of the analysis, a position estimation algorithm which

based on the dead reckoning and instantaneous center of rotation theory was developed. Performance test of the optical displacement sensor that measures the relative displacement with a contact-free optical sensor was implemented to find out the output characteristics according to the operating conditions including direction, speed, acceleration, height and surface type. In the position estimation system, two optical displacement sensors were used to reduce the measurement error and also data selection algorithm which choose more sensitive one in the two measured data was added to error reduction method. Furthermore, the monitoring PC operates the graphical based position estimation program that contains the position estimation algorithm. Consequently, the results of the position estimation are able to be displayed on the user interface screen in real-time and save on the database simultaneously.

The developed position estimation system was mounted on the scale model mobile robot which has an identical drive method with hull cleaning robot for experiments because the large scale support units, operation cost, high electric power, wide test area are required to operate the real hull cleaning robot. Experimental results demonstrate that the proposed position estimation system with the optical displacement sensors is more accurate compared to conventional system using rotary encoders.

KEY WORDS: Position estimation system 위치추정 시스템; Hull cleaning robot 선체 청소로봇; Optical displacement sensor 광 변위센서; Dead reckoning 추측항법; Instantaneous center of rotation 순간회전중심

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

선박은 대량의 자원을 가장 효과적으로 운반할 수 있는 이동수단으로 전 세계적으로 다양한 수송 분야에 활용되고 있다. 이러한 선박들은 화석연료를 사용하여 추진하기 때문에 화석연료의 가격변동에 민감한 특징을 가지고 있으며, 최근 화석연료의 가격이 급격히 상승함에 따라 운항 중 에너지효율을 높여 운용비를 줄이려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 선박은 소비되는 에너지 중에 추진기관에서 소비되는 에너지가 전체 에너지소비에 대부분을 차지할 정도로 추진 계열에 대한 에너지 소비가 큰 특징을 가지고 있다. 따라서 선박의 운항 중 에너지효율을 높이기 위해서는 추진 계열에서 소비되는 에너지를 반드시 줄여야 한다.

선박의 추진 에너지 절감을 위해서는 선박의 형상을 변경하여 저항을 줄이는 방법이 가장 효과적이지만 이는 향후 새로 건조될 선박에만 적용가능하며 현재 운용중인 선박에는 적용이 불가능하다. 현재 운용중인 선박의 운항 에너지를 절감하기 위한 방안은 선체 표면 청소, 프로펠러 청소 및 연마, 선체 코팅 개선 등과 같은 많은 방법들이 존재하며[1], 이러한 방법들을 통한 비용절감 효과는 다음의 표 1.1과 같다. 운항 에너지 절감을 위해 적용되는 다양한 방법들 중 선체 청소(hull cleaning)는 운용비 절감에 있어서 큰 영향을 주지는 않는다. 하지만 선체 청소로 인한 추진저항 감소는 직접적인 운용비 절감효과 이외에도 프로펠러, 추진 엔진, 추진축 등의 추진체계의 과부하를 줄여주기 때문에 간접적으로 선박의 유지보수비용을 절감하는데 도움을 줄 수 있다.

Table 1.1 Estimated savings due to selected measures applied to various types of ships (Wartsila, 2008 cited in [1])

Ship Type	Tanker	Container	Ro-Ro	Ferry
Efficiency measures				
Hull cleaning	< 3%	< 2%	< 2%	< 2%
Propeller clearing and polishing	< 10%	< 10%	< 10%	< 10%
Modern hull coatings	< 9%	< 9%	< 5%	< 3%
Propeller efficiency measurement	< 2%	< 2%	< 2%	< 2%
Constant versus variable speed operation	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%

선박은 선체 하부 표면이 바닷물과 접촉하여 이동하는 구조물이기 때문에 추진에 있어서 선체 표면과 바닷물 간의 마찰에 직접적인 영향을 받으며, 필연적으로 바다생물이 선체 표면에 부착하여 자라게 된다. 이러한 생물부착(bio-fouling)은 선체 표면과 바닷물 간에 마찰력을 증가시켜 추진저항을 증대시킬 뿐만 아니라 해양 생물들을 강제로 이동시켜 해양 생태계를 교란시키기도 한다 [1-4]. 선체 표면의 생물부착을 방지하기 위한 방법으로 생물부착 방지 페인트(anti-fouling paint), 특수 저 마찰 코팅(special low friction coating) 등이 개발되어 왔으나 생물부착 속도를 느리게 하거나 부착량을 줄이는 효과를 줄 뿐 근본적으로 생물부착을 방지하지는 못한다. 따라서 생물부착으로 인한 문제점들을 해결하기 위한 가장 확실한 방법은 주기적으로 선체 표면을 청소하는 것이며, 그림 1.1과 같이 일반적으로 건조도크(dry dock)에서 다수의 작업자들이 워터제트(water-jet)분사 기구와 브러시(brush) 등의 수공구를 사용하여 선체 표면에 부착된 생물들을 제거하는 방법을 사용해 왔다.

현재 운용되고 있는 선박들은 대형화되어 있기 때문에 작업자들이 수공구를 사용하여 선체 표면을 직접 청소하는 기존의 방식에서는 사다리차를 이용한 고소작업(high place work)이 대부분이며, 이로 인해 작업자들은 항상 위험한 작

업환경에 노출되어 왔다. 더불어, 이러한 작업방법은 작업 중에 발생하는 잔여물(분진, 생물잔해, 독성 페인트 잔해 등)에 작업자들이 직접적으로 노출되기 때문에 작업자의 건강에 해로운 영향을 끼칠 위험이 높다[2,5]. 그러므로 작업자들의 작업 안전과 건강을 위해 기존의 선체 청소방법을 개선할 필요가 있으며, 이를 위해 근래에는 산업용 로봇을 활용하는 선체 청소방법이 연구되어 왔다. 산업용 로봇은 작업자를 전적으로 대신하기 때문에 높은 작업 안정성을 확보할 수 있으며, 빠르고 정확하게 청소가 가능하기 때문에 소수의 로봇만으로도 다수의 작업자를 대체할 수 있다. 따라서 시간과 비용측면에서 효과적으로 선체를 청소할 수 있는 최고의 방법이라고 할 수 있다[6].



Fig. 1.1 Conventional hull cleaning method

최근에는 산업용 로봇을 활용하여 선체 표면을 청소하는 것을 넘어서 작업자가 직접 로봇을 조작하지 않고 자율적으로 로봇이 선체 표면을 주행하면서 청소작업을 수행하는 방법도 연구되고 있다. 이러한 청소작업 자동화는 로봇의 운용을 위해 필요한 인력도 절약할 수 있기 때문에 보다 효과적으로 선체 청소작업을 수행할 수 있다. 선체 청소작업의 자동화를 구현하기 위해서는 로봇이 전체영역 경로계획 알고리즘(coverage path planning algorithm)을 사용하여 정해진 작업영역에 대해 자동으로 청소경로를 생성할 수 있어야 하며[7], 다양한

위치추정 방법을 통해 선체 위에서 스스로의 위치를 인식하면서 정해진 경로에 따라 움직일 수 있어야 한다. 특히, 로봇이 선체 위를 주행하면서 스스로의 위치를 인식하기 위한 위치추정 방법은 이러한 자율주행 분야에서 가장 핵심적인 기술이며, 최적화된 기술구현을 위한 연구가 계속되고 있다.

산업용 로봇이 자율적으로 선체 표면을 청소하기 위한 위치추정 기술은 미리 알려진 정확한 위치에 설치된 센서들을 기준으로 로봇의 위치를 추정하는 방법과 로봇 자체에 탑재된 센서들로부터 상대적인 이동변위를 측정하여 위치를 추정하는 방법으로 분류할 수 있다. 전자의 경우 GPS(Global Positioning System)을 활용한 차량 네비게이션 시스템(navigation system)이 대표적이며, 후자의 경우 ARS(Attitude Reference System), IMU(Inertial Measurement Unit) 등을 활용한 추측항법(dead reckoning)이 대표적이다. 산업용 로봇에 적용 가능한 가장 간단한 위치추정 방법은 회전 엔코더(rotary encoder)를 사용하여 차륜(wheel)의 회전수를 측정하여 로봇의 위치를 계산하는 방법이며, 이는 일종의 추측항법이다[7-9]. 이러한 회전 엔코더 기반의 위치추정 방법은 단순히 엔코더만으로 위치를 추정하기 때문에 시스템 구성이 간단하지만, 로봇의 차륜과 지면 간에 미끄러짐(slippage)이 발생할 경우 정확한 위치추정이 불가능한 단점이 있다[8-12]. 또한, 추측항법의 가장 큰 단점인 오차를 축적하는 특징을 가지므로 작은 오차 발생으로도 전체 위치추정 정확도가 급격히 저하될 수 있다[8-11].

선체 표면을 청소하는 로봇은 진공압력, 전자기력 등과 같은 물리적인 힘을 사용하여 선체 표면 위에 부착되므로 이러한 수직방향의 누르는 힘으로 인해 차륜에 마찰력이 발생하며, 부착을 위한 힘이 저하될 경우 차륜과 선체 표면 사이에 미끄러짐이 발생하게 된다. 더불어, 선체 표면이 미끄러운 상태이거나 굴곡이 있는 경우에는 미끄러짐 현상이 더욱 빈번히 발생하게 된다. 그러므로 선체 표면을 청소하는 산업용 로봇의 위치추정에는 회전 엔코더 기반의 위치추정 방법은 적합하지 못하며, 차륜과 선체 표면사이의 미끄러짐에 영향을 받지 않는 새로운 위치추정 방법이 필요하다. 본 논문에서는 차륜과 지면의 미끄러짐에 상관없이 로봇의 위치를 추정할 수 있는 비접촉식 광 변위센서와 추측항법을 기반으로 하는 위치추정 시스템을 개발하여 선체 청소로봇의 위치를 추정하고자 한다.

1.2 연구동향

로봇이 선체 표면을 청소하기 위해서는 로봇 자체가 선체 표면에 달라붙어 선체 청소 장치를 구동하면서 주행할 수 있어야 한다. 기존의 연구에서 사용된 선체와 같은 벽면을 주행하기 위한 로봇의 부착(adhesive)방법은 크게 자력(magnetic force)을 이용하는 방법과 진공 흡입압력(vacuum suction pressure)을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다[12-18]. 이외에도 공기 팬(air fan)을 이용하는 방법, 그립 장치(gripping equipment)를 이용하는 방법, 생체모방 장치(biomimetic equipment)를 이용하는 방법 등이 있지만[13,14], 선체 청소를 위한 산업용 로봇에 적용하기에는 적합하지 않다.

선체를 주행하는 로봇의 경우, 선행 연구들에서는 주로 자력을 이용하는 방법[1-3,15-17]과 진공압력을 이용하는 방법[18,19]을 채택하였으며 자력을 이용하는 방법의 경우에는 영구자석(permanent magnet)이나 전자석(electro magnet)을 차륜 또는 특수한 장치에 적용하여 부착력을 생성하였다. 이러한 자력을 이용하는 방법은 비교적 쉬운 방법으로 부착력을 얻을 수 있고 부착력을 얻기 위한 초기 구동시간이 매우 짧다는 장점이 있으나, 비철금속(non-ferrous metal)과 같이 자성(magnetism)을 띠지 않는 재질에서는 부착력을 얻을 수 없고 감당할 수 있는 하중이 작다는 단점이 있다[13]. 반면에 진공압력을 이용하는 방법은 부착력을 얻기 위한 초기 구동시간이 길다는 단점이 있지만, 비교적 큰 하중을 견딜 수 있고 금속재료 이외에 비철금속이나 비금속 재질의 표면에서도 부착력을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 선체 청소 로봇을 선체 이외의 다양한 산업현장에 적용할 수 있도록 진공흡착 방식을 적용하였다.

로봇이 청소작업을 위해 평면 또는 곡면의 선체 표면을 주행할 때, 로봇의 현재위치를 추정하기 위한 방법은 비콘(beacon) 또는 위치기준 장치(position reference device)를 기반으로 하여 상대적인 위치를 파악하는 방법, 로봇에 설치된 카메라로 주변사물을 관찰하는 방법, 영상을 통해 로봇의 움직임을 직접 촬영하는 방법 등과 같이 외부에 설치된 장치들을 바탕으로 위치를 추정하는 방법이 있다[20-24]. 대조적으로, 추측방법과 같이 외부에 설치된 장치 없이

로봇에 탑재된 센서들로부터 알려진 초기위치에서의 상대적인 움직임을 측정하여 위치를 추정하는 방법도 존재한다[8-12, 18, 22-25]. 앞서 언급한 외부에 설치된 장치를 사용하는 방법은 비교적 정확하게 로봇의 위치추정을 할 수 있지만 시스템 구성이 복잡하고 많은 장치들을 필요로 한다. 이와 비교하여 추측항법은 비교적 낮은 위치추정 정확도를 가지지만 간단한 시스템 구성과 소수의 센서들로 위치추정을 수행할 수 있다[9,10].

1.3 연구내용 및 구성

본 논문에서는 작업자를 대신하여 선체 표면을 청소하는 선체 청소로봇을 연구 대상으로 하며, 로봇이 자율적으로 선체 표면을 청소할 수 있도록 도와주는 위치추정 시스템을 연구한다.

본 논문은 총 6장으로 구성되어 있으며 각 장의 내용은 다음과 같다.

제 1 장에서는 선체 청소로봇의 위치추정 시스템에 대한 연구배경을 설명하고, 다양한 종류의 선행연구와 위치추정 방법에 대해 기술한다.

제 2 장에서는 위치추정 시스템을 개발하기 위하여 분석한 선체 청소로봇시스템의 운용환경, 구조, 시스템 구성, 주행특성에 대해 서술한다.

제 3 장에서는 추측항법을 사용하여 로봇의 위치를 추정하기 위한 위치추정 알고리즘에 대해 설명한다.

제 4 장에서는 광 변위센서의 동작특성을 파악하고 교정을 통해 최적화된 위치추정 시스템 설계에 대하여 서술한다.

제 5 장에서는 개발된 위치추정 시스템을 적용한 위치추정 실험과 실험결과에 대하여 설명한다.

제 6 장에서는 위치추정 실험결과를 토대로 위치추정 성능 개선방안과 향후 활용방안에 대하여 서술한다.

제 2 장 선체 청소로봇 시스템

2.1 선체 청소로봇 운용환경

본 논문에서 대상으로 하는 선체 청소로봇은 그림 2.1-(a)와 같이 생물부착이 진행된 선체표면을 직접적으로 청소하는 로봇이 아니라, 그림 2.1-(b)와 같이 부착된 생물들이 청소된 상태에서 도장 전처리 작업을 수행하는 로봇이다. 즉, 초기 청소작업에서 제거되지 못한 잔여 부착생물을 제거하고 선체 표면을 균일하게 가공하여 도장작업이 효과적으로 이루어 질 수 있도록 돕는 역할을 한다. 비록 직접적으로 부착된 생물을 제거하지는 않지만 도장작업을 위해 선체 표면을 깨끗이 처리해 주는 일종의 선체 청소로봇이라 할 수 있다.

선체 청소로봇이 적용되는 대상은 주로 대형 상선이며, 상선은 그림 2.1와 같이 선수(bow)와 선미(stern)를 제외한 거의 대부분의 영역이 평면 또는 곡률(curvature)이 낮은 면으로 구성되어 있다. 따라서 선체 청소로봇이 작업하는 영역의 대부분은 평면이거나 혹은 평면에 가까운 곡면이라고 할 수 있다.



Fig 2.1 Hull surface conditions

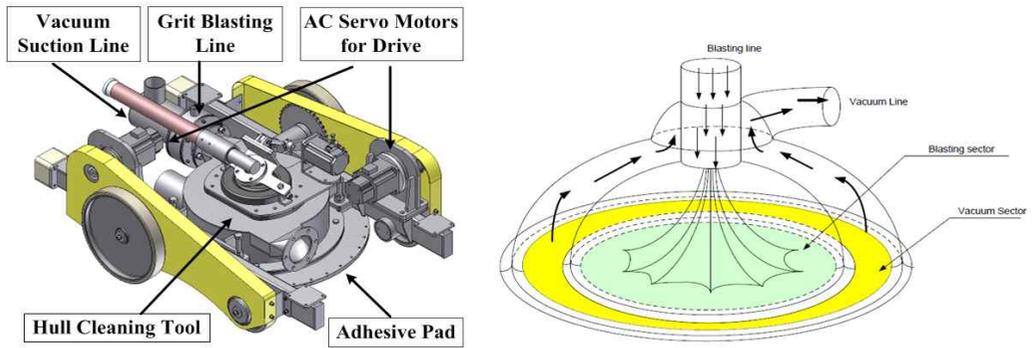
2.2 선체 청소로봇 시스템 구성

2.2.1 선체 청소로봇 구조

본 연구에서 대상으로 하는 선체 청소로봇은 그림 2.2-(a)와 같은 구조를 가지고 있으며, 곡면을 주행할 수 있도록 좌측과 우측 프레임(frame)이 관절에 의해 연결되어 있다. 선체 청소로봇은 크게 로봇 프레임(robot frame), 흡착 패드(adhesive pad), 선체 청소장치(hull cleaning tool) 그리고 구동을 위한 서보모터(servo motor)로 구성되어 있다. 로봇을 선체 표면에 부착시키기 위해서 앞서 언급했듯이 진공압력을 이용하며, 로봇 하부에 설치된 유연한 재질의 흡착 패드를 사용하여 외부의 진공 지원 장치를 통해 진공압력을 얻는다.

주행에 있어서는 로봇의 좌측과 우측의 차륜이 각각 체인에 의해 연결되어 있기 때문에 단 2대의 서보모터를 사용하여 주행 가능하다. 이러한 주행구조는 좌측과 우측 차륜의 회전속도를 다르게 하여 이동방향을 전환하는 미끄럼 조향(skid steering)을 사용한다. 미끄럼 조향을 사용함으로써 선체 청소로봇의 주행 장치를 간단하게 구성할 수 있으며, 조향(steering)을 위한 별도의 장치(차륜 각도변경을 위한 전동기)가 필요하지 않으므로 전동기 수를 최소화할 수 있어 로봇을 경량화 할 수 있다[27-30].

선체 청소를 위한 장치는 그림 2.2-(b)와 같이 외부에서 공급되는 연마재를 분사하고 이를 다시 진공 패드 내부에서 진공압력을 통해 회수할 수 있는 구조를 가지고 있다. 연마재 분사는 특수 노즐(nozzle)에 의해 이루어지며, 선체 표면의 좁은 영역만을 청소하기 때문에 일정한 범위 내에서 왕복운동을 하는 별도의 장치를 사용하여 넓은 영역을 청소할 수 있도록 구성되어 있다. 빈틈없는 청소작업을 위해 연마재 분사 구동장치는 정확한 속도로 구동되어야 하며, 소형 서보모터를 사용하여 움직임을 제어한다. 이와 같이 다양한 장치로 구성된 선체 청소로봇에 대한 상세한 사양은 표 2.1과 같다.



(a) robot configuration architecture (b) cleaning tool with a retrieval functionality

Fig 2.2 Hull cleaning robot structures

Table 2.1 Specifications of the hull cleaning robot

Parameters	Description
Adhesive type	vacuum suction adhesion
Dimensions	680 × 980 × 380[mm]
Weight	about 90[kg _f]
Cleaning speed (moving speed)	Max. 6[m/min]
Steering method	skid steering drive
Cleaning method	grit blasting and suction retrieval
Cleaning area width	about 400[mm]
Control method	manual

2.2.2 청소로봇 지원 장치

선체 청소로봇은 구조에서 알 수 있듯이 로봇 자체에 많은 장치들을 포함하지 않으며, 외부에서 선체 표면부착을 위한 진공압력과 청소를 위한 고압의 블라스팅 연마재를 공급받는다. 따라서 선체 청소로봇 자체만으로는 청소작업을 수행할 수 없으며 반드시 구동을 위한 외부의 지원 장치가 필요하다. 선체 청소로봇의 운용에 필요한 지원 장치는 진공 지원 장치, 블라스팅 지원 장치, 제어·모니터링 시스템이 있으며, 주요 지원 장치는 그림 2.3에 도시되어 있다.

진공 지원 장치는 로봇이 선체 표면에 부착될 수 있도록 진공압력을 공급하는 장치로 그림 2.3-(a)와 같이 대형 진공펌프로 구성된다. 진공 지원 장치는 로봇의 흡착 패드에 작용하는 진공압력이 약 -220mmHg 로 일정하게 유지될 수 있도록 진공압력을 적절히 공급하는 기능을 가지고 있으며, 선체 청소작업에 사용된 연마재를 수거하는 역할을 한다. 블라스팅 지원 장치는 선체 청소로봇에서 높은 압력으로 연마재를 분사할 수 있도록 진공압력을 사용하여 연마재를 공급하며, 사용된 연마재를 재가공하여 공급하는 역할을 한다. 블라스팅 지원 장치를 통해 선체 청소로봇에 공급되는 연마재의 분사압력은 약 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이며, 이를 사용하여 선체 표면을 SA2.5 등급(스웨덴 규격협회 표면조도 기준)으로 처리한다. 이와 더불어 선체 청소로봇의 주행제어, 청소작업 제어, 진공 지원 장치와 블라스팅 지원 장치 제어, 그리고 상태 모니터링을 위하여 제어·모니터링 시스템이 필요하다. 선체 청소로봇, 진공 지원 장치, 블라스팅 지원 장치, 제어·모니터링 시스템으로 구성된 선체 청소로봇 시스템의 전체 구성은 그림 2.4와 같으며, 서로 유기적으로 연결되어 운용된다.

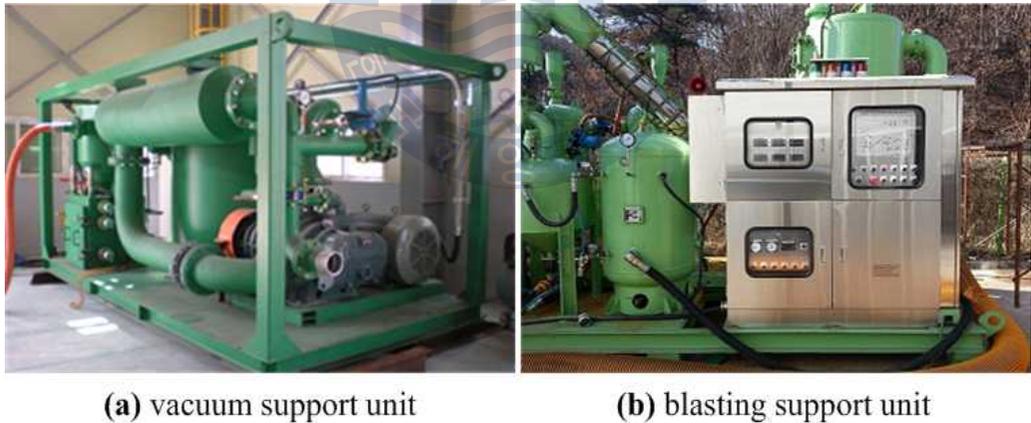


Fig 2.3 Support units for the hull cleaning robot

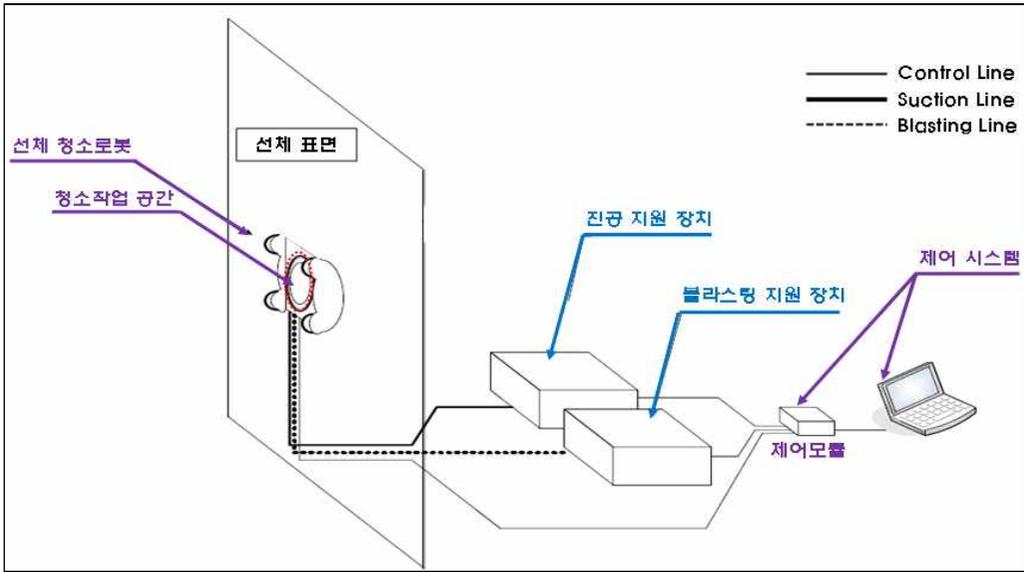


Fig 2.4 Entire system configuration of the hull cleaning robot system

2.3 선체 청소로봇의 주행특성

선체 청소로봇은 주로 평면 또는 곡률이 작은 선체 표면 위를 주행하므로 로봇의 주행시스템은 평면상의 움직임에 적합하도록 설계되어 있다. 선체 청소로봇이 정해진 선체 영역에 대해 청소작업을 효과적으로 수행하기 위해서는 그림 2.5와 같이 최대한 많은 직선경로를 주행하고 방향전환을 최소화하여 전체 영역을 청소하는 것이 바람직하다. 그러므로 선체 청소로봇은 직선주행(straight drive)과 제자리 방향전환(point turn)을 활용하여 주로 움직이게 되고, 곡면이 변화하는 영역 혹은 차륜이 부분적으로 미끄러지는 경우에는 대각선 주행(diagonal turn)을 사용한다. 이러한 세 가지 주행방법은 좌측과 우측 차륜의 회전속도 차이를 이용하는 미끄럼조향을 통해 구현되며, 그 움직임은 그림 2.6과 같다[30]. 좌측과 우측 차륜의 회전속도가 같고 동일한 방향으로 회전한다면 그림 2.6-(a)와 같이 로봇이 직선으로 움직이고, 회전속도는 같게 하되 회전방향이 반대라면 그림 2.6-(b)와 같이 제자리에서 회전한다. 그림 2.6-(c), (d)와 같은 대각선 주행은 선체 청소에 직접적으로 활용되지는 않지만 선체 청소로봇이 직선 움직임과 제자리 회전만으로 이동할 수 없는 경우에 유용하게 사용된다.

정리하면, 본 연구에서 대상으로 하는 미끄럼 조향을 사용하는 선체 청소로봇은 대부분의 경우 직선으로 움직이고 방향을 전환할 때만 제자리에서 회전하게 된다. 따라서 추측항법을 사용하여 로봇의 위치를 추정하기 위해서는 로봇의 직선방향 움직임을 정확히 측정할 수 있어야 하며, 이와 더불어 로봇의 주행 방향변화를 정확하게 인식할 수 있어야 한다.

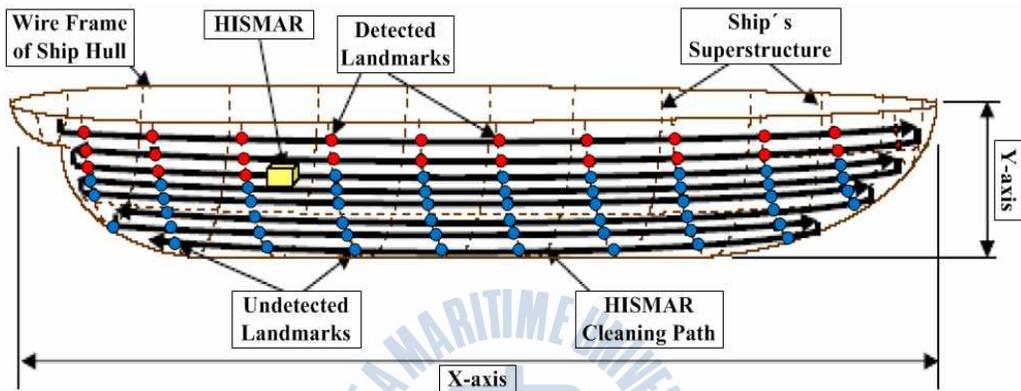


Fig 2.5 Ideal moving path of the hull cleaning robot [30]

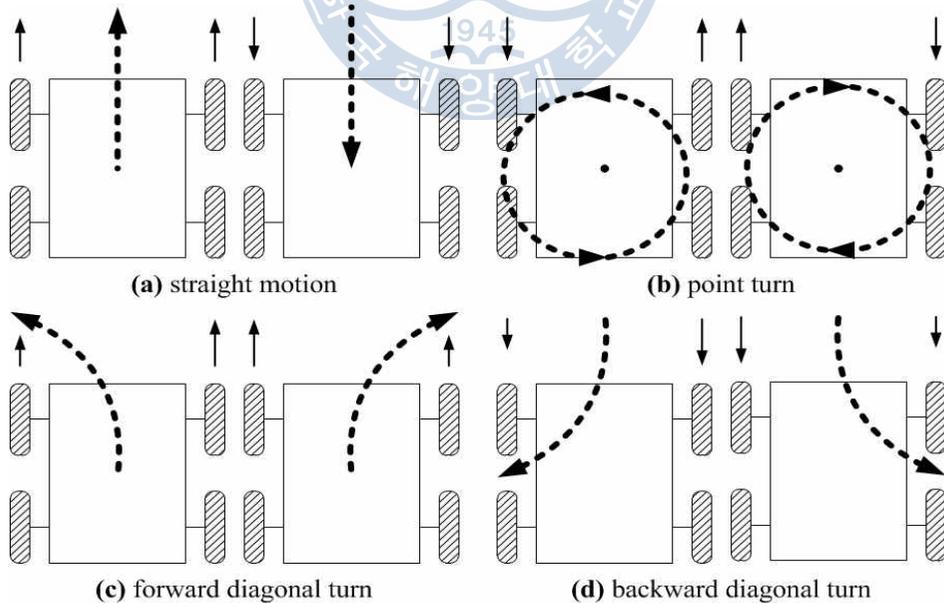


Fig 2.6 Drive motion of the hull cleaning robot

제 3 장 위치추정 알고리즘

3.1 위치추정 개요

선체 청소로봇은 대부분 평면상에서 청소작업을 수행하고 미끄럼 조향을 사용하여 주행하기 때문에 이미 언급한 바와 같이 추측항법을 사용하여 위치를 추정하기 위해서는 직선방향 움직임과 주행 방향변화를 정확하게 알아야 한다. 따라서 높은 정확도(accuracy)로 이동변위(displacement)를 측정할 수 있는 주행 거리 측정 센서(odometry sensor)를 사용해야 하며, 측정된 이동변위를 기반으로 효과적으로 위치를 계산할 수 있는 위치추정 알고리즘이 필요하다.

위치추정 알고리즘은 광 변위센서(ODS, Optical Displacement Sensor)로부터 측정된 이동변위를 사용하여 로봇의 위치를 계산해내며, 추측항법을 사용한다. 추측항법이란 이전의 알려진 위치에서 이동변위를 추가하여 현재의 위치를 결정하는 일종의 운항(navigation) 방법이다. 일반적으로 선박이나 항공기의 위치를 계산하는데 사용되어 왔으며, 현재에는 기상문제로 인해 GPS가 동작하지 않을 때 고 정밀 관성항법장치를 활용하여 대략적인 위치를 계산하기 위해 사용된다. 추측항법은 그림 3.1-(a)과 같이 이전의 위치(previous position)에서 로봇 내부에 설치된 센서들로부터 상대적인 위치변화를 측정하여 이를 반영함으로써 현재의 위치(current position)를 추정한다[32]. 추정된 현재의 위치는 다시 이전 위치가 되고, 새롭게 취득된 광 변위센서의 데이터로 위치 변화를 계산하여 연속적으로 경로를 추정한다[8,10,20,25]. 다만, 이러한 경로 추정과정은 이전에 산정된 경로가 이후의 경로를 결정하는데 영향을 미치기 때문에 경로추정 과정에서 발생된 오차(error)가 점차 축적되는 단점이 있다.

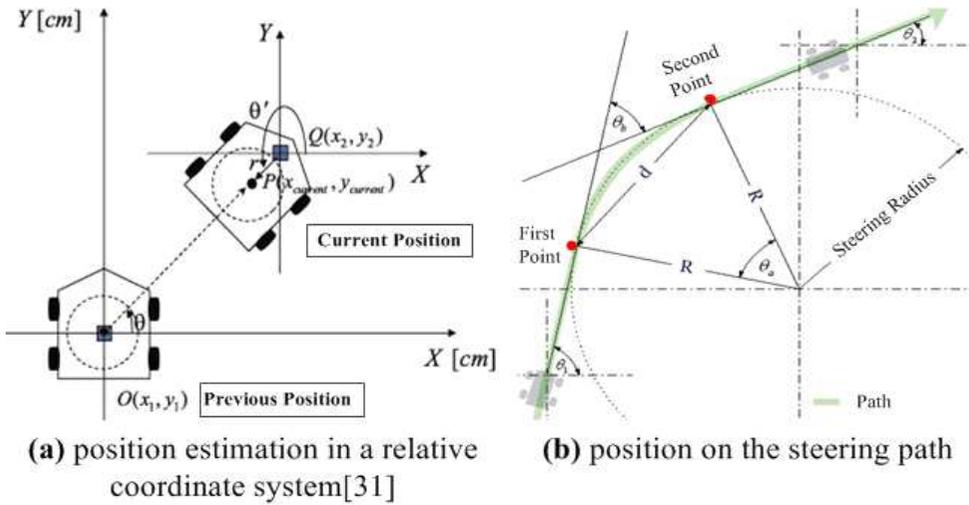


Fig 3.1 Schematic diagram of the dead reckoning

본 연구에서는 추측항법의 원리를 사용한 위치추정 알고리즘을 사용하여 선체 청소로봇의 위치를 추정하며, 위치추정 알고리즘에서 이전 위치에 대한 현재의 위치정보를 얻는 수단으로 광 변위센서를 사용한다. 광 변위센서를 통해서 로봇 차륜의 미끄러짐에 상관없이 선체 청소로봇의 이동변위를 정확하게 측정하고자 한다. 광 변위센서는 단순히 평면상의 직선 변위만을 측정하기 때문에 선체 청소로봇의 직선 이동변위와 주행 방향변화(회전)를 측정하기 위해서는 로봇의 회전중심에 설치되지 않은 1대의 광 변위센서를 사용해야 하며 [9,10,12,20,21], 본 논문에서 제안하는 위치추정 알고리즘은 오차 보정을 위해 2대의 광 변위센서에서 측정된 이동변위 데이터를 선택적으로 사용하여 선체 청소로봇의 위치를 추정한다.

3.2 평면상에서의 위치추정 알고리즘

추측항법을 기반으로 하는 선체 청소로봇의 위치추정 알고리즘은 이전의 위치정보에 측정된 이동변위를 추가함으로써 현재의 위치를 추정한다. 선체 청소로봇의 위치는 로봇 프레임의 기하학적 중심으로 나타낼 수 있으며, 로봇의 움직임이 최초로 시작되는 초기 위치를 절대좌표계(absolute coordinate system)의 원점으로 하여 이를 기준으로 추정된 위치를 표현한다. 본 연구에서 대상으로

하는 선체 청소로봇은 미끄럼조향을 사용하여 주행하기 때문에 위치추정 알고리즘에 이를 반영하여 미끄럼조향의 주행제어에 사용되는 순간회전중심(ICR, Instantaneous Center of Rotation) 이론을 적용하였다[27-30,32]. 순간회전중심 이론은 평면상에서 이동하는 물체의 움직임을 순간회전중심이라는 임의의 점을 기준으로 회전하는 것으로 표현하며[33,34], 주로 미끄럼 조향에서 로봇의 좌측과 우측 차륜의 회전속도를 변화했을 때 로봇의 이동 위치를 계산하는데 사용된다. 본 연구에서 제안하는 위치추정 알고리즘에서 순간회전중심 이론은 광변위센서로부터 취득한 이동변위 데이터를 사용하여 선체 청소로봇의 이동 위치를 계산하는데 사용된다. 비록 순간회전중심 이론은 단지 이차원 평면상의 위치추정에서만 유효하지만, 본 연구에서 대상으로 하는 선체 청소로봇은 주로 평면 혹은 평면과 유사한 낮은 곡률의 표면을 주행하므로 순간회전중심을 위치추정 알고리즘에 적용하였다.

위치추정 알고리즘은 그림 3.2와 같이 표현된 기구학 모델(kinematic model)을 기반으로 순간 회전중심이론을 적용하여 선체 청소로봇의 위치를 추정한다. 선체 청소로봇의 위치를 추정하기 위한 기구학 모델은 그림 3.2-(a)와 같으며, \mathbf{xy} 와 \mathbf{XY} 는 각각 절대좌표계와 상대좌표계를 나타내고 C 와 ϕ 는 선체 청소로봇의 움직임을 대표하는 기하학적 중심과 주행 방향각을 나타낸다. 또한, \mathbf{P}_{ICR} 은 순간회전중심의 위치벡터(position vector)를 의미하고, R 과 $\delta\theta$ 는 각각 순간회전중심에 대한 회전반경(radius of rotation)과 회전 각도를 의미한다. 선체 청소로봇에 설치된 두 개의 광 변위센서가 그림 3.2-(b)와 같이 선체 청소로봇의 중심(C)에 대해 A_x 와 A_y 만큼 떨어진 곳에 설치되어 있으면 다음과 같은 방법으로 선체 청소로봇의 위치를 추정할 수 있다.

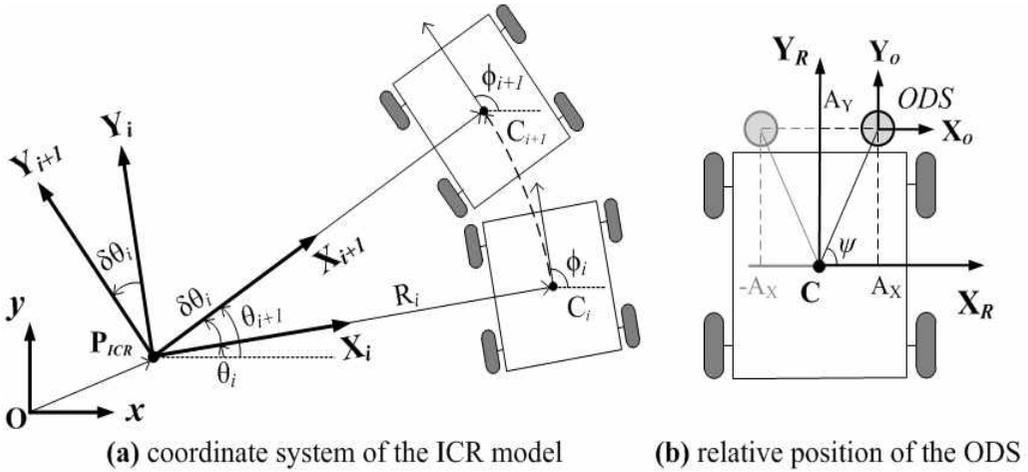


Fig 3.2 Kinematic model for position estimation algorithm on the 2-D plane

우선, 전체 청소로봇이 $C_i(x_i, y_i)$ 에서 $C_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 로 이동할 때의 위치 변화를 위치벡터(position vector)로 표현하면 다음의 식 (3.1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^A C_{i+1} &= {}^A P_{ICR} + {}^{R_{i+1}} C_{i+1} = {}^A P_{ICR} + R(\delta\theta_i) \cdot {}^{R_i} C_i \\
 &= ({}^A C_i - R(\theta_i) \cdot {}^{R_i} C_i) + R(\delta\theta_i) \cdot (R(\theta_i) \cdot {}^{R_i} C_i)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

여기서, 상첨자(superscript) A 와 R 은 각각 해당 벡터가 표시되는 좌표계인 절대좌표계 (x, y) 와 상대좌표계 $(X, Y_i, X_{i+1}, Y_{i+1})$ 를 나타내며, 하첨자(subscript) i 와 $i+1$ 은 각각 이동 전 로봇의 위치와 이동 후 로봇의 위치(좌표계)를 의미한다. 또한, $R(\theta_i)$ 는 절대좌표계의 z 축으로 θ_i 만큼 좌표계를 회전시키는 회전행렬(rotation matrix)을 나타내며, 이는 동차변환행렬(homogeneous transformation matrix)의 한 종류로 상대좌표계로 표현된 벡터를 절대좌표계로 변환하는 역할을 한다. 식 (3.1)을 행렬로 변환하여 표현하면 다음의 식 (3.2)와 같이 표현할 수 있으며, 이를 통해 로봇의 위치를 대수적으로 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) - \sin(\theta_i) & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\delta\theta_i) - \sin(\delta\theta_i) & 0 \\ \sin(\delta\theta_i) & \cos(\delta\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i \cdot \cos(\theta_i) \\ R_i \cdot \sin(\theta_i) \\ \delta\theta_i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

식 (3.2)를 전개하여 정리하면 $C_i(x_i, y_i)$ 에서 순간회전중심에 대하여 회전반경 R_i 를 가지고 $\delta\theta_i$ 만큼 움직여 $C_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 로 이동할 때의 위치 변화를 식 (3.3)과 같이 표현할 수 있으며, 이는 수치연산 프로그램인 ‘Maple 15’로부터 그림 3.3과 같이 선형대수(linear algebra)를 사용하여 계산된다.

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ \theta_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - R_i \cos(\theta_i) + R_i \cos(\theta_i) \cos(\delta\theta_i) - R_i \sin(\theta_i) \sin(\delta\theta_i) \\ y_i - R_i \sin(\theta_i) + R_i \cos(\theta_i) \sin(\delta\theta_i) + R_i \sin(\theta_i) \cos(\delta\theta_i) \\ \theta_i + \delta\theta_i \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

```

> restart
> # This program is written to calculate a 2D position of a two-wheeled robot with differential drive.
> with(LinearAlgebra) :
> # with(MTM) :
> Q_xyz := Vector(3, [x2, y2, theta2]) :
> q_XYZ := Vector(3, [R, 0, dtheta]) : # R denotes the ICR(Instantaneous Centre of Rotation).
> Q_ini := Vector(3, [x1, y1, theta1]) : # Q_ini denotes the initial position of the robot w.r.t. absolute coordinate system.
> R_i := Matrix(3, 3, [[cos(dtheta), -sin(dtheta), 0], [sin(dtheta), cos(dtheta), 0], [0, 0, 1]]) :
> q_ini := Vector(3, [R, 0, 0]) :
> R_ini := simplify(Matrix(3, 3, [[cos(theta), -sin(theta), 0], [sin(theta), cos(theta), 0], [0, 0, 1]])) :
> Q_ini - MatrixVectorMultiply(R_ini, q_ini)
      
$$\begin{bmatrix} x1 - \cos(\theta) R \\ y1 - \sin(\theta) R \\ \theta1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

> Eq := Q_xyz - (MatrixVectorMultiply(R_i, MatrixVectorMultiply(R_ini, q_XYZ))) + Q_ini - MatrixVectorMultiply(R_ini, q_ini) :
> Qx := solve(Eq[1], x2)
      Qx := -cos(theta) R + cos(dtheta) cos(theta) R - sin(dtheta) sin(theta) R + x1 \quad (2)
> Qy := solve(Eq[2], y2)
      Qy := -sin(theta) R + sin(dtheta) cos(theta) R + cos(dtheta) sin(theta) R + y1 \quad (3)
> theta2 := solve(Eq[3], theta2)
      theta2 := dtheta + theta1 \quad (4)

```

Fig 3.3 Linear algebraic calculation of the position estimation algorithm using the Maple 15

식 (3.3)에서 알 수 있듯이 선체 청소로봇의 이동위치를 추정하기 위해서는 반드시 순간회전중심에 대한 회전반경(R_i)과 회전각도($\delta\theta_i$)를 알아야 하며, 이러한 두 변수는 그림 3.2-(b)와 같이 선체 청소로봇에 설치된 2대의 광 변위센서를 통해 측정된 데이터로부터 구할 수 있다. 광 변위센서는 오차 보정을 위하여 2대가 설치되지만 위치추정 알고리즘에는 이 점이 반영되지 않으므로 단지 1대의 광 변위센서만을 고려한다. 선체 청소로봇의 기하학적 중심(C)을 기준으로 하는 상대좌표계 $\mathbf{X}_R\mathbf{Y}_R$ 에서 광 변위센서는 ψ 각도를 가지는 위치에 설치되어 있고, 광 변위센서로부터 취득하는 2축 변위 데이터는 센서 좌표계 $\mathbf{X}_O\mathbf{Y}_O$ 를 기준으로 각 축에 대하여 X_0, Y_0 로 표현할 수 있다. 이를 바탕으로 기하학적 구속조건(kinematic constraint)을 사용하여 순간회전중심에 대한 로봇의 회전각도($\delta\theta_i$)를 계산하면 식 (3.4)와 같으며, 계산에서 사용된 광 변위센서의 설치각도 ψ 는 다음의 식 (3.5)로부터 계산할 수 있다.

$$\delta\theta_i = \phi_{i+1} - \phi_i = \frac{-\delta X_0 \sin(\psi) + \delta Y_0 \cos(\psi)}{\sqrt{A_X^2 + A_Y^2}} \quad (3.4)$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{A_Y}{A_X}\right) \quad (3.5)$$

마찬가지로, 순간회전중심에 대한 회전반경(R_i)도 기하학적 구속조건을 사용하여 계산할 수 있으며 이는 식 (3.6)과 같은 방정식으로부터 계산된다. 식 (3.6)에서 사용된 각도 μ 는 식 (3.7)에 나타나듯이 절대좌표계에서의 광 변위센서 위치각도이며, 단지 계산의 편의를 위하여 도입하였다.

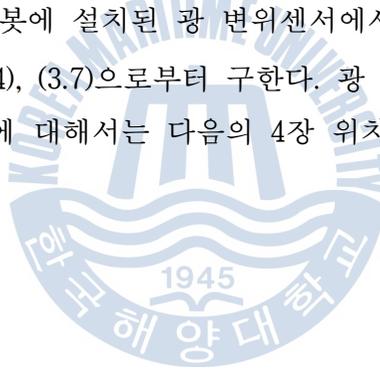
$$-\delta X_0 \sin(\mu) + \delta Y_0 \cos(\mu) = \sqrt{(R_i + A_X)^2 + A_Y^2} \cdot \delta\theta_i \quad (3.6)$$

$$\mu = \tan^{-1}\left(\frac{A_Y}{R_i + A_X}\right) \quad (3.7)$$

식 (3.6)의 방정식을 풀면 4개의 해를 구할 수 있으며, 항상 양의 값을 가지는 해를 순간회전중심에 대한 회전반경으로 선택한다. 계산을 통해 선택된 해는 식 (3.8)과 같다.

$$R_i = -A_X + \frac{\delta Y_0}{2\delta\theta_i} + \frac{\sqrt{\delta Y_0^2 - 4\delta\theta_i \delta X_0 \delta Y_0 A_Y - 4\delta\theta_i^2 A_Y}}{2\delta\theta_i} \quad (3.8)$$

요약하면, 선체 청소로봇의 위치를 추정하기 위한 위치추정 알고리즘은 순간회전중심을 사용하여 식(3.3)과 같은 방법으로 이전위치 $C_i(x_i, y_i)$ 에 대한 이동 후 위치 $C_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 를 계산하며, 계산에서 필요한 순간회전중심에 대한 회전반경 (R_i)과 회전각도($\delta\theta_i$)는 로봇에 설치된 광 변위센서에서 취득한 데이터(2축 변위 X_0, Y_0)를 사용하여 식(3.4), (3.7)으로부터 구한다. 광 변위센서에서 측정하는 상대적인 이동변위 데이터에 대해서는 다음의 4장 위치추정 시스템 설계에서 보다 상세히 다룬다.



제 4 장 위치추정 시스템 설계

4.1 광 변위센서

4.1.1 광 변위센서 개요

광 변위센서(ODS, Optical Displacement Sensor)는 선체 청소로봇의 이동변위를 측정하기 위하여 본 연구에서 개발된 장치이며, 기존의 회전 엔코더처럼 기계적으로 로봇의 이동변위를 측정하는 것이 아니라 적외선 레이저를 이용하여 비접촉식으로 이동변위를 측정하기 때문에 선체 청소로봇의 차륜과 선체 표면 사이의 미끄러짐에 영향을 받지 않고 정확하게 이동변위를 측정할 수 있다. 광 변위센서는 그림 4.1과 같이 상대적인 변위를 직접 측정하는 광센서(optical sensor)와 이를 구동하기 위한 주변회로로 구성되며, 광센서로부터 측정된 데이터를 활용하기 위해서는 반드시 데이터 취득 보드(DAQ Board or data acquisition board)를 사용해야 한다.

광 변위센서에서 직접적으로 상대변위를 측정하는 광센서는 적외선 레이저 VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 광원과 특정한 적외선 파장만을 인식하는 IAS(Image Acquisition System)를 사용하여 대상물체의 표면을 연속적으로 촬영하고, 연속적으로 촬영된 이미지를 DSP(Digital Signal Processor)로 분석하여 상대적으로 움직인 변위를 계산해낸다[35-41]. 광 변위센서에서 상대변위를 측정하는 과정은 그림 4.2-(a)와 같으며, 광원에서 생성된 적외선 레이저가 대상물체의 표면에서 반사되고 이를 IAS에서 연속적으로 촬영하여 흑백 이미지로 인식한다. 이후에 그림 4.2-(b)와 같이 인식된 연속적인 이미지들을 내부의 이미지 처리 알고리즘에 따라 비교하여 이동변위를 계산해 낸다. 광센서는 실제로 촬영한 이미지의 변화를 통해 이미지 자체의 이동변위를 계산하지만 광센서가 촬영하는 이미지는 실제로 고정되고 있기 때문에 광센서를 통해 측정된 이동변위는 로봇이 움직인 이동변위가 된다. 광센서가 측정한 이동변위는

그림 3.2-(b)에 나타난 것과 같이 센서 좌표계 X_0Y_0 를 기준으로 2축 방향 카운트 수(X_c, Y_c)로 출력되며, 이를 정해진 해상도(resolution) 값과 연산하여 길이단위(m)의 이동변위(X_0, Y_0)로 변환하여 위치추정 알고리즘에 적용한다.

현재까지 여러 종류의 광센서를 응용한 유사한 연구들이 진행되어 왔으며, 특히 주행거리 측정 및 위치추정 시스템에 다양한 방법으로 적용되어 왔다 [2,8-10,12,23,26,37-49]. 본 연구에서 사용한 광센서는 Avago Technologies사의 ADNS-9500이며, 일종의 네비게이션(navigation) 장치인 컴퓨터 마우스 또는 트랙볼(track ball)에 주로 사용되는 센서이다. 본 연구의 광 변위센서에 적용된 광센서의 자세한 사양[35]과 측정능력은 Table 4.1과 같다.

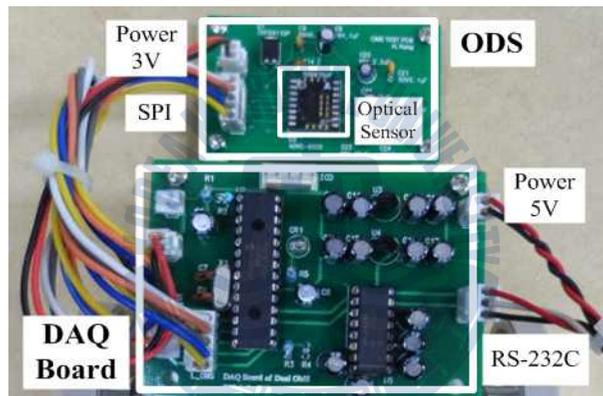


Fig 4.1 Photograph of the optical displacement sensor(ODS)

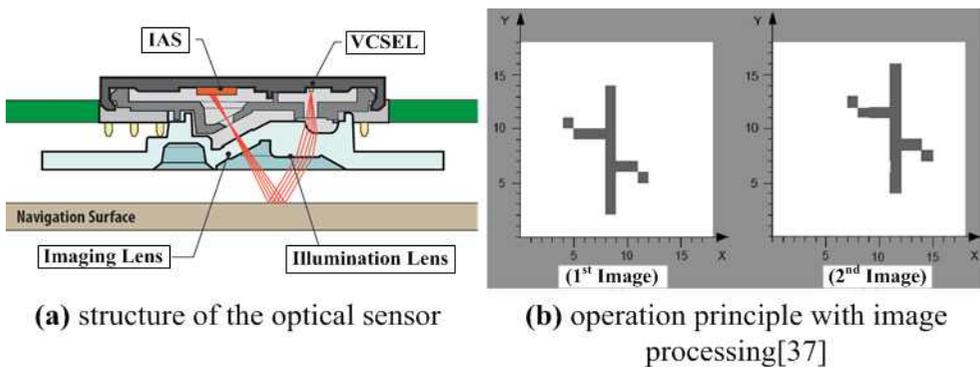


Fig 4.2 Optical sensor and its operation principle

Table 4.1 Specifications of the optical sensor

Parameters	Description
VCSEL illuminator wavelength	(Infrared) 832 [nm] ~ 865 [nm]
Max. speed measurement	150 [inch/s] (= 3.81 [m/s])
Max. acceleration measurement	30G (= 294 [m/s ²])
Max. frame rate	11,750 [frame/s]
Max. resolution	5,670 [counts/inch] ⇒ 4.48 × 10 ⁻³ [mm]
Data read and write	SPI synchronous serial port
Image capture	30 × 30 [pixel]
Mode(firmware)	Motion measurement / Frame capture

광 변위센서에서 측정된 2축 상대변위 데이터는 광센서 내부의 16-bit 레지스터(register)에 저장되고 오직 SPI 통신을 통해서만 취득할 수 있다. 하지만 SPI 통신은 근거리에 적합한 동기 통신(synchronous communication)이기 때문에 선체 청소로봇에서 1m 이상의 거리에 전송할 경우 데이터 손실이 크다. 따라서 데이터 취득 보드를 광 변위센서에 가까이 설치(그림 4.1)하여 SPI 통신으로 이동변위 데이터를 취득한 이후에 이를 RS-232C 통신으로 변환하여 PC에서 데이터를 수신한다. 즉, 데이터 취득 보드에는 SPI 통신과 RS-232C 통신을 할 수 있는 MCU(Micro Controller Unit-PIC18F2580)가 있고, MCU 내부에 SPI 통신으로부터 취득한 상대변위 데이터를 RS-232C 통신으로 변환하는 알고리즘이 프로그래밍 되어 있다. 데이터 취득 보드의 MCU는 PC의 데이터 취득 명령을 수신하면 즉시 SPI 통신으로 광 변위센서에 접근하여 레지스터에 저장된 상대변위 데이터를 읽어온다. SPI 통신을 사용하여 광 변위센서 데이터를 수신하기 위한 방법은 그림 4.3과 같으며, 데이터 요청 명령(write operation)을 한 이후에 응답을 읽는(read operation) 과정으로 구성된다. 광 변위센서의 동작모드 및 설정(firmware download)도 이러한 명령을 통해 이루어지며, 본 연구에서와 같이 연속적으로 상대변위 데이터를 취득할 때에는 연속 데이터 읽기(motion burst read) 기능을 사용한다.

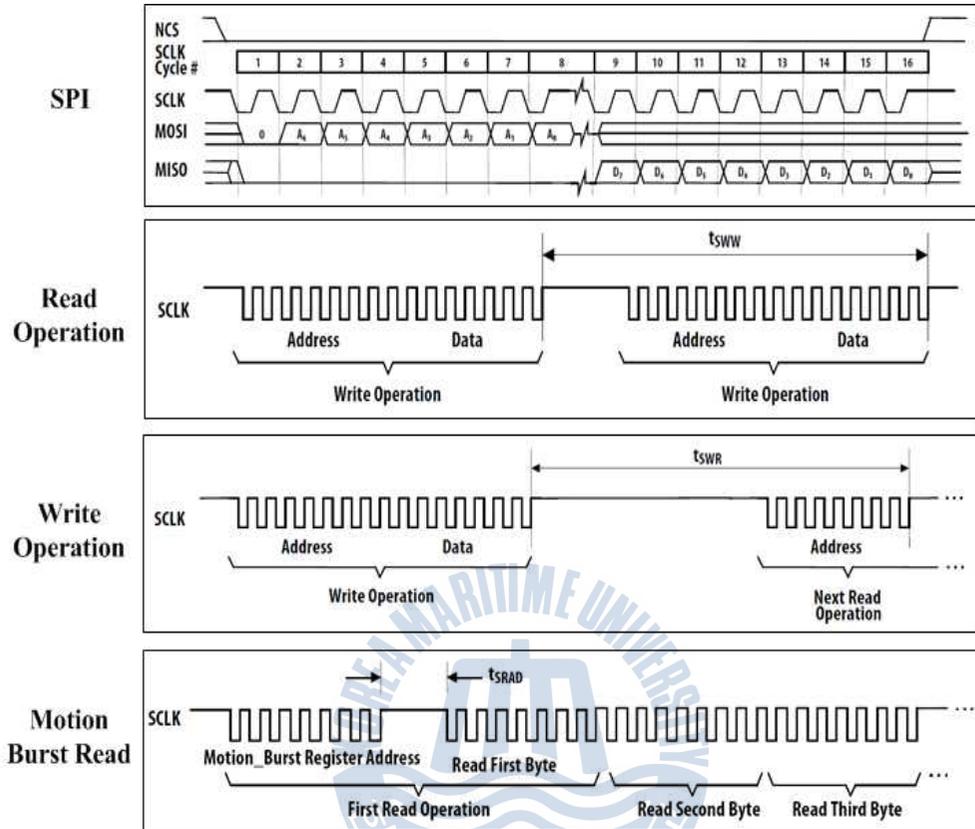


Fig 4.3 SPI communication procedures for motion data acquisition[37]

연속 데이터 읽기 기능을 사용하여 데이터 취득 보드에서 데이터를 수집하는 실제 파형은 그림 4.4-(a)와 같으며, 이를 통해 연속적으로 수신 받는 데이터는 그림 4.4-(b)와 같다. SPI 통신에서 마스터(master)역할을 하는 MCU에서 클럭신호(CLK)를 생성하면서 데이터 MOSI(Master Out Slave In) 포트를 통해 데이터 요청명령을 보내면 슬레이브(slave)역할을 하는 광센서에서 MISO(Master In Slave Out)포트를 통해 동기화된 클럭신호에 따라 상대변위 데이터를 응답한다. 그림 4.4-(b)와 같이 연속 데이터 읽기 기능을 사용하여 취득한 데이터는 다양한 종류의 데이터를 포함하므로 데이터 취득 보드의 MCU에서 표시된 것과 같이 측정된 움직임과 관련된 데이터만을 선별하여 상대변위를 수집한다.

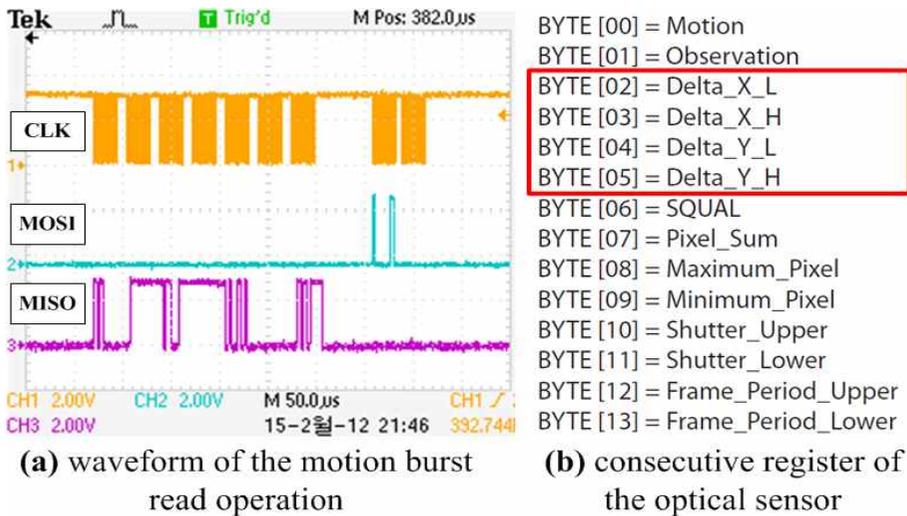


Fig 4.4 Motion data acquisition via SPI communication

4.1.2 광 변위센서의 동작특성

광 변위센서는 단순히 기계적인 방식으로 회전량을 측정하는 회전 엔코더와는 달리 연속적으로 촬영한 이미지들을 비교하여 상대변위를 계산하기 때문에 회전 엔코더와는 다른 동작특성을 나타내며, 특히 이미지를 촬영하는 것과 관련된 환경요소(초점거리, 표면 재질 등)에 많은 영향을 받는다. 이러한 광 변위센서의 동작특성은 광 변위센서 내부의 광센서(주로 광마우스센서 응용연구)에 관련된 연구를 통해 분석되어져 왔으며, 측정방향(X_o, Y_o 축 방향), 속도, 가속도, 대상물체와 광 변위센서의 높이 그리고 대상물체의 표면 재질의 영향을 받는다고 알려져 있다[12,24,35-41,44]. 즉, 보다 정확하게 이동변위를 측정하여 선체 청소로봇의 위치를 추정하기 위해서는 광 변위센서의 동작특성을 분석하여 주변 환경요소에 따른 광 변위센서의 특성을 측정에 반영해야 한다.

광 변위센서의 동작특성을 분석하기 위하여 본 연구에서는 그림 4.5와 같은 실험 장치를 구성하였으며, 다양한 환경조건을 변화시켜 가면서 광 변위센서의 동작(출력)특성을 분석하였다. 실험 장치는 광 변위센서를 구조물에 고정시키고 리니어 스테이지(linear stage)를 통해 지면을 움직이는 방식으로 실험을 진행하

였다. 실제 선체 청소로봇에 광 변위센서가 적용되는 경우에는 지면은 고정되어 있고 광 변위센서가 설치된 청소로봇이 주행하지만, 상대적인 움직임의 관점에서 볼 때 실제의 주행과 리니어 스테이지를 사용한 실험은 움직임이 동일하므로 지면을 움직이는 방식으로 실험을 수행하였다. 리니어 스테이지는 정밀한 위치제어가 가능한 장치이므로 광 변위센서의 출력특성을 반복적으로 실험하기 위하여 채택되었고, 내부의 서보모터 제어를 위해 모터 드라이브를 사용하였다. 동작 특성 실험에 사용된 리니어 스테이지의 사양은 표 4.2와 같으며, 실험은 PC에서 그림 4.6과 같이 LabVIEW로 작성된 동작 특성 테스트 프로그램을 사용하여 광 변위센서의 데이터 취득 보드로부터 출력된 데이터를 RS-232C 통신을 통해 수집하는 방식으로 이루어졌다. 동작 특성 테스트 프로그램은 수집한 상대변위 데이터를 모니터링 PC에 표시하는 동시에 측정 데이터를 데이터베이스에 CSV(Comma Saperated Value) 파일로 저장하는 역할을 한다.

광 변위센서의 동작 특성 실험은 앞서 언급한 측정방향, 속도, 가속도, 높이, 표면 재질을 변화시켜 가며 반복적으로 수행되었다. 실험에서 측정방향, 대상물체와 광 변위센서의 높이, 표면 재질은 수동으로 공구(버니어 캘리퍼스와 스크류 나사)를 사용하여 변화시켰으며, 속도와 가속도는 그림 4.7에 나타난 것과 같이 리니어 스테이지의 서보모터 제어를 위한 서보 드라이브 전용 프로그램(P-DORI)을 사용하여 모니터링 PC에서 제어하였다.

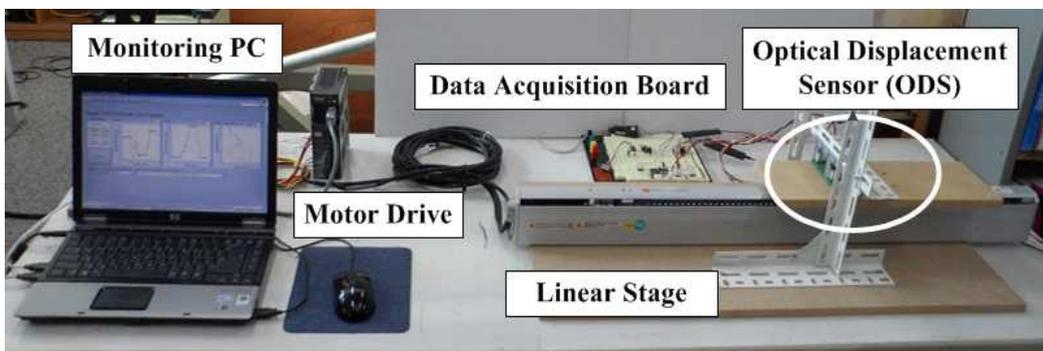
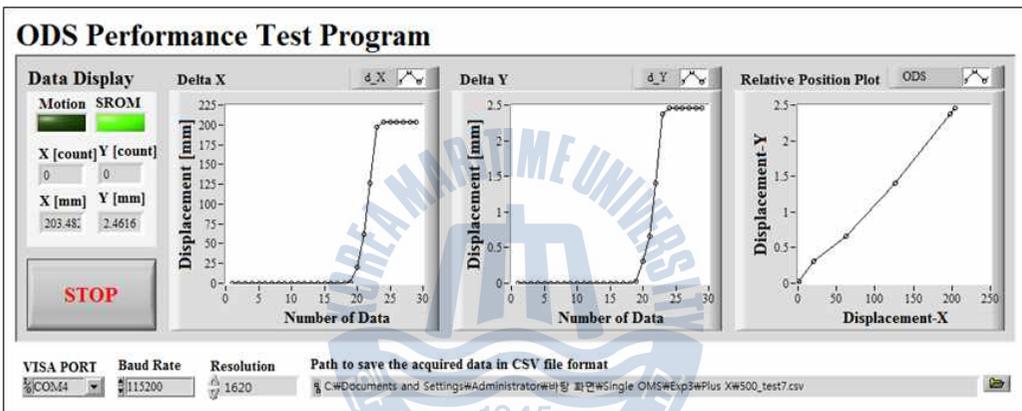


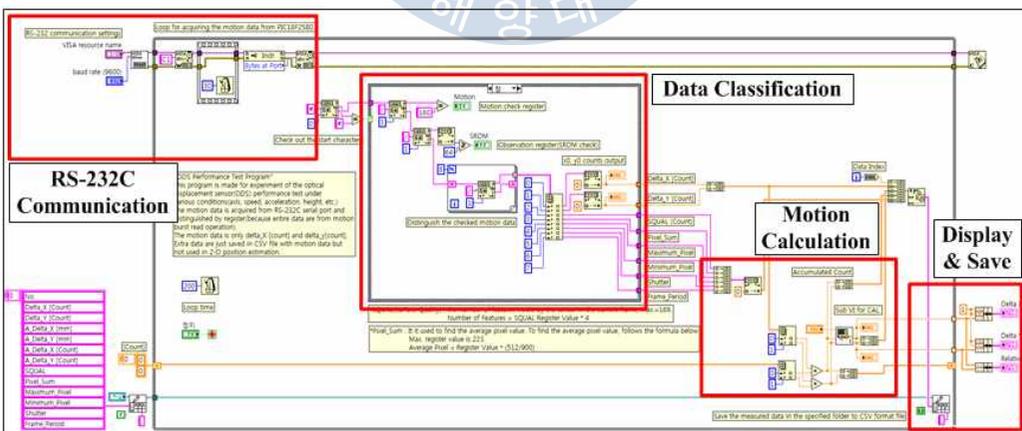
Fig 4.5 Experimental apparatus for performance test of the optical displacement sensor under the various conditions

Table 4.2 Specifications of the linear stage

Parameters	Description
Position accuracy	± 0.005 [mm]
Position repeatability	± 0.02 [mm]
Stroke distance	100[mm] ~ 1000[mm]
Max. speed	1000[mm/s]
Max. payload (horizontal/vertical)	7[kg] / 3[kg]
Drive type and lead	Ball screw, $\phi 15$ (lead 10[mm])
Encoder	Incremental, 2000[pulse/revolution]



(a) graphical user interface screen



(b) program source code(LabVIEW)

Fig 4.6 Optical displacement sensor performance test program



Fig 4.7 Motor drive control program for the linear stage

광 변위센서의 동작특성 실험에서 매 실험 시 광 변위센서를 초기화하여 광 센서 내부의 레지스터에 어떠한 데이터도 남아있지 않게 하였으며, 그 실험 결과는 그림 4.8-4.11, Table 4.3과 같다. 우선 측정방향에 따른 광 변위센서의 동작특성을 알아보기 위하여 100mm/s의 일정한 속도로 각각의 방향에 대하여 10 회씩 반복실험을 수행하였다. 측정방향에 따른 동작특성은 그림 4.8에 나타난 것과 같고 각각의 축 방향(X_0, Y_0)에 대하여 (+)방향과 (-)방향에 대한 변위 측정 특성은 거의 동일한 것을 알 수 있다. 그러나 평균적으로 X_0 방향의 변위를 측정할 때 보다 Y_0 방향의 변위를 측정할 때 더 높은 민감도(sensitivity)를 나타는 것을 알 수 있다. 여기서 민감도는 1mm의 단위길이를 이동할 때 광 변위센서가 출력하는 카운트 수이며, 이는 얼마나 정밀하게 이동변위를 측정할 수 있는가를 나타내는 일종의 지표(indicator)이다. 측정방향에 대하여 Y_0 방향의 민감도가 조금 더 높은 이유는 센서의 Y_0 방향에 적외선 광원이 있기 때문이며[12], 이미지를 촬영하여 연속적으로 비교함으로써 이동변위를 계산하는 광센서의 특성상 광원 방향이 그림자로 인해 이미지 비교에 더욱 효과적이기 때문이다.

광 변위센서는 다양한 속도영역에서도 10회의 반복실험을 통해 그림 4.9와 같은 동작특성을 나타냈는데, 특히 300mm/s에서 민감도가 급격히 저하되었으며 400mm/s 이상의 속도영역에서는 속도가 증가함에 따라서 민감도가 급격히 감소하였다. 측정방향에 따른 동작특성 실험과 동일하게 X_0 방향보다 Y_0 방향의

변위를 측정할 때 더 높은 민감도를 나타내는 것을 알 수 있다. 더불어 광 변위센서는 다양한 가속도 영역에서도 10회의 반복실험을 통해 그림 4.10과 같은 동작특성을 나타냈으며, 200mm/s² 가속도 영역에서 민감도 저하가 있을 뿐 이외의 영역에서는 일반적인 동작특성을 나타냈다. 이는 광 변위센서 자체가 측정할 수 있는 가속도가 표 4.1에서 나타난 것과 같이 30G(=294m/s²)로 크기 때문에 그 이하의 가속도영역에서는 거의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

기존의 관련연구[8,35,38,39]에서 광 변위센서의 동작특성에 가장 많은 영향을 준다고 알려진 대상물체의 표면과 광 변위센서의 높이는 그림 4.11과 같은 실험결과를 나타냈다. 광 변위센서는 2.4~3.2mm 높이영역에서 가장 높은 민감도를 나타내며, 이러한 영역에서 멀어지면 민감도가 급격히 감소하는 특성을 가지고 있다. 또한, 광 변위센서는 표 4.3과 같이 대상물체의 표면 재질에 따라 다른 동작특성을 나타낸다. 광 변위센서는 적외선 반사광을 촬영하여 변위를 측정하므로 투명한 재질의 표면이나 반사율이 높은 재질의 표면에는 적용이 불가능하다. 본 연구에서는 불투명하고 반사율이 낮은 선체 표면의 이동변위를 측정하므로 재질에는 큰 영향을 받지 않는다. 표 4.3의 표면처리가 되지 않은 철판과 표면처리가 된 철판에서의 민감도에서 알 수 있듯이 금속재질의 표면에서 광 변위센서는 높은 민감도를 나타내며, 이는 광 변위센서가 선체 표면에서 높은 정밀도로 이동변위를 측정할 수 있음을 의미한다.

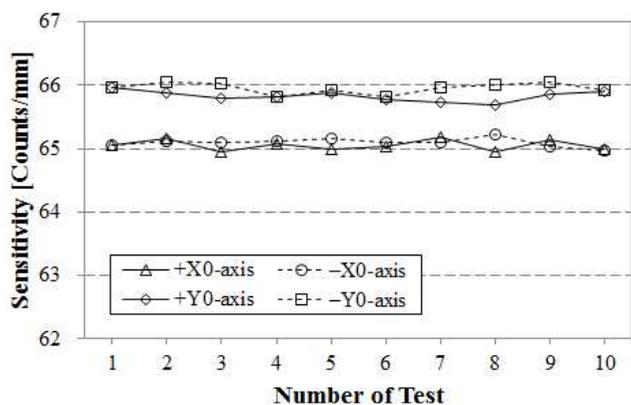


Fig 4.8 Effect of the measurement direction on the sensitivity

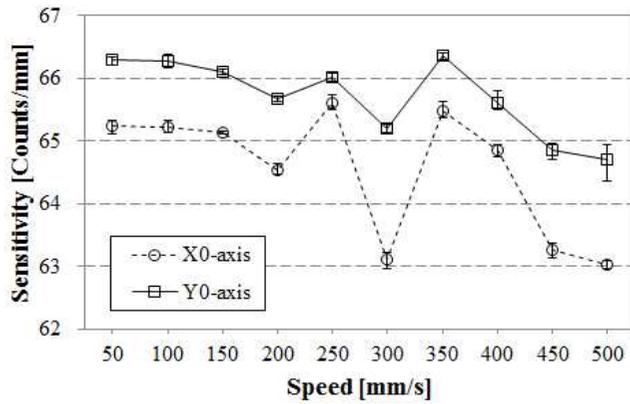


Fig 4.9 Effect of the speed on the sensitivity

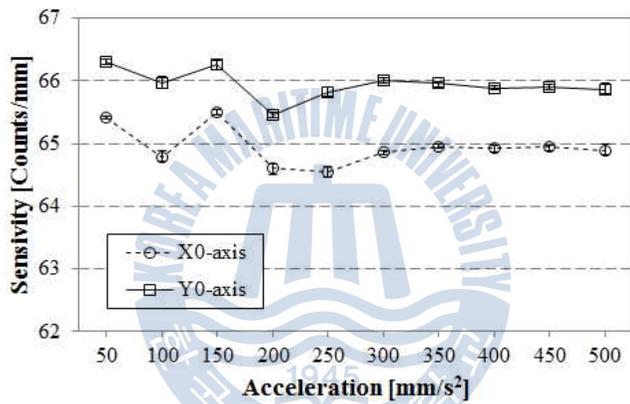


Fig 4.10 Effect of the acceleration on the sensitivity

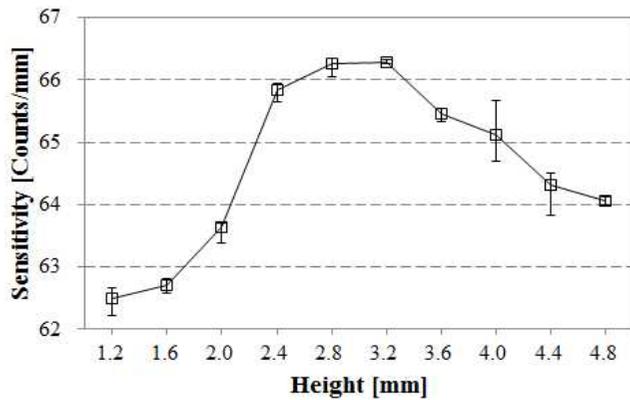


Fig 4.11 Effect of the height on the sensitivity

Table 4.3 Average sensitivity according to the surface type

Surface type	Sensitivity [counts/mm]
Iron plate without surface treatments	66.05
Iron plate with heat treatment	65.97
White paper	65.93
Silicone coated paper	65.51
Plywood	65.24
Polyvinyl chloride(PVC) plate	65.10

4.1.3 광 변위센서 교정

광 변위센서는 동작 특성 실험에서 나타난 것과 같이 측정방향, 속도, 가속도, 대상물체와 광 변위센서의 높이, 대상물체의 표면 재질의 영향을 받기 때문에 보다 정확하게 이동변위를 측정하기 위해서는 광 변위센서가 적용되는 주변 환경을 반영하여 교정(calibration)을 할 필요가 있다. 광 변위센서는 내부의 광 센서로부터 변경이 불가능한 정해진 알고리즘에 따라 이동변위가 계산되어 출력되므로, 본 연구에서는 출력된 이동변위 값에 교정계수(calibration factor)를 곱하여 이동변위 데이터를 교정하였다.

교정계수(K)는 광 변위센서의 동작 특성에 영향을 주는 요소인 측정방향 계수(C_{ax}), 속도 계수(C_{sp}), 가속도 계수(C_{ac}), 표면 재질 계수(C_{sf})에 의해 결정되며 식 (4.1)과 같은 방법으로 계산된다. 여기서, 광 변위센서의 동작 특성에 가장 많은 영향을 주는 요소인 대상물체와 광 변위센서의 높이에 대한 계수가 없는 이유는 정밀한 상대변위 측정을 위하여 광 변위센서가 대상물체와 항상 일정한 높이(민감도가 최대인 높이)를 이루도록 선체 청소로봇에 설치되기 때문이다. 교정계수의 값을 결정하는 각각의 계수들은 실험값을 바탕으로 다음의 식 (4.2)와 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$K = C_{ax} \times C_{sp} \times C_{ac} \times C_{sf} \quad (4.1)$$

$$C_{ax} = \frac{S_{ax}}{R_0}, C_{sp} = \frac{S_{sp}}{S_{avg}}, C_{ac} = \frac{S_{ac}}{S_{avg}}, C_{sf} = \frac{S_{sf}}{S_{avg}} \quad (4.2)$$

여기서, R_0 와 S_{avg} 는 각각 광 변위센서에 설정된 초기 해상도(1620 count/inch)와 동작 특성 실험으로부터 얻은 측정방향(X_0, Y_0)에 대한 평균 민감도를 의미한다. 또한, S_{ax} 는 해당 축 방향(측정방향)에 대한 평균 민감도, S_{sp} 는 광 변위센서가 운용되는 속도영역에 대한 평균 민감도, S_{ac} 는 해당 가속도영역에 대한 평균 민감도, S_{sf} 는 적용되는 표면 재질에 대한 평균 민감도를 나타낸다. 이와 같이 교정계수는 측정방향, 속도, 가속도, 표면 재질에 따른 광 변위센서의 동작 특성을 나타내는 계수들을 기반으로 산정되므로 각각의 특성이 교정계수에 포함되어 있다. 하지만 실제로 등속도 운동과 등가속도 운동은 동시에 일어날 수 없으므로, 본 연구에서와 같이 광 변위센서가 일정한 속도영역에서 운용되는 경우에는 속도 계수에 해당 속도영역에 대한 평균 민감도를 적용하고 가속도 계수는 1.0을 적용한다.

앞서 언급했듯이 광 변위센서에서 측정한 상대변위는 X_0, Y_0 축 방향에 대한 카운트 수로 출력되기 때문에 위치추정에 활용하기 위해서는 여기에 해상도 값을 적용하여 길이단위(m)의 이동변위(X_0, Y_0) 값으로 변환해야 한다. 교정계수를 적용하지 않고 광 변위센서의 출력 카운트 수를 길이단위의 이동변위로 변환하는 기존의 일반적인 계산은 식 (4.3), (4.4)와 같다.

$$X_{i0} [m] = X_c [\text{count}] \times \frac{1}{R_0 [\text{count/inch}]} \times \frac{25.4 [\text{mm/inch}]}{1000 [\text{mm/m}]} \quad (4.3)$$

$$Y_{i0} [m] = Y_c [\text{count}] \times \frac{1}{R_0 [\text{count/inch}]} \times \frac{25.4 [\text{mm/inch}]}{1000 [\text{mm/m}]} \quad (4.4)$$

여기서, X_{i0} 와 Y_{i0} 에 표시된 하첨자 i 는 교정계수를 적용하지 않은 초기(initial) 이동변위 계산방법이라는 의미이며, 각각 X_0 축 방향과 Y_0 축 방향의 길이단위 이동변위를 나타낸다. 이러한 기존의 이동변위 계산방법에 교정계수를 적용함으로써 광 변위센서의 동작특성을 반영할 수 있으며, 교정계수를 반영하여 수정된 해상도(R_{MX} , R_{MY})를 구할 수 있다. 수정된 해상도는 식 (4.5), (4.6)과 같이 초기 해상도에 각각의 축 방향에 대한 교정계수(식 (4.1), (4.2)로부터 계산)를 곱하여 구할 수 있으며(K_X , K_Y), 이를 적용하면 식 (4.7), (4.8)과 같은 방법으로 광 변위센서의 동작특성을 반영한 교정된 이동변위 값을 계산할 수 있다.

$$R_{MX} = R_0 \times K_X \quad (4.5)$$

$$R_{MY} = R_0 \times K_Y \quad (4.6)$$

$$X_0 [m] = X_c [\text{count}] \times \frac{1}{R_{MX} [\text{count/inch}]} \times \frac{25.4 [\text{mm/inch}]}{1000 [\text{mm/m}]} \quad (4.7)$$

$$Y_0 [m] = Y_c [\text{count}] \times \frac{1}{R_{MY} [\text{count/inch}]} \times \frac{25.4 [\text{mm/inch}]}{1000 [\text{mm/m}]} \quad (4.8)$$

교정계수를 통한 광 변위센서의 교정효과를 알아보기 위하여 그림 4.5와 동일한 실험 장치를 활용하여 표면처리 없는 철판(iron plate without surface treatments), 100mm/s의 등속도(선체 청소로봇의 최대 주행속도-표 2.1) 조건에서 광 변위센서를 사용하여 500mm의 거리를 측정하는 실험(10회 반복)을 수행하였다. 실험으로부터 측정된 광 변위센서의 이동변위 측정값(카운트 수)에 식 (4.1)-(4.8)을 적용하여 교정 전 이동변위 값과 교정된 이동변위 값(mm)을 계산하였으며, 그 결과는 그림 4.12와 같다. 실험결과는 교정계수를 통해 측정방향에 따른 오차를 감소시킬 수 있음을 나타내며, 해당 표면 재질과 속도 영역에 대한 측정 정확도가 향상됨을 보여준다.

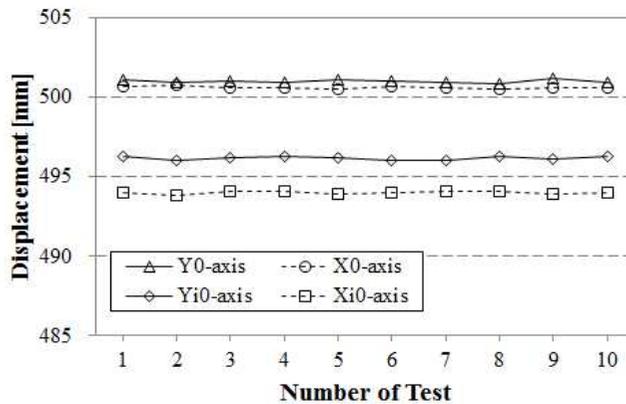


Fig 4.12 Measurements of the displacement after calibration

4.2 위치추정 시스템 구성

광 변위센서를 사용하여 선체 청소로봇의 위치를 인식하기 위한 위치추정 시스템은 그림 4.13과 같이 구성된다. 위치추정 시스템은 크게 선체 청소로봇에 설치되는 시스템과 지상에 설치되는 시스템으로 구분되며, 전자는 광 변위센서, 데이터 취득 보드, 지그비(ZigBee) 모듈로 구성되어 있고 후자는 지그비 동글(ZigBee dongle), 모니터링 PC로 구성되어 있다.

본 연구의 위치추정 시스템에서는 두 개의 광 변위센서를 사용하게 되는데, 이는 두 개의 광 변위센서로 상대적인 이동변위를 측정된 이후에 측정 민감도가 높은 광 변위센서의 데이터를 선택하여 위치추정 알고리즘에 적용하여 보다 정확한 위치추정을 수행하기 위함이다. 이러한 선택적 데이터 활용을 통한 오차감소는 광 변위센서가 교정되어 민감도가 최대로 설정되어 있고, 광 변위센서의 출력이 민감도가 저하되는 방향으로만 발생하기 때문에 가능하다[45]. 두 개의 광 변위센서로부터 측정된 이동변위는 데이터 취득 보드에 SPI 통신으로 전달되며(NCS 신호를 사용하여 광 변위센서의 선택적 데이터 취득), 데이터 취득 보드에서는 민감도가 높은 광 변위센서의 이동변위 데이터를 판별하여 RS-232C 통신을 통해 데이터를 지그비 모듈로 보낸다. 지그비 모듈에서는 이동변위 데이터를 지그비 통신으로 변환하여 전송하게 되고, 이를 지상에 설치된

지그비 dongle에서 수신하여 USB를 통해 모니터링 PC로 전달한다. 모니터링 PC에서는 전달된 이동변위 데이터를 바탕으로 위치추정 알고리즘을 사용하여 위치추정 계산을 수행한다. 또한, 모니터링 PC에서는 위치추정 결과를 그래프와 정량적 수치로 표현해주며, 위치추정이 수행되는 동안 수신한 이동변위 데이터와 위치추정 결과 전체를 데이터베이스에 CSV파일로 저장한다.

광 변위센서로부터 측정된 이동변위 데이터가 모니터링 PC에 전달되어 위치추정 알고리즘에 사용되기까지 SPI 통신, RS-232C통신, 지그비통신을 통해 전달되며, 이러한 과정에 있어서 데이터는 그림 4.14와 같은 형태로 이동한다. 2개의 광 변위센서로부터 측정된 이동변위는 카운트 수 형태로 데이터 취득 보드의 MCU로 입력되고, MCU 내에서 측정된 상대 이동변위의 절대 값을 비교하여 민감도가 높은 데이터를 선택하여 지그비모듈로 카운트 수 형태로 전달한다. 지그비 통신을 통해 전송된 카운트 수 형태의 데이터는 모니터링 PC의 위치추정 프로그램에서 길이단위로 환산되며, 위치추정 알고리즘에 적용되어 추정 위치가 산정되고 그 결과는 데이터베이스(하드디스크)에 저장됨과 동시에 모니터링 PC 화면에 디스플레이 된다.

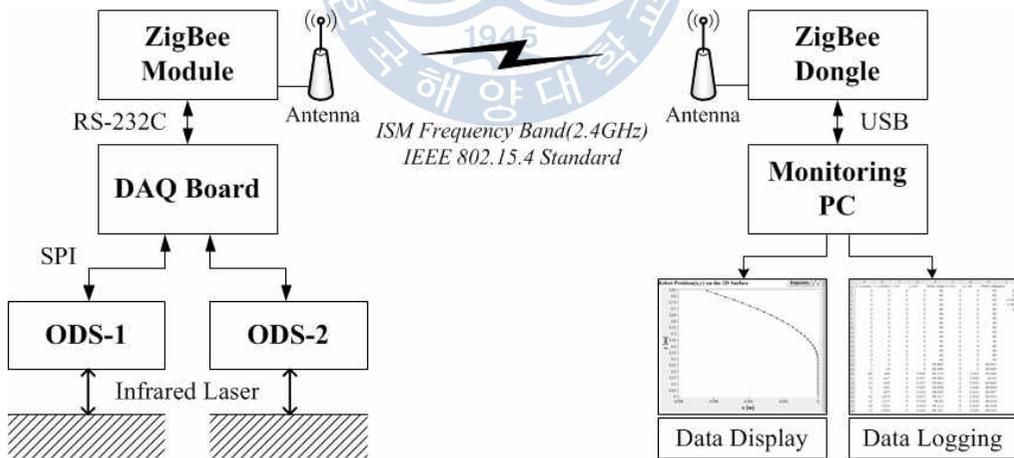


Fig 4.13 Schematic diagram of the position estimation system

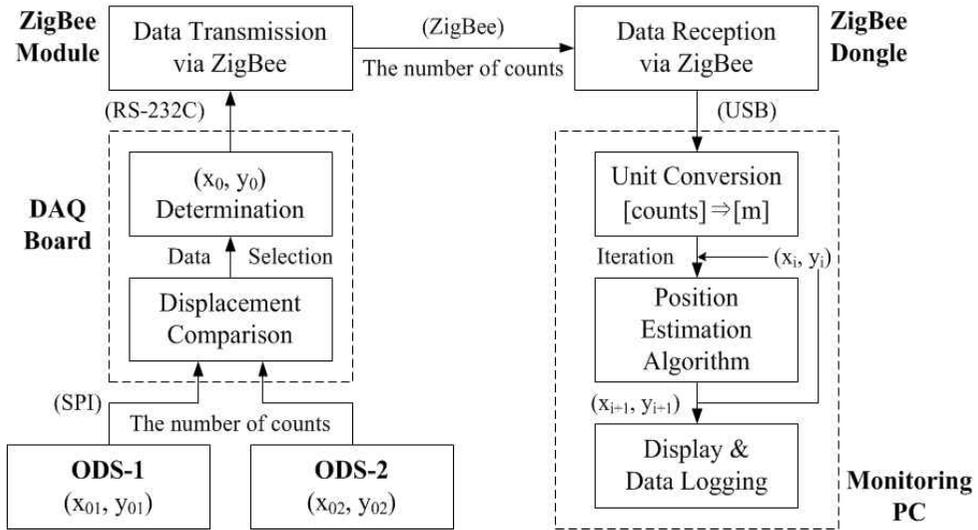


Fig 4.14 Data flow in the position estimation process

위치추정 시스템에 있어서 이동변위를 측정하고 측정된 이동변위 데이터를 선택하여 전송해 주는 광 변위센서와 데이터 취득 보드는 그림 4.15와 그림 4.16과 같이 회로가 구성되며, 이를 바탕으로 그림 4.17과 같이 PCB가 설계되었다. 설계된 PCB는 제작되어 구동에 필요한 소자를 설치(soldering)하고 지그비 모듈을 연결하여 그림 4.18과 같이 프로토타입(prototype)으로 제작되었다. 더불어, 모니터링 PC는 USB타입의 지그지 동글과 위치추정 프로그램을 포함하며 그림 4.19와 같이 사용된다. 위치추정 프로그램은 LabVIEW로 프로그래밍 되었으며, 3장에서 설명한 위치추정 알고리즘을 적용하여 위치를 추정하고 그 결과를 표시하는 동시에 데이터베이스에 저장할 수 있도록 구성되어 있다. 모니터링 PC에서 구동되는 위치추정 프로그램의 사용자 인터페이스(user interface)는 그림 4.20과 같으며, 프로그램 소스코드는 그림 4.21과 같다. 사용자 인터페이스에서 위치추정에 필요한 교정계수, 해상도, 초기위치, 초기방향각 등을 설정할 수 있으며, 그래프와 수치를 통해 위치추정 결과를 실시간으로 확인할 수 있다.

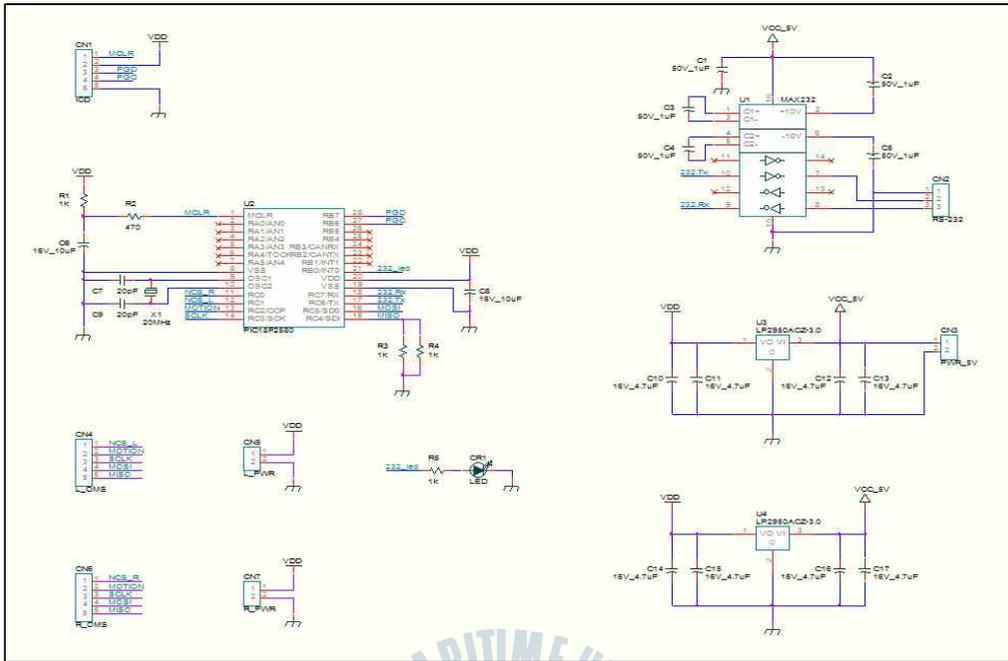


Fig 4.15 Circuit diagram of the data acquisition board

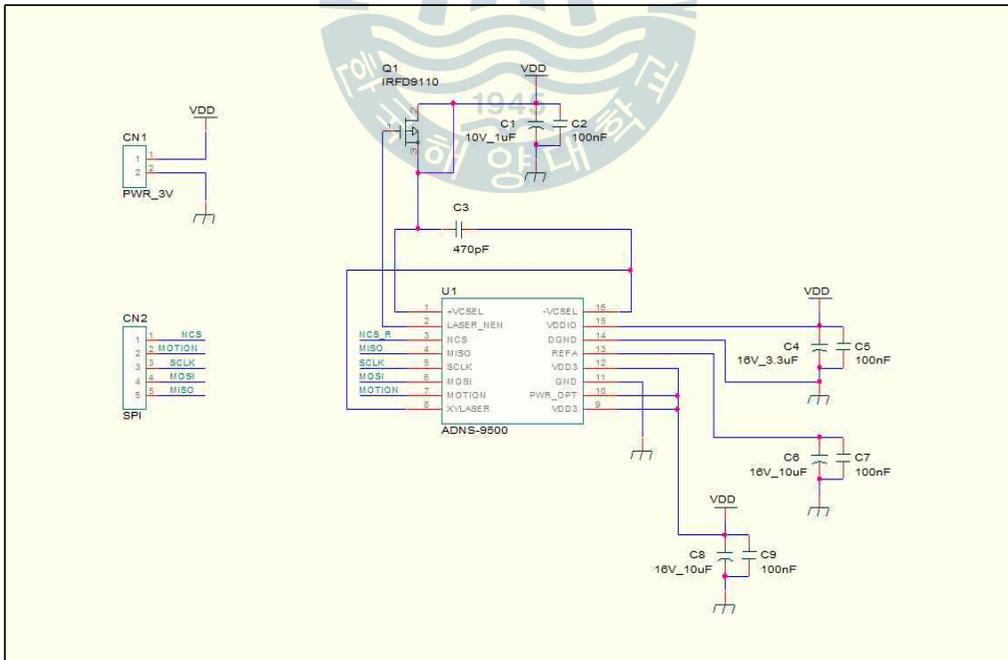
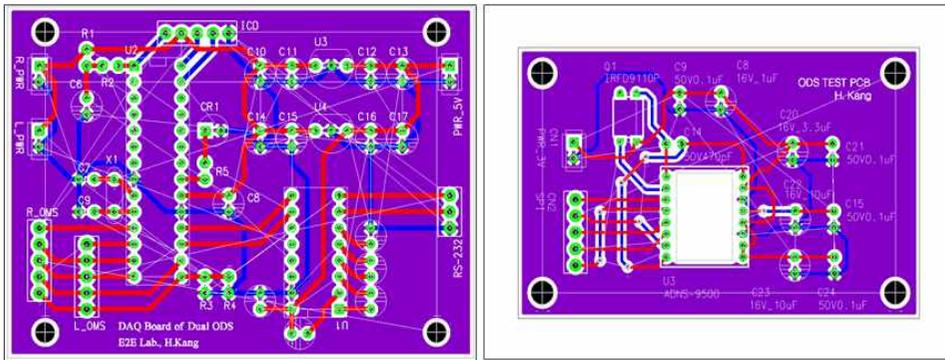
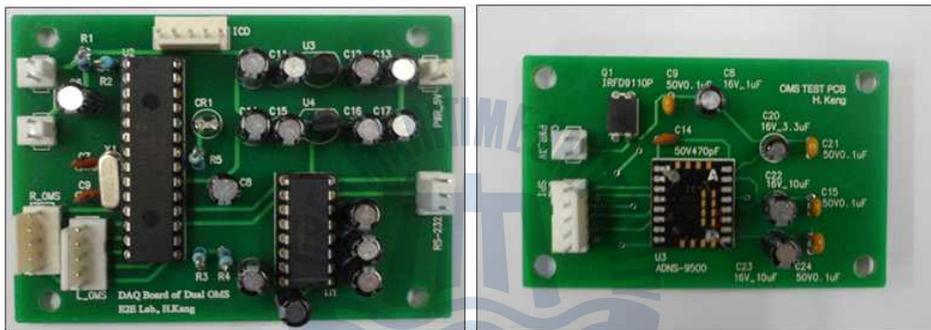


Fig 4.16 Circuit diagram of the optical displacement sensor



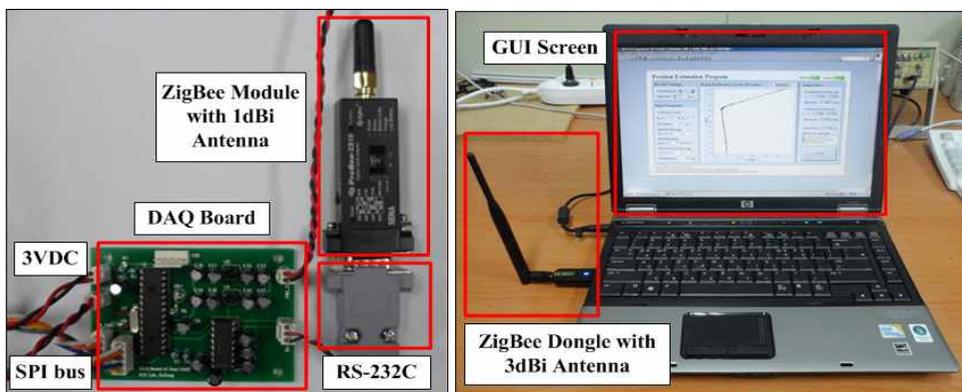
(a) data acquisition board (b) optical displacement sensor

Fig 4.17 Prototype PCB drawings



(a) data acquisition board (b) optical displacement sensor

Fig 4.18 Photographs of the manufactured prototype PCB



(a) data acquisition board side (b) monitoring PC side

Fig 4.19 Photographs of the data acquisition system with ZigBee network

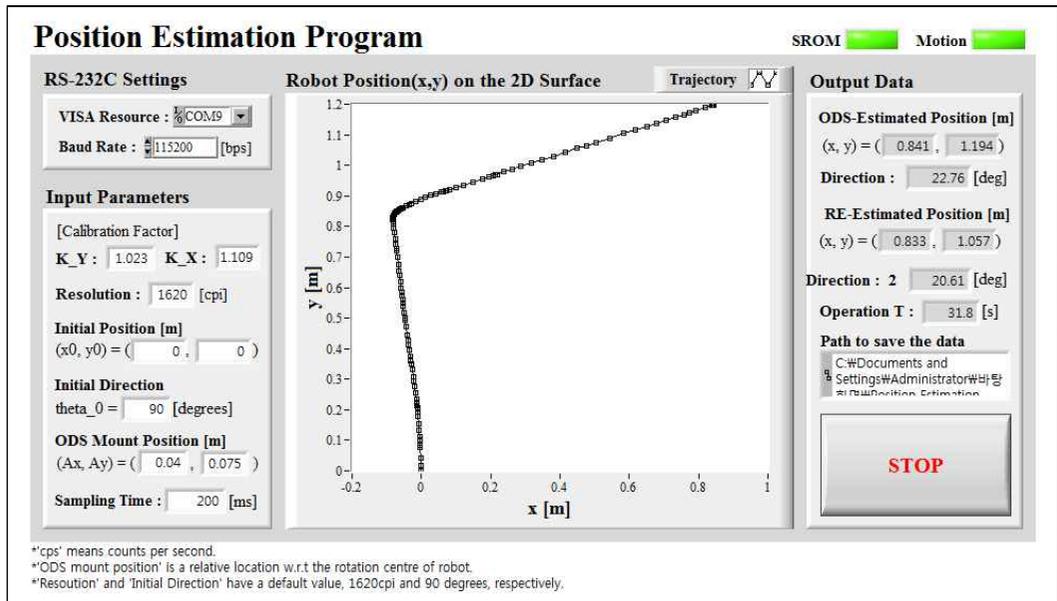


Fig 4.20 Graphical user interface screen of the position estimation program

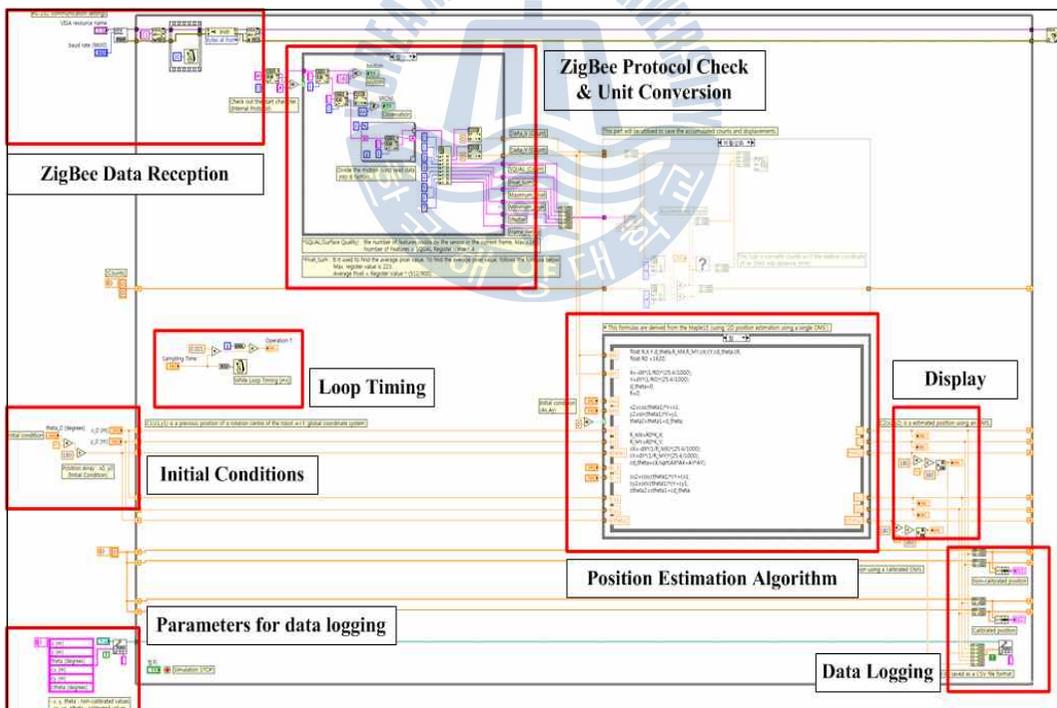


Fig 4.21 Source code of the position estimation program

제 5 장 실험 및 분석

5.1 위치추정 실험

본 연구에서 개발한 위치추정 시스템의 실제 위치추정 성능을 실험하기 위해서는 선체 청소로봇, 진공 지원 장치, 블라스팅 지원 장치, 제어모니터링 시스템 그리고 이를 구동하기 위한 높은 전력과 로봇이 주행하기 위한 선체가 필요하다. 하지만 이러한 설비들은 대규모·대용량이기 때문에 위치추정 성능을 테스트하기 위하여 구동할 경우 많은 경제적 손실과 인력이 낭비된다. 게다가 위치추정 성능실험에 있어서 선체 청소로봇은 단지 광 변위센서, 데이터 취득 보드, 지그비 보드 등을 이동시키는 역할만 수행하므로 굳이 선체 청소로봇 자체를 그대로 실험에 사용할 필요는 없다. 따라서 본 연구에서는 축소모형(scale model) 이동로봇을 사용하여 위치추정 성능을 실험하였으며, 실제 선체 청소로봇과 사용된 축소모형 이동로봇은 그림 5.1과 같다.

실제 선체 청소로봇에서는 그림 5.1-(a)와 같이 기하학적 중심(C)에 대해 (A_x , A_y)만큼 떨어진 위치에 2개의 광 변위센서가 설치되며, 축소모형 이동로봇에서도 동일하게 로봇의 중심(C)에 대해 (A_x , A_y)만큼 떨어진 위치에 2개의 광 변위센서가 설치된다. 비록 두 로봇에서 중심의 위치와 광 변위센서가 설치된 위치는 다르지만 이는 위치추정 알고리즘의 변수이기 때문에 주행한 경로가 동일하다면 동일한 위치추정 결과를 얻을 수 있다. 선체 청소로봇의 축소모형으로 그림 5.1-(b)와 같은 2개의 차륜을 가지는 이동로봇을 선택한 이유는 실제 선체 청소로봇과 동일하게 2대의 모터로 미끄럼조향을 사용하여 주행하고, 주행모터가 스텝 모터(step motor)이기 때문에 제어가 간단하고 정확하게 로봇의 주행을 제어할 수 있기 때문이다. 또한, 주어진 명령대로 정확하게 모터가 구동되기 때문에 제어명령을 회전 엔코더 신호와 동일하게 취급할 수 있다. 비록 선체 청소로봇과 축소모형 이동로봇이 주행하는 표면은 다르지만 이는 광 변위센서의

교정을 통해 보완될 수 있으며, 위치추정 성능에는 영향을 미치지 않는다.

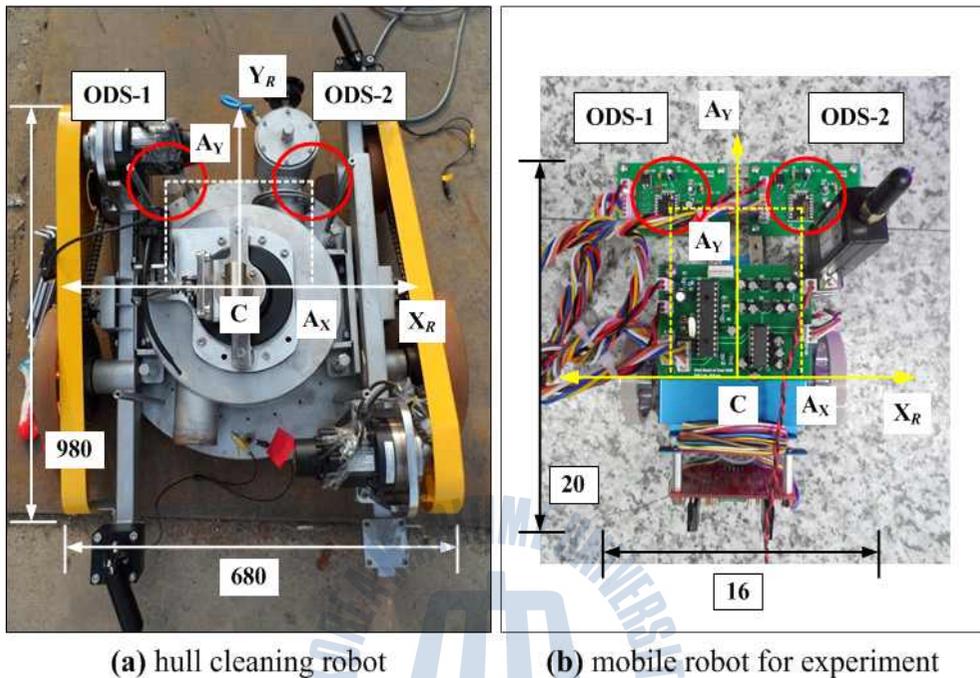


Fig 5.1 Comparison between the hull cleaning robot and the scale model

축소모형 이동로봇을 사용하여 위치추정 실험을 수행하기 위하여 그림 5.2와 같이 광 변위센서, 데이터 취득 보드, 지그비 모듈을 이동로봇에 설치하였다. 또한, 이동로봇의 주행을 제어하기 위하여 PWM(Pulse Width Modulation)을 사용하여 두 대의 스텝모터를 제어할 수 있는 모터 드라이브를 이동로봇의 후방에 설치하였다. 이동로봇의 움직임에 따라서 광 변위센서가 측정하는 상대변위 데이터는 데이터 취득보드에서 선택되어 지그비 모듈을 통해 전송되고 이를 모니터링 PC에 설치된 지그비 동글(그림 4.19-(b))에서 수신한다. 수신된 상대변위 데이터는 모니터링 PC에 설치된 LabVIEW로 작성된 위치추정 프로그램(그림 4.20, 4.21)에서 처리되어 위치추정 결과를 출력한다.

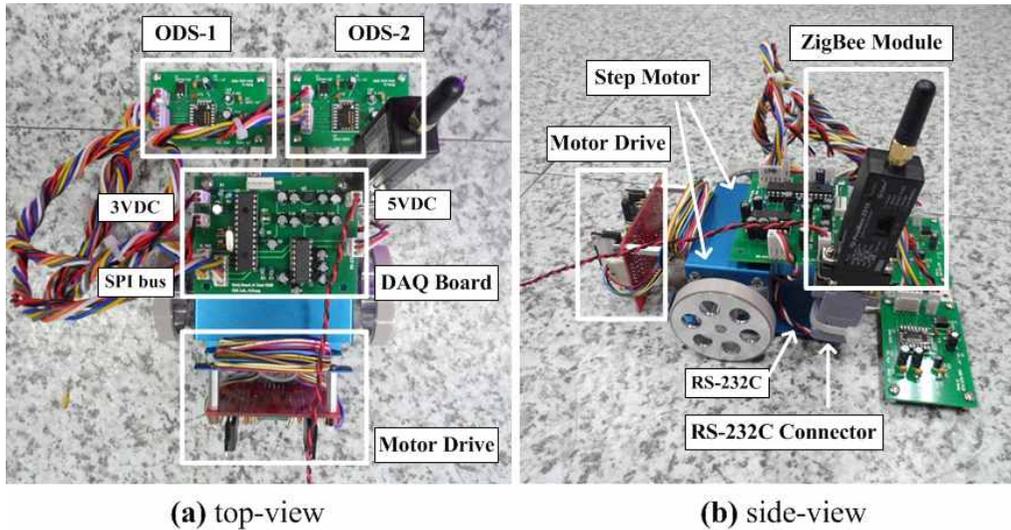


Fig 5.2 Configuration of the scale model for position estimation experiments

위치추정 시스템의 성능 실험은 이동로봇이 정사각형 경로(1.0m×1.0m)를 주행할 때 위치추정 시스템에서 추정된 경로를 수집하여 이를 주어진 명령(회전 엔코더 신호와 동일하게 취급), 실제 이동경로와 비교함으로써 이루어졌다. 위치추정 시스템의 성능을 실험하기 위하여 정사각형 경로를 선택한 이유는 경로 자체가 단순하고 명확하므로 위치추정 성능을 직관적으로 판단하기 쉽고, 2.3절에서 설명한 바와 같이 직선경로가 대부분이고 방향전환을 주로 사용하는 선체 청소로봇의 이동경로(그림 2.5)와 유사하기 때문이다. 축소모형 이동로봇은 모니터링 PC와 연결된 스텝 모터 드라이브를 통해 사용자가 수동으로 주행을 제어하여 최대한 정사각형 경로에 가깝게 주행을 할 수 있도록 하였으며, 경로를 벗어나지 않도록 가이드를 설치하여 정사각형 경로주행을 유도하였다. 또한, 광 변위센서는 실험 이전에 교정을 거쳐 주어진 조건에 대해 가장 높은 민감도를 가지도록 설정되었으며, 지면과 광 변위센서와의 거리는 가장 높은 민감도를 나타내는 2.8mm로 설정하였다(그림 4.11 참조). 위치추정 실험은 표 5.1과 같은 조건에서 이루어졌으며, 동일 조건 하에서 반복실험 수행하여 실험결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.

Table 5.1 Experimental conditions for position estimation

Condition	Description
Starting point	(0m, 0m)
Starting heading angle	0 [°]
Driving path	1.0 [m] × 1.0 [m] square path
Driving speed	50 [mm/s] ~ 100 [mm/s]
Driving acceleration	Minimize, close to 0 [mm/s ²]
Driving method	2-wheel skid steering(manual)
Driving Surface type	PVC type floor (sensitivity : 65.66 [counts/mm])
Height between ODS and surface	Constant, 2.8 [mm]

5.2 위치추정 실험 결과

축소모형 이동로봇을 사용한 위치추정 시스템의 성능실험은 표 5.1의 조건에 맞게 수행되었으며, 총 5회의 반복실험을 수행하였다. 실험결과는 그림 5.3~5.11과 같고 대표적으로 세 가지 케이스의 실험만을 그래프로 표현하였다. 그림 5.3은 첫 번째 케이스의 실험결과를 나타내며, 회색 굵은 화살표는 이동로봇이 주행한 실제경로를 나타내고 굵은 파선(dashed line)은 광 변위센서를 사용하여 추정한 경로, 얇은 점선(dotted line)은 회전 엔코더(스텝 모터 제어명령)를 통해 추정한 경로를 각각 나타낸다. 여기서 (0m, 0m)에 표시된 검은색 점은 이동로봇의 주행 시작점을 의미하여, 이와 동시에 정사각형 경로를 주행한 이후의 도착점을 의미한다.

첫 번째 케이스 실험결과는 광 변위센서와 위치추정 알고리즘을 사용한 위치추정 결과가 실제 이동경로와 매우 유사함을 보여준다. 반면에 회전 엔코더를 사용한 위치추정 결과는 이동로봇의 실제 이동경로와는 다소 차이가 있음을 나타낸다. 위치추정 실험을 통해 추정한 이동로봇의 최종위치도 광 변위센서의

측정 데이터를 사용하여 계산한 경우에는 (-0.033m, -0.028m)인 반면에 회전 엔코더를 사용하여 계산한 경우에는 (-0.154m, -0.147m)로 실제 최종위치인 (0m, 0m)와는 다소 차이가 있다. 이동로봇의 실제 주행경로와 제안한 위치추정 시스템으로 추정된 위치의 정량적인 비교 분석을 위하여 본 연구에서는 위치추정 실험결과를 거리오차(error)에 대한 빈도수(frequency)로 나타냈으며, 이러한 히스토그램(histogram)은 그림 5.4와 같다. 그림 5.4-(a)는 광 변위센서를 사용하여 위치추정을 수행한 경우의 오차 분포를 표현한 것으로 오차가 약 35mm 이내에 주로 분포하는 것을 알 수 있다. 이와는 대조적으로 그림 5.4-(b)에 표현되어 있는 회전 엔코더를 사용하여 위치를 추정한 경우의 오차 분포는 오차가 약 190mm까지 넓게 분포하고 오차가 큰 영역에서의 빈도수 또한 높다. 이는 회전 엔코더를 사용한 위치추정 결과가 광 변위센서를 사용한 위치추정 결과보다 부정확하다는 것을 의미한다. 또한, 위치추정 과정에서 이동로봇의 위치좌표 뿐만 아니라 주행방향(heading angle)을 추정가능하며 그 결과는 그림 5.5와 같다. 그림 5.3을 통해 알 수 있듯이, 그림 5.5는 광 변위센서를 통해 추정한 이동로봇의 진행방향이 회전 엔코더를 통해 추정한 주행방향보다 보다 더 정확함을 나타낸다.

앞선 3장의 위치추정 알고리즘에서 설명했듯이 광 변위센서를 사용한 경우와 회전 엔코더를 사용한 경우 모두 추측항법을 통해 위치를 추정하므로 위치추정 과정에서 발생한 오차는 점차 축적되어 이후의 위치추정에 있어서 심각한 영향을 주게 된다. 이러한 현상은 본 연구의 위치추정 실험에서도 나타나며, 그림 5.3에서 알 수 있듯이 위치추정 과정 초기에 발생한 오차(즉, 시작점에서 (0m, 1m)로 이동할 때의 오차)가 점차 축적되어 전체 위치추정 결과가 실제 경로와 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 위치추정 과정에서 한번이라도 오차가 발생하면 위치추정이 계속될수록 그 오차가 점점커지는 경향이 있다.

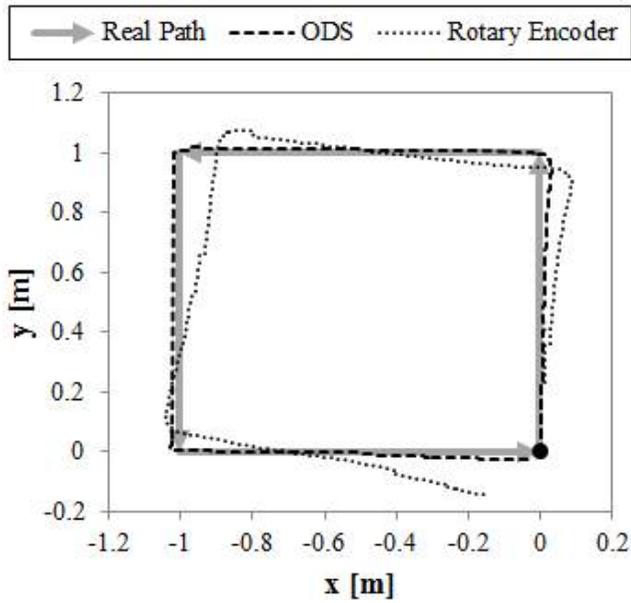
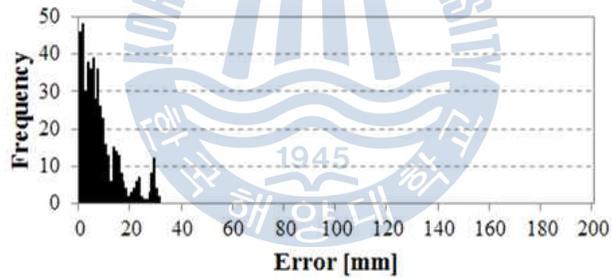
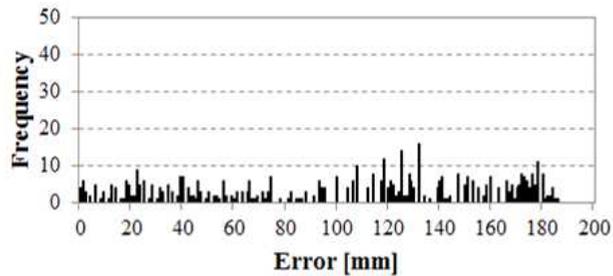


Fig 5.3 Experimental result of the position estimation(Case-1)



(a) using the optical displacement sensor



(b) using the rotary encoder

Fig 5.4 Histogram of the position estimation error(Case-1)

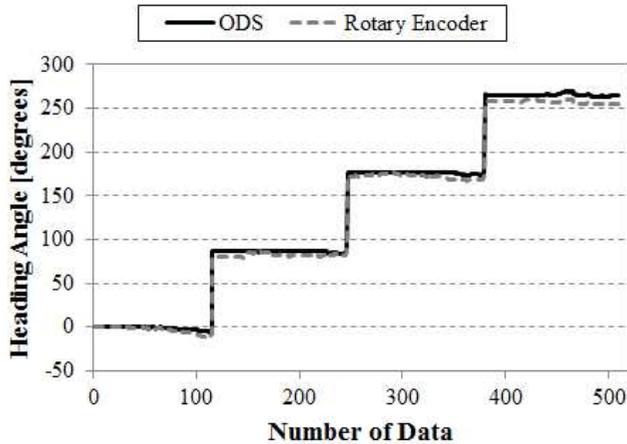


Fig 5.5 Estimation of the heading angle(Case-1)

축소모형 이동로봇을 사용하여 첫 번째 케이스의 실험과 동일한 조건에서 두 번째 케이스의 위치추정 실험을 수행하였다. 추정된 위치정보는 그림 5.6에 표현되어 있으며, 첫 번째 케이스 실험결과와 마찬가지로 광 변위센서를 사용한 위치추정 결과가 회전 엔코더를 사용한 위치추정 결과보다 정확함을 알 수 있다. 특히, 시작점(0m, 0m)에서 경로 중반(-1m, 1m)까지는 두 가지 방법 모두 비교적 정확한 위치추정 결과를 보여주지만 (-1m, 1m)지점에서 주행방향 추정에서 오차가 발생하여 최종 위치추정 결과의 오차가 크게 나타났다. 실제 주행경로와 위치추정 결과의 차이는 그림 5.7과 같이 히스토그램으로 표현되었다. 그림 5.7-(a)에서 알 수 있듯이 광 변위센서를 사용한 위치추정 결과는 실제 경로와의 오차가 40mm 미만으로 실제 경로와 유사하게 나타났다. 반면에 회전 엔코더를 사용한 위치추정 결과는 그림 5.7-(b)로부터 알 수 있듯이 오차가 약 180mm까지 발생하였고, 그 빈도도 오차가 큰 영역에 다수 분포되어 있다. 또한, 그림 5.8의 주행방향 추정 결과도 광 변위센서보다 회전 엔코더를 사용한 위치추정이 정확도가 낮음을 보여준다. 주행방향 추정결과에서도 약 90° 주행방향까지는 다소 정확하게 추정이 되었으나 그 이후부터는 앞선 위치추정 과정에서 발생한 오차로 인해 점차 주행방향 추정의 오차가 증가하였다. 위치추정 실험을 통해 파악한 이동로봇의 최종 위치는 광 변위센서를 사용한 경우 (-0.024m, -0.040m), 회전 엔코더를 사용한 경우 (-0.236m, -0.155m)로 광 변위센서를 사용한 경우가 보다 실제 도착점에 가까움을 알 수 있다.

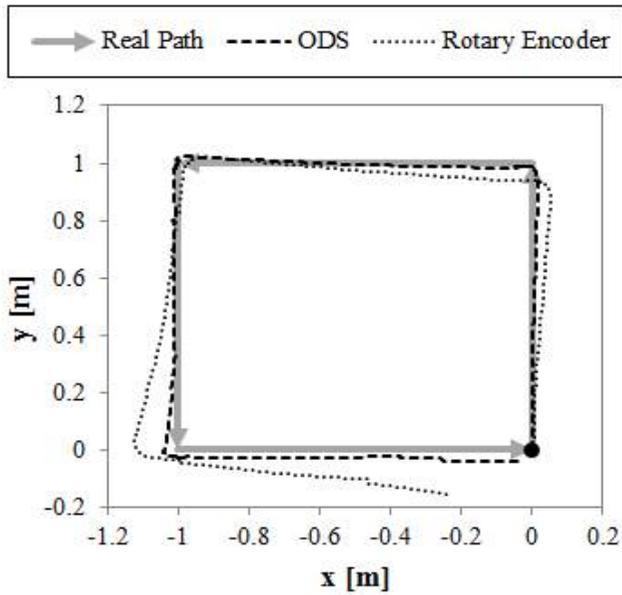
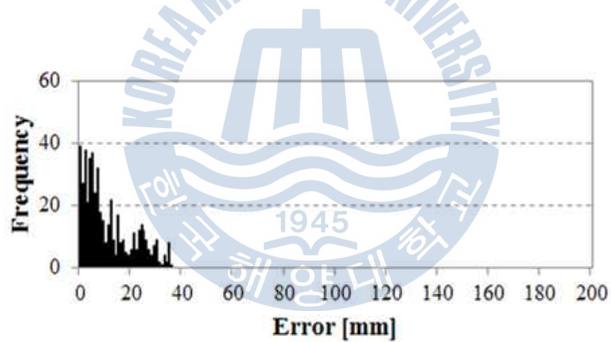
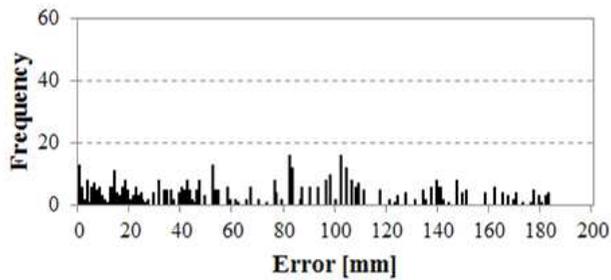


Fig 5.6 Experimental result of the position estimation(Case-2)



(a) using the optical displacement sensor



(b) using the rotary encoder

Fig 5.7 Histogram of the position estimation error(Case-2)

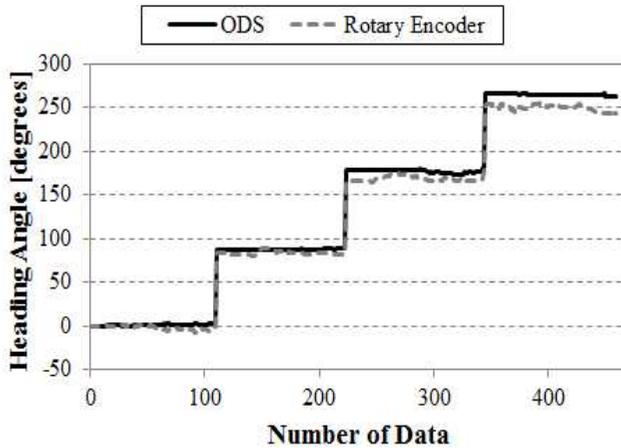


Fig 5.8 Estimation of the heading angle(Case-2)

축소모형 이동로봇을 사용한 세 번째 케이스의 위치추정 실험결과는 그림 5.9와 같으며, 지면과 이동로봇의 차륜 사이에 미끄러짐이 많이 발생하여 회전 엔코더를 사용한 위치추정 오차가 이전의 두 케이스의 실험에서보다 더 크게 나타났다. 또한, 이전의 두 케이스의 실험결과와 마찬가지로 광 변위센서를 사용한 위치추정 결과는 실제 이동로봇의 경로와 매우 유사하게 나타났으며, 오차 히스토그램으로 표현하면 그림 5.10과 같다. 그림 5.10-(a)의 히스토그램에서 알 수 있듯이 광 변위센서를 사용한 위치추정 실험결과는 오차가 20mm 이하의 영역에 분포하고 있으며, 이는 실제 경로와 추정된 실험결과가 매우 유사함을 의미한다. 반면에 회전 엔코더를 이용한 위치추정 실험결과는 그림 5.10-(b)와 같이 오차가 최대 약 240mm까지 크게 나타나고, 오차가 고르게 분포되어 있으므로 전반적으로 위치추정 결과가 부정확함을 알 수 있다. 세 번째 케이스의 위치추정 실험에서도 두 번째 케이스의 실험과 마찬가지로 시작점(0m, 0m)에서 (-1m, 1m)까지는 비교적 정확한 위치추정 결과를 보여주지만, (-1m, 1m)지점에서부터 주행방향 추정에서 오차가 발생하여 이후의 위치추정 오차가 급격히 증가하였다. 그림 5.11은 세 번째 케이스 위치추정 실험의 주행방향 추정결과를 나타내며, 약 180° 회전각도 지점부터 주행방향 오차가 급격히 증가함을 알 수 있다.

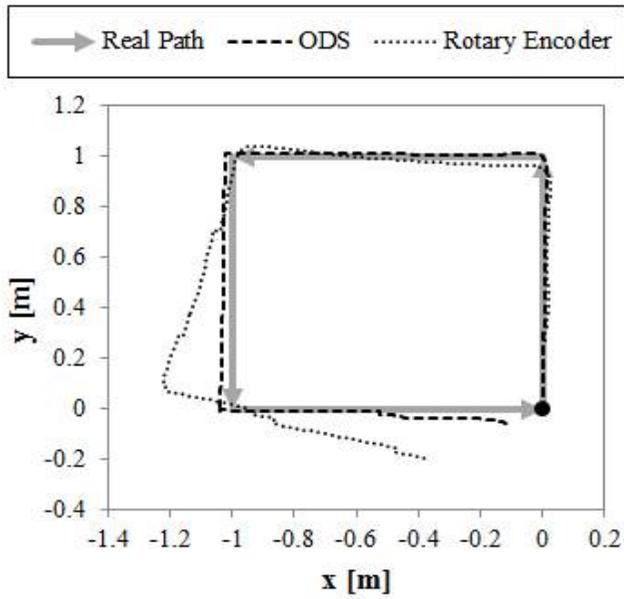


Fig 5.9 Experimental result of the position estimation(Case-3)

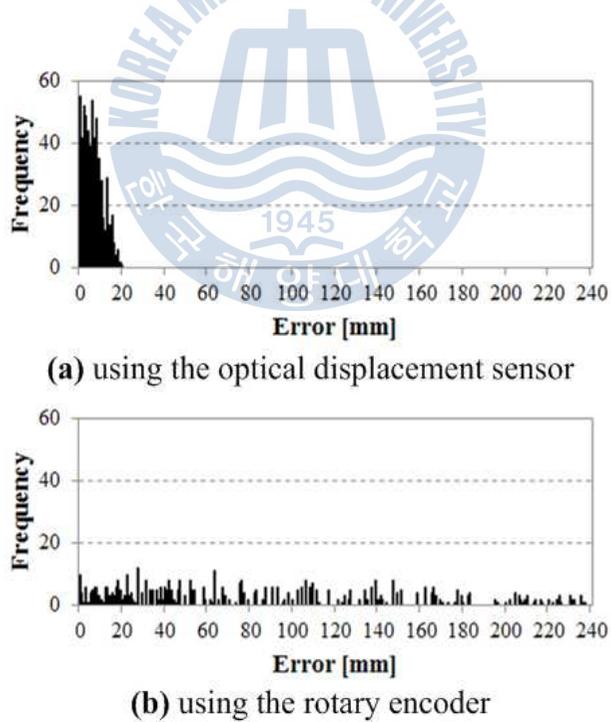


Fig 5.10 Histogram of the position estimation error(Case-3)

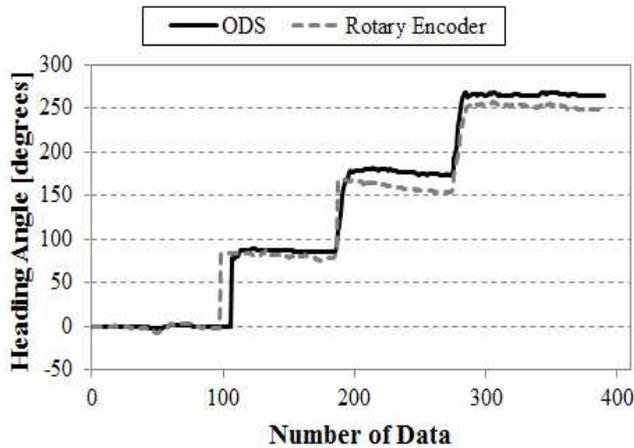


Fig 5.11 Estimation of the heading angle(Case-3)

축소모형 이동로봇을 사용한 위치추정 결과는 앞서 설명한 바와 같이 대표적으로 3개의 케이스만 그래프로 표현되었으며, 전체 5개 케이스에 대한 실험결과는 표 5.2와 같다. 실험결과는 광 변위센서를 사용한 위치추정 시스템이 회전 엔코더를 사용한 경우보다 실제에 가깝게 위치추정을 수행하였으며, 주행방향 추정결과 또한 광 변위센서를 사용한 경우가 회전 엔코더를 사용한 경우보다 더 정확함을 알 수 있다.

Table 5.2 Experimental results of position estimation to the five cases

Experiment Case	End Point [m]		End Heading Angle [°]	
	ODS	Rotary Encoder	ODS	Rotary Encoder
Case-1	(-0.033, -0.028)	(-0.154, -0.147)	263.9	255.0
Case-2	(-0.024, -0.040)	(-0.236, -0.155)	262.8	243.7
Case-3	(-0.100, -0.056)	(-0.368, -0.198)	264.9	247.8
Case-4	(-0.028, -0.031)	(-0.277, -0.162)	263.4	252.1
Case-5	(-0.027, -0.033)	(-0.268, -0.174)	263.1	248.2

제 6 장 결 론

본 논문에서는 선체 청소로봇의 자동화를 위한 위치추정에 관한 연구를 수행하였다. 기존의 회전 엔코더를 기반으로 하는 위치추정 방법은 선체 표면과 로봇 차륜사이에 발생하는 미끄러짐에 많은 영향을 받았으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 비접촉식 광 변위센서를 사용한 새로운 위치추정 시스템과 알고리즘을 제안하였다.

보다 효과적인 위치추정 시스템을 설계하기 위하여 선체 청소로봇의 운용 환경과 주행특성을 분석하였으며, 이를 반영하여 추측항법과 순간회전중심 이론을 기반으로 하는 위치추정 알고리즘을 개발하였다. 효과적인 사용을 위하여 위치추정에 사용되는 광 변위센서의 동작특성을 실험하였으며, 이러한 실험결과를 기반으로 하여 광 변위센서를 교정하였다. 광 변위센서의 교정에 사용된 교정계수는 동작특성 실험으로부터 얻어진 실험 기반의 계수들이며, 반복실험을 통해 얻어진 계수들의 평균값을 반영하여 산정하였다.

위치추정 시스템은 로봇에 직접 설치되는 광 변위센서, 데이터 취득 보드, 지그비 모듈과 지상에 설치되는 지그비 동글, 모니터링 PC로 구성되었다. 위치추정에서 광 변위센서의 오차를 감소시키기 위하여 두 개의 광 변위센서를 사용하였으며, 측정된 상대변위 데이터에서 민감도가 높은 데이터를 선택하여 사용하는 알고리즘을 적용하였다. 또한, 모니터링 PC에 위치추정 알고리즘을 포함하는 LabVIEW로 작성된 그래픽 기반의 위치추정 프로그램을 설치하여 실시간으로 위치추정 결과를 스크린으로 모니터링하고 이를 데이터베이스에 기록할 수 있도록 하였다.

개발된 위치추정 시스템은 대형화된 지원 장치, 소요 비용, 공간의 제약 등을 고려하여 실제 선체 청소로봇이 아닌 이와 동일한 주행제어 방법을 가진 축소 모형 이동로봇에 설치되었으며, 실험실 내에서 성능실험을 수행하였다. 실험결

과를 통해 광 변위센서를 사용한 위치추정 시스템이 기존의 회전 엔코더 기반의 위치추정보다 더 정확하게 실제경로를 추정하는 것을 확인하였으며, 이와 더불어 주행방향에 대한 추정도 더 정확함을 알 수 있었다. 특히, 실험과정에서 축소모형 이동로봇을 주어진 경로로 이동시키는 과정에서 많은 차륜의 미끄러짐이 발생하였으며, 이로 인해 회전 엔코더의 위치추정 오차가 증가하였다. 반면에 광 변위센서를 사용한 위치추정에서는 차륜의 미끄러짐에 대한 영향 없이 위치추정을 수행하였고, 그 결과 실제 경로에 가까운 위치추정 결과를 얻을 수 있었다. 하지만, 제안한 위치추정 알고리즘은 추측항법을 사용하므로 연속적인 위치추정 연산과정에서 점차 오차가 축적되어 한번 발생한 오차로 인해 이후에 위치추정 결과의 오차가 급격히 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 오차는 초기에는 무시할 수 있더라도 한번이라도 발생하면 이후의 위치추정 결과에 치명적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 오차를 최소화하기 위해서는 전체 위치추정 과정 중에서 발생하는 오차를 최소한으로 줄여야 한다.

위치추정에 있어서 센서 측정에 의한 오차는 필연적으로 발생하므로 본 연구에서와 같은 추측항법을 보완하기 위해서는 오차의 축적 없이 위치정보를 제공할 수 있는 추가적인 센서모듈을 사용하여 전체 데이터를 보정해야 한다. 이외에도 개발된 위치추정 시스템을 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 광 변위센서를 선체의 위치정보를 파악할 수 있는 다른 방법(전자석 센서로 선체의 내부 구조 위치 파악 등)과 함께 사용하여 광 변위센서로부터 측정된 데이터를 보완해야 한다. 본 논문을 통해 연구된 위치추정 시스템은 추가적인 보완과정을 거쳐 선체 청소로봇에 직접 설치한 이후에 위치추정 성능을 평가할 예정이며, 선체 청소로봇 뿐만 아니라 미끄러짐에 영향을 많이 받는 다른 시스템에 적용하여 보다 정확한 위치정보를 얻는데 활용 할 계획이다.

참고문헌

1. Narewski, M., 2009. HISMAR-Underwater hull inspection and cleaning system as a tool for ship propulsion system performance increase. *Journal of POLISH CIMAC*, 4(2), pp.227-234.
2. Tunawattana, N., Norman, R. & Roskilly, A.P., 2010. Design of an underwater positioning sensor for crawling ship hull maintenance robots. *Proceedings-Institution of Mechanical Engineers(IMechE) Part M Journal of engineering for the maritime environment*, 224(2), pp.115-126.
3. Townsin, R.L., 2003. The ship hull fouling penalty. *Biofouling*, 19, pp.9-16.
4. Department of Defense Science and Technology Organisation(DSTO -Australian Government), 2008. *Survey of biofouling on Australian Navy Ships: Crustacea; Isopoda and Amphipoda; Caprellidea*, Australia: DSTO.
5. 강훈, 함연재, 오진석, 2012. 선체 표면의 청소작업을 위한 산업용 로봇 제어·감시시스템 개발, 2012년도 마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp.281.
6. 강훈, 오진석, 2013. 작업자 편의를 반영한 선체 청소로봇의 주행 제어시스템 개발, 한국마린엔지니어링학회지, 37(4), pp.391-398.
7. Choset, H., 2001. Coverage for robotics-A survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 31(1), pp.113-126.
8. Bonarini, A., Matteucci, M. & Restelli, M. 2004. A kinematic-independent dead-reckoning sensor for indoor mobile robotics. *IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4, pp.3750-3755.
9. Palacin, J., Valganon, I. & Pernia, R., 2006. The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 126(1), pp.141-147.
10. Sekimori, D. & Miyazaki, F., 2005. Precise dead-reckoning for mobile robots using multiple optical mouse sensors. *Proceedings of the International Conference in Informatics in Control Automation and Robotics*, 2(2), pp.48-54.
11. Ibraheem, M. 2011. Towards a 3D localization system for an intelligent walker in uneven outdoor environments. *16th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, pp.357-362.

12. Tunwattana, N., Roskilly, A.P. & Norman, R. 2009. Investigations into the effects of illumination and acceleration on optical mouse sensors as contact-free 2D measurement devices. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 149(1), pp.87-92.
13. Chu, B.S., Jung, K.M., Han, C.S., & Hong, D.H., 2010. A survey of climbing robots: Locomotion and Adhesion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(4), pp.633-647.
14. Gao, X. & Kikuchi, K., 2004. Study on a kind of wall cleaning robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.391-394.
15. 김은영, 이동훈, 김호경, 2008. 영구자석을 이용한 선체 외판 주행 로봇 개발. *대한기계학회 춘추학술대회 논문집*, 2008(11), pp.990-995.
16. 고석조, 박장식, 장용석, 최문호, 2008. 선박용 감시 로봇 시스템 설계에 관한 연구. *대한기계학회 춘추학술대회 논문집*, 2008(5), pp.152-157.
17. 정원지 et al., 2005. 수직벽면 작업용 이동형 플랫폼 장치의 전자석 휠 개발. *한국정밀공학회 학술대회 논문집*, 2005(10), pp.746-749.
18. 고우현 et al., 2007. 수직면 부착주행로봇의 위치인식 센서기반 주행특성. *대한기계학회 춘추학술대회 논문집*, 2007(10), pp.107-112.
19. 김원배 et al., 2007. 선박 수직면 주행 로봇의 임베디드 제어기 개발. *제어·로봇·시스템학회 대전·충청지부 학술발표회 논문집*, pp.23-26.
20. Krejsa, J. & Vechet, S. 2010. Odometry-free mobile robot localization using bearing only beacons. *14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp.40-45.
21. Moreira, A.G. et al., 2007. Mobile robot outdoor localization using planar beacons and visual improved odometry. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2468-2473.
22. Lin, R., Wang, Z., Sun, R. & Sun, L. 2012. Vision-based mobile robot localization and mapping using the PLOT features. *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, China, pp.1921-1927.
23. The University of Michigan, 2001. *Improved position estimation for mobile robots on rough terrain using attitude information*, The University of Michigan.

24. 고낙용, 김태균, 2010. 외부 센서를 이용한 이동 로봇 실내 위치 추정, 제어·로봇·시스템학회 논문지, 16(5), pp.420-427.
25. Fernandez, R., Gonzalez, E., Feliu, V. & Rodriguez, A.G., 2010. A wall climbing robot for tank inspection. An autonomous prototype. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp.1424-1429.
26. Oklahoma Christian University, 2011. *High-precision robot odometry using an array of optical mice*, Oklahoma Christian University.
27. Army Research Laboratory, 2009. *Modeling and calibrating a 4-wheel skid-steer research robot*, Army Research Laboratory(Aberdeen Proving Ground).
28. Mandow, A., Martinez, J.L., Morales, J. & Blanco, J.L., 2007. Experimental Kinematics for wheeled skid-steer mobile robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1222-1227.
29. Kozlowski, K. & Pazderski, D., Modeling and control of a 4-wheel skid steering mobile robot, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 14(4), pp.477-496.
30. Shamah, B., 1999. *Experimental comparison of skid steering v.s. explicit steering for a wheeled mobile robot*, M.Sc., Pennsylvania: Carnegie Mellon University.
31. Newcastle University, 2008. *HISMAR News Report No.2 2008*, Newcastle University.
32. Park, S.H. & Hashimoto, S. 2010. An intelligent localization algorithm using read time of RFID system. *Advanced Engineering Informatics*, 24(4), pp.490-497.
33. Umea University, 2011. *Kinematics Equations for Differential Drive and Articulated Steering*, Umea University.
34. Ferdinand, P.B. et al., 2007. *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, 8th edition, The McGraw-Hill Companies Inc.:Texas.
35. Avago Technologies, 2009. *ADNS-9500 LaserStream™ Gaming Sensor*[Online] (Updated 1 May 2009) Available at: <http://www.avagotech.com> [Accessed September 2011].
36. Shams, S. & Han, C.S., 2010. Optical mouse sensor as 2-dimensional position controller, *한국정밀공학회 2010년도 춘계학술대회논문집*,

pp.1095–1096.

37. Charniya, N.N.A. & Dudul, S.V., 2010. Simple low-cost system for thickness measurement of metallic plates using laser mouse navigation sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(10), pp.2700–2705.
38. Tresanchez, M., Palleja, T., Teixido, M. & Palacin, J., 2009. The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 155(1), pp.73–81.
39. Ng, T.W., 2003. The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 107, pp.21–25.
40. Minoni, U. & Signorini, A., 2006. Low-cost optical motion sensors: An experimental characterization. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 128, pp.402–408.
41. Tresanchez, M., Palleja, T., Teixido, M. & Palacin, J., 2010. Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 157(1), pp.161–167.
42. Shams, S., Kim, D.S., Choi, Y.S. & Han, C.S., 2011. A novel 3-DOF optical force sensor for wearable robotic arm. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(4), pp.623–628.
43. Hyun, D.J., Yang, H.S., Yuk, G.H. & Park, H.S., 2009. A dead reckoning sensor system and a tracking algorithm for mobile robots. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics*, pp.5559–5563.
44. Xin, Wang. & Shida, K., 2008. Optical mouse sensor for detecting height variation and translation of a surface. *Industrial Technology, IEEE International Conference on ICIT 2008*, pp.1–6.
45. Bonarini, A., Matteucci, M. & Restelli, M., 2005. Automatic error detection and reduction for an odometric sensor based on two optical mice. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, pp.1675–1678.
46. Hyun, D.J., Yang, H.S., Park, H.R. & Park, H.S., 2009. Differential optical navigation sensor for mobile robots. *Sensors and Actuators(A Physical)*, 156(2), pp.296–301.
47. Hyun, D.J., Yang, H.S., Park, H.S. & Kim, H.J., 2010. Dead-reckoning

- sensor system and tracking algorithm for 3-D pipeline, *Mechatronics*, 20(2), pp.213-223.
48. Jackson, J.D., Callahan, D.W. & Marstrander, J., 2007. A rationale for the use of optical mice chips for economic and accurate vehicle tracking. *Proceedings of the 3^d Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, pp.939-944.
49. Zizka, J., Olwal, A. & Raskar, R., 2011. SpeckleSense: fast, precise, low-cost and compact motion sensing using laser speckle. *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 489-498.
50. 함형하 et al., 2012. 실내외 환경에서 휠 오도메트리와 비주얼 오도메트리 정보의 퍼지 융합에 기반한 웨도로봇의 위치추정, 대한기계학회논문집 A권, 36(6), pp.629-635.



감사의 글

지난 석사과정 동안 도움을 주신 모든 분들에게 감사드립니다. 아무것도 모르고 새로운 것을 배워보겠다는 마음 하나로 연구실에 왔는데, 그 동안 많은 분들의 도움과 격려가 있었기에 이렇게 학위논문을 완성할 수 있었습니다.

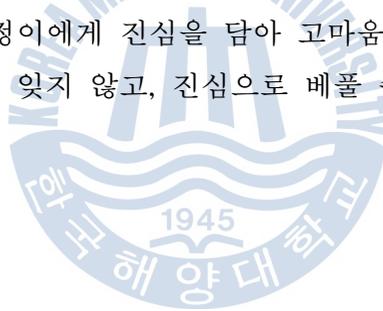
가장 먼저 학위기간 동안 많은 가르침을 주시고 다양한 경험을 할 수 있도록 도와주신 오진석 교수님께 감사드립니다. 교수님께서 말씀해 주신 모든 것들을 명심하고, 앞으로 부족한 부분을 채워나가도록 노력하겠습니다. 그리고 항상 가까이서 참된 모습을 보여주시고 많은 조언을 해 주시는 유희한 교수님과 늘 웃음과 격려로 대해주시는 소명옥 교수님께 감사드립니다. 언제나 친절히 대해주시는 교수님들 덕분에 석사학위 동안 많은 긍정적인 에너지를 받을 수 있었습니다. 또한, 늦은 시간까지 열정적으로 가르침을 주신 이상태 교수님과 항상 밝은 모습으로 새로운 분야를 설명해 주신 이명훈 교수님께도 감사드립니다.

연구실 생활을 하는 동안 많이 부족했지만 함께 공부해온 구성원 분들 덕분에 많은 것들을 배울 수 있었습니다. 가장 먼저 늘 옆에서 많은 것을 공부할 수 있도록 도와준 곽준호 선배님께 깊이 감사드립니다. 항상 가까이서 조언해주고 배려해 주셔서 큰 힘이 되었습니다. 그리고 모르는 것이 있으면 친절하게 가르쳐 주시던 관준형, 항상 좋은 말씀 많이 해 주신 성훈형, 늘 세심하게 배려해 주신 수영누나, 석사과정 내내 무심한 듯 옆에서 많은 배려와 도움을 주신 도영형, 새로운 리더로서 연구실을 이끌고 있는 성영형, 항상 열정으로 가득 찬 지윤형, 오랜 시간 함께 공부한 현석이, 항상 편하게 이야기 할 수 있었던 재연이, 붙임성 좋은 한희, 모두에게 감사드립니다. 더불어 바쁘신 와중에도 항상 신경 써 주시는 함연재 사장님과 양향권 사장님, 연구실에 새로운 활력을 불어 넣어 주시는 류승현 소령님, 최동일 소령님, 이창노 실장님, 백공구 주무관님께에도 감사드립니다. 덕분에 세상을 보는 넓은 시야와 긍정적인 마음가짐을 가질 수 있게 되었습니다. 이제 석사과정을 시작하는 승면형, 세라, 재희, 영민에게도 감사드리며, 학위과정 동안 바라는 모든 것을 이루시길 바랍니다. 이외에도 연구실에서 공부에 전념할 수 있도록 기반을 마련하신 철웅형과 지영누나를

비롯한 연구실을 성장시켜주신 모든 선배님들에게 감사 인사를 전합니다.

대학 입학에서부터 지금까지 주변에 항상 좋은 분들이 있었고, 덕분에 많은 것을 깨닫고 배울 수 있었습니다. 우선 많은 격려와 조언을 아끼지 않으시고 수업 조교까지 시켜주신 조정상 교수님, 늘 실천하는 모습을 보여주시고 좋은 연구실을 소개시켜 주신 김의간 교수님, 항상 반갑게 맞아주시고 좋은 말씀 많이 해주시는 방광현 교수님께 감사드립니다. 그리고 학부과정 동안 존경하는 롤 모델이 되어 주었던 익준이형, 친근하게 대해주던 주경이형 그리고 일일이 언급하지 못했지만 주변에서 힘이 되어준 형들과 친구들, 동생들에게 감사의 말씀을 전합니다. 또한, 자주 연락하지는 못하지만 항상 친근한 친구인 고봉이와 성민이에게도 진심을 담아 고마움을 전합니다.

마지막으로, 사랑으로 키워주시고 믿음을 가지고 지켜봐 주신 부모님과 항상 응원해준 누나, 매형에게 감사의 말씀을 전합니다. 가족들이 있었기에 어려움이 있어도 이겨낼 수 있었습니다. 그리고 학위과정동안 많은 부분을 이해해주고 가장 큰 힘이 되어준 유정이에게 진심을 담아 고마움과 사랑을 전합니다. 항상 모든 것에 대해 감사함을 잊지 않고, 진심으로 베풀 수 있는 사람이 되도록 노력하겠습니다.



2013.06.21.