



공학석사 학위논문

# 단일 바퀴 구동 캐스터 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션

Calibration of Mobile Robot with Single Wheel Powered Caster

2022년 8월

서울대학교 대학원

지능정보융합학과

김 형 철

공학석사 학위논문

# 단일 바퀴 구동 캐스터 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션

Calibration of Mobile Robot with Single Wheel Powered Caster

2022년 8월

서울대학교 대학원

지능정보융합학과

김 형 철

# 단일 바퀴 구동 캐스터 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션

Calibration of Mobile Robot with Single Wheel Powered Caster

지도 교수 박 재 흥

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함 2022년 7월

> 서울대학교 대학원 지능정보융합학과 김 형 철

김형철의 공학석사 학위 논문을 인준함 2022년 6월

위역	원장	곽노준	(인)
부위	원장	박 재 흥	(인)
위	원	전 동 석	(인)

초 록

모바일 로봇의 제어와 오도메트리에 큰 영향을 주는 기구학적 파라미터를 보 정하는 기구학적 캘리브레이션 방법은 다양한 종류의 모바일 로봇에서 연구되어 왔다. 기구학적 캘리브레이션 방법은 모바일 로봇의 종류에 의존적이기 때문에 각 종류에 맞는 기구학적 캘리브레이션 방법이 필요하다. 캐스터 기반 모바일 로봇의 경우 복잡한 기구학적 형상 때문에 기구학적 파라미터가 부정확한 경우 제어 시 응력을 발생시켜 미끄러짐을 유발하기 때문에 정확한 기구학적 파라미터를 아는 것이 중요하다. 캐스터 기반 모바일 로봇을 위하 기구학적 캘리브레이션 방법은 특정 모델인 분할 캐스터에 한하여 연구가 진행되었다. 이전 연구는 캐스터 바퀴를 고정한 경우 바퀴와 바닥 사이에 회전이 일어나면 안 되기 때문에 바닥과 1점 접촉 을 하는 다일 바퀴 캐스터에는 적용할 수 없다. 본 논문은 단일 바퀴 캐스터 기반 모바일 로봇의 정확한 기구학적 파라미터를 구하는 기구학적 캘리브레이션 방법 을 제안한다. 제안하는 방법은 로봇에 장착된 캐스터 모듈 하나를 고정해 고정된 바퀴를 기준으로 로봇이 회전하는 경우 생기는 기하학적 관계와 로봇의 이동 정보 및 모터 엔코더 정보를 이용해 로봇의 기구학적 파라미터를 구한다. 시뮬레이션과 실제 환경에서 진행된 실험을 통해 제안하는 캘리브레이션 방법을 검증하고 이 방법이 정확한 기구학적 파라미터를 구해 오도메트리 정확도를 향상할 수 있음을 보이다.

**주요어**: 기구학적 캘리브레이션, 모바일 로봇, 구동 캐스터 **학 번**: 2020-27847

i

목 차

제 1 장	서론	1
제 1 절	오도메트리 오차	1
제 2 절	연구 동향	2
제 3 절	연구 기여	5
제 4 절	논문 구성	9
제 2 장	ASOC 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션	10
제 1 절	캘리브레이션 방법	10
제 2 절	캘리브레이션 방법의 특징	11
제 3 장	SWPC 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션	14
제 1 절	캘리브레이션 방법	14
제 2 절	캘리브레이션 방법의 특징	19
제 4 장	실험	21
제 1 절	시뮬레이션 환경 캘리브레이션	22
제 2 절	실제 환경 캘리브레이션	24
제 3 절	주행 실험	25
제 5 장	결론	33
참고 문헌		35

#### Abstract

# 표 목차

표 1.1	Comparison of calibration methods for mobile robots	8
표 3.1	Kinematic parameters of each caster module	15
표 4.1	Mean Absolute Error(MAE) of given and calculated param-	
	eters in simulation	23
표 4.2	Kinematic parameters of each SWPC module	27
표 4.3	Mean Absolute Error (MAE) of position and heading	30

# 그림 목차

그림 1.1	Different effect of parameter error on odometry. differential
	drive mobile robot(top) and car-like mobile robot(bottom). 4
그림 1.2	Active Split Offset Caster(ASOC, left) and Single Wheel
	Powered Caster(SWPC, right)
그림 1.3	Single wheel powered caster(SWPC) module(left) and bot-
	tom view of SWPC mobile robot(right) 6
그림 2.1	Rotation of ASOC mobile robot and its geometric relation-
	ship
그림 2.2	Exposed steer axis $[1](left)$ and not exposed steer axis(right). 12
그림 2.3	Problems when applying calibration method of ASOC mo-
	bile robot to SWPC mobile robot
그림 3.1	Rotation of SWPC mobile robot(left). Two different rota-
	tion center point $(P_1, P_2)$ (right)
그림 3.2	Geometric relations: offset $b(\text{left})$ , steer axis $P_s(\text{center})$ , and
	angle error $\beta$ (right)
그림 3.3	Geometry of robot while robot rotates around $P_1$ for com-
	putation of $r$
그림 4.1	Rotation data generating process in simulation

그림 4.2	Three motion capture points for measuring position and	
	orientation of robot.	24
그림 4.3	Slip generated due to tilted ground	25
그림 4.4	Fixing tool for slip prevention. Inner part is connected to	
	stationary caster wheel and outer part is connected to ground.	26
그림 4.5	Self rotation process for calibration.	26
그림 4.6	Trajectory of robot center point measured by motion cap-	
	ture system	27
그림 4.7	Tracking test environment with motion capture system for	
	measuring robot pose	28
그림 4.8	Robot tracking square path in clockwise direction	29
그림 4.9	Robot trajectory of tracking test	31
그림 4.10	Results of tracking test: end position and heading	32

## 제 1 장 서론

모바일 로봇의 주행에 있어, 정밀한 위치 인식은 중요하다. 일반적으로 모바일 로봇의 위치 인식에는 오도메트리(Odometry)가 사용된다 [2,3,4]. 오도메트리는 내재적 정보인 바퀴 엔코더와 모바일 로봇의 기구학적 파라미터를 이용해 단위 시간 동안 이동한 거리를 구하고 이를 누적해 위치 인식을 진행한다. 이 방법은 추가적인 센서를 요구하지 않아 적은 비용으로 사용이 가능하고 내재적 정보인 엔코더 정보와 기구학 정보만을 사용하기 때문에 주변 환경 변화에 강인하며 단 기적으로 정밀한 위치 인식이 가능한 장점이 있다. 하지만, 정보를 누적해 나가는 오도메트리 성질에 의해 주행시간이 증가함에 따라 실제 로봇 위치와 오도메트리 상의 로봇 위치 간의 오차가 증가하는 단점을 가진다 [3,5]. 따라서 정밀한 위치 인식을 위해 오도메트리 오차의 보정이 필요하다.

#### 제 1 절 오도메트리 오차

오도메트리의 오차 원인은 크게 시스템적 오차와 비시스템적 오차 두 가지로 구분할 수 있다 [4,5]. 시스템적 오차는 바퀴의 위치 오차, 직경 오차 등 모바일 로 봇의 기구학적 오차에 의해 발생한다. 시스템적 오차는 주행 환경의 영향을 받지 않기 때문에 주행 전 미리 보정을 진행해 오도메트리 오차를 감소시킬 수 있다.

비시스템적 오차는 불균일한 노면, 바닥 장애물, 급가속 및 급감속, 외력 등에 의한 미끄러짐과 같이 로봇과 주행환경의 상호작용에 의해 발생한다 [5,6]. 비시스 템적 오차는 주행 환경의 영향을 받아 항상 일정하게 발생하지 않기 때문에 확률 적 [7] 접근, 추가 센서 [8,9]의 이용, 그리고 최근에는 학습 [10]을 통해 비시스템적

오차를 보정하는 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 기구학적 캘리브레이션을 통 해 시스템적 오차를 보정하고 그 후 비시스템적 오차를 보정해 오도메트리 오차를 감소시킨다 [6]. 본 논문에서는 기구학적 캘리브레이션을 통해 오도메트리 오차 중 하나인 시스템적 오차를 보정하는 데 중점을 둔다.

#### 제 2 절 연구 동향

시스텎적 오차 보정을 위한 기구학적 캘리브레이션 방법은 여러 연구에서 제 안되었다 [1,11,12,13,14,15,16,17]. 차동 구동 로봇을 캘리브레이션 하는 방법 중 하나인 UMBmark [11] 방법은 차동 구동 로봇의 기구학 정보인 바퀴의 직경 차이 및 거리 차이가 로봇의 직진 주행과 제자리 회전 주행에 미치는 영향을 분석한다. 차동 구동 로봇으로 하변의 길이가 4m인 정사각형의 경로를 직진 주행과 제자리 회전 주행을 이용해 한 바퀴 주행하여 제자리로 돌아온 후 최종 위치 오차를 측 정하는 실험을 시계방향과 반시계방향으로 한번씩 진행해 두 오차를 분석하여 두 바퀴간 직경 차이와 두 바퀴간 거리 차이를 구해 시스템적 오차를 보정한다. 이 방법은 직경 차이와 거리 차이가 오도메트리에 주는 영향이 상호 독립적이라고 가정해 주행 시 발생하는 오도메트리 오차와 기구학 오차간의 관계를 분석하지만, 사실 직경 차이와 거리 차이는 주행에 복합적인 영향을 주기 때문에 이 방법을 통한 정확한 시스템적 오차 보정은 어렵다 [12]. Jung and Chung [12]은 두 기구학 오차의 복합적인 영향을 고려해 위치 오차를 분석하여 기존 논문의 문제점을 해 결해 보정 성능을 향상했다. Abbas and Ahmed [18]는 차동 구동 모바일 로봇을 정사각형 경로가 아닌 원형 경로를 시계 및 반시계 방향으로 주행시켜 경로 반경 측정을 통해 오차를 보정하는 BCPT(Bi-directional Circular Path Test)를 제안해 기존의 사각 경로 주행보다 간단하게 보정이 가능한 방법을 제시했다.

한편, 차량형 로봇을 위한 캘리브레이션 방법 [13,15,16,17] 또한 제안되었다. 차량형 로봇은 차동 구동 로봇의 제자리 회전 움직임을 구현하지 못해 차동 구동 로봇의 방법에서 제안한 정사각형의 경로를 따라 주행할 수 없으며, 로봇 구조가 달라 기구학적 오차에 의한 실제 로봇의 경로와 오도메트리 경로의 영향이 달라 차동 구동 로봇을 분석한 관계를 적용할 수 없기 때문에 차동 구동 로봇의 캘리브 레이션 방법 [11,12]을 차량형 로봇에 적용하는 것은 어렵다 [13]. Lee and Yoo [13] 는 위의 이유로 차량형 로봇이 구현이 가능한 주행 경로를 만들고 차량형 로봇의 기구학적 파라미터의 오차와 오도메트리의 관계를 새롭게 분석하여 차량형 로봇에 적용 가능한 캘리브레이션 방법을 제안했다. 차동 구동형 모바일 로봇과 차량형 모바일 로봇의 차이에서 알 수 있듯이, 모바일 로봇의 기구학적 캘리브레이션 방법 은 모바일 로봇의 종류에 의존적이다. 기구학적 캘리브레이션에서 구하고자 하는 기구학적 파라미터는 모바일 로봇의 종류에 따라 다르고, [그림 1.1]과 같이 기구 학적 파라미터의 오차에 의한 오도메트리의 영향은 로봇의 종류에 따라 다르며 모바일 로봇이 구현 가능한 움직임 또한 로봇의 종류에 따라 다르다. 기구학적 캘 리브레이션 방법은 로봇의 종류에 의존적이기 때문에 모바일 로봇의 종류에 맞는 기구학적 캘리브레이션 방법의 제안이 필요하다.

캐스터 기반 모바일 로봇은 어떤 상태에서도 모든 방향으로 가속이 가능한 홀로노믹 모바일 로봇 중 하나다. 홀로노믹 모바일 로봇은 이동에 제약이 없어 위 치제어가 간단하며 좁은 환경에서의 이동이 용이하고 반응성 있는 행동(Reactive behavior)이 가능한 장점이 있다. 하지만 홀로노믹 모바일 로봇은 관절 단위의 제 어가 복잡하며 기구학적 구성이 복잡하거나 특수한 바퀴를 사용하며 많은 모터를 필요로 해 가격이 비싼 단점이 있다. 다른 홀로노믹 모바일 로봇으로는 메카넘 바퀴를 사용하는 모바일 로봇이 있다. 메카넘 바퀴 모바일 로봇은 특수한 형태의



그림 1.1: Different effect of parameter error on odometry. differential drive mobile robot(top) and car-like mobile robot(bottom).

바퀴를 사용해 캐스터 기반 모바일 로봇보다 적은 모터를 요구하는 장점이 있지만, 특수한 바퀴 형상에 의해 사용 환경이 다소 제한적이고, 바닥과의 접촉점이 불연속 적으로 변해 진동을 발생시키며, 롤러의 수동적인 회전 특성에 의해 에너지 효율이 낮은 문제가 있다 [19,20]. 캐스터 기반 모바일 로봇은 일반 바퀴를 사용하는 대 신 바퀴의 방향을 정하는 조향축(Steering axis)과 바퀴의 회전축 간에 거리 차이 (Offest)를 두어 [그림 1.2]에서 볼 수 있듯이 바퀴의 회전과 조향축의 회전을 통해 두 수직한 방향의 힘을 만들어 홀로노믹의 특성을 가지고 일반 바퀴를 사용하기 때문에 메카넘 바퀴가 가지던 문제에서 자유롭다는 장점이 있다 [21,22]. 캐스터 기반 모바일 로봇의 경우 복잡한 기구학적 구성 때문에 기구학적 파라미터가 부정 확한 경우 제어 시 모바일 로봇에 장착된 각 캐스터 모듈이 힘을 내는 방향이 다른 모듈과 간섭을 일으켜 응력을 발생시키고 발생한 응력은 바퀴와 환경간의 미끄러



그림 1.2: Active Split Offset Caster(ASOC, left) and Single Wheel Powered Caster(SWPC, right).

짐을 유발해 비시스템적 오차의 증가에도 영향을 주게 된다. 차동 구동 [11,12,14], 차량형 [13,15,16,17], 메카넘 [23] 등의 모바일 로봇을 위한 캘리브레이션 방법은 활발하게 연구되었으나, 캐스터 기반 모바일 로봇은 오도메트리 오차의 보정 필요 성 [21]이 언급되었음에도 불구하고, 특정 모델인 능동 분할 오프셋 캐스터(Active Split Offset Caster, ASOC) [1]에 한해 캘리브레이션 방법이 연구되었다.

#### 제 3 절 연구 기여

캐스터 기반 로봇에 사용되는 캐스터는 대표적으로 [그림 1.2]과 같이 ASOC 와 단일 바퀴 구동 캐스터(Single Wheel Powered Caster, SWPC) [22]가 있다. ASOC는 차동 구동 로봇과 같은 형태로 두 바퀴를 제어해 조향축(Steering axis) 에서 원하는 움직임을 만들어 낸다. SWPC는 기본적인 캐스터 형태로 바퀴와 조향 축을 모두 모터로 제어해 조향축에서 원하는 움직임을 만들어 낸다. 본 논문에서는 기존 연구에서 언급된 [21] SWPC 기반 모바일 로봇을 위한 기구학적 캘리브레이



그림 1.3: Single wheel powered caster(SWPC) module(left) and bottom view of SWPC mobile robot(right).

션 방법을 제안한다. [그림 1.3]에 SWPC 모듈과 이 모듈을 사용한 모바일 로봇을 나타냈다.

앞서 언급된 기구학적 캘리브레이션 방법 [1,11,12,13]과 본 논문에서 제안 하는 캘리브레이션 방법의 특징을 [표 1.1]에 정리하였다. 차동 구동형 모바일 로 봇 [11,12]과 차량형 모바일 로봇 [13]을 위한 기구학적 캘리브레이션 방법의 경우 모바일 로봇을 정해진 주행 경로대로 주행하여 주행 시 발생한 오도메트리 오차 와 기구학적 파라미터의 오차간의 관계를 분석하여 기구학적 파라미터의 보정을 진행한다. 이러한 방법은 모바일 로봇의 주행을 통해 정보를 얻기 때문에 주행 시 발생하는 비시스템적 오차의 영향을 받아 실험을 반복적으로 진행해 비시스템적 오차의 영향을 줄여야 하는 번거로움이 있다 [18]. 또한 넓은 면적의 실험 환경을 요구하므로 공간적 제약이 크고 실험 환경의 통제 및 구성에 많은 노력이 필요하게 된다. ASOC 기반 모바일 로봇 [1]을 위한 기구학적 캘리브레이션 방법과 본 논문 이 제안하는 기구학적 캘리브레이션 방법은 기하학적인 관계를 바탕으로 제자리

 $\mathbf{6}$ 

회전 정보를 분석함으로써 비시스템적 오차에 비교적 강인해 실험을 여러번 진행 할 필요가 없어 실험 시간을 효과적으로 줄일 수 있다. 또한 캘리브레이션을 위해 상대적으로 좁은 면적의 실험 환경을 필요로해 실험환경 통제 및 구성이 간단하다.

UMBmark [11] 방법은 차동 구동형 모바일 로봇의 두가지 기구학적 오차가 오 도메트리에 독립적으로 영향을 준다 가정하여 관계를 구하였고, Jung and Chung [12]은 두가지 기구학적 오차가 오도메트리에 복합적으로 영향은 주는 관계를 분 석하여 기구학적 캘리브레이션 방법의 성능을 향상시켯고 Lee and Yoo [13]는 차동 구동형 모바일 로봇을 위한 방법을 차량형 모바일 로봇에 적용할 수 없음을 보이고 새롭게 차량형 모바일 로봇의 기구학적 오차와 오도메트리 오차가의 관계 를 분석하고 새로운 주행경로를 제안하였다. ASOC 기반 모바일 로봇 [1]을 위한 방법은 외부 측정장비를 필요로 하지 않지만 그 대신 보정하고자 하는 기구학적 파라미터중 로봇에 설치된 캐스터 모듈간의 거리를 직접 측정해야 한다. 본 논문 에서 제안하는 방법은 SWPC 기반 모바일 로봇에 적용 가능한 방법으로, SWPC 기반 모바일 로봇이 제자리 회전을 하는경우 생기는 기하학적 관계를 이용해 캘 리브레이션을 진행하여 경로주행을 필요로 하는 방법에 비해 비시스템적 오차의 영향이 적어 반복적으로 실험을 진행할 필요가 없으며 적은 실험 공간을 필요로 해 실험 환경의 구성이 간편해진다. 내부 정보로 알아낼 수 없는 SWPC 기반 모바일 로봇의 제자리 회전 정보를 알아내기 위해 외부 측정장비를 사용했으며 그 대신 보 정하고자 하는 모든 기구학적 파라미터를 직접 측정하는 과정 없이 캘리브레이션 방법을 통해 구할 수 있게 된다.

Compared Method	[11]	[12]	[13]
Drive Type	Differential Drive	Differential Drive	Car-Like
External Metrology System	0	0	0
Characteristic	Assuming kinematic errors are independent	Considering dependent relationship between kinematic errors	Assuming kinematic errors are independent
Calibration Method	- Using relationship between - Analyzin	ı odometry error and kiner g odometry error after dri	natic parameter error ving
<b>Compared Method</b>	[1]	Proposed	Method
Drive Type	Active Split Offset Caster(ASOC)	Single Wheel Caster(SV	l Powered WPC)
External Metrology System	X	0	
Characteristic	Requiring direct-measuring	Not requiring dir	ect-measuring
Calibration Method	- Usi - Analyz	ng geometric relationship ing self-rotating informati	n

 $\boxplus$  1.1: Comparison of calibration methods for mobile robots.

#### 제 4 절 논문 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ASOC 기반 모바일 로봇을 위한 캘리브레이션 방법을 소개한다. 3장에서는 새롭게 제안하는 SWPC 기반 모바일 로봇을 위한 캘리브레이션 방법을 소개한다. 4장에서는 시뮬레이션 환경에서 실 험을 진행해 제안하는 방법을 검증하고 실제 환경에서 캘리브레이션을 진행하여 캘리브레이션 전후의 파라미터를 이용해 주행 실험을 진행하여 제안하는 방법의 유효성을 보인다. 5장에서 본 논문을 결론짓는다.

## 제 2 장 ASOC 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션

이 장에서는 Doebbler and Valasek [1]가 제안한 능동 분할 오프셋 캐스터 (Active Split Offset Caster, ASOC) 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션 방법을 소개한다. 이 방법에 사용된 ASOC 기반 모바일 로봇은 로봇에 장착된 캐스터 모듈의 조향축이 외부로 노출된 구조를 가진다. 이러한 구조 덕분에 조향축 간의 거리 D를 직접 측정하기에 용이하다는 장점이 있다. 이 장점을 살려 Doebbler and Valasek [1]은 조향축 간의 거리 D를 직접 측정하는 대신 외부 측정장비의 도움 없이 캘리브레이션을 할 수 있는 방법을 제시했다.

#### 제 1 절 캘리브레이션 방법

이 방법은 먼저 로봇에 장착된 ASOC 모듈들 중 하나의 모듈의 두 바퀴가 움직 이지 않도록 바퀴에 장착된 두 모터를 고정한다. 고정된 모듈의 조향축을 기준으로 로봇이 회전할 수 있도록 나머지 모듈들의 바퀴를 정렬하고 모터에 전류를 약하 게 가해 로봇이 낮은 속력으로 회전하게 한다. 낮은 전류를 고정적으로 가하였기 때문에 로봇이 천천히 회전하면서 자연스럽게 [그림 2.1]의 좌측과 같이 정렬을 하 면서 회전하게 된다. 고정된 모듈의 조향축을 기준으로 로봇이 회전을 하게 되면 움직이는 모듈의 바퀴의 진행방향은 바퀴와 고정된 모듈의 조향축이 이루는 선과 수직을 이루는 [그림 2.1]의 우측과 같은 기하학적 관계를 얻을 수 있다. 하나의 모듈에 대해 회전을 시계방향과 반시계방향으로 한 번씩 회전시켜 두 상황 에서의 기하학적 관계를 이용해 캘리브레이션을 진행하게 된다. 모듈간의 거리 D와 시계 방향과 반시계방향 회전 시 움직이는 모듈의 조향축 엔코더를 통해 구한 측정된



그림 2.1: Rotation of ASOC mobile robot and its geometric relationship.

조향각도 그리고 회전 시 로봇이 이루는 기하학적 관계를 이용해 움직이는 모듈의 각도 오차 β와 오프셋 r<sub>c</sub>를 구한다. 로봇이 시계방향과 반시계방향으로 회전할 때 로봇이 회전하는 동안 움직이는 모듈 바퀴의 위치가 지나간 거리와, 해당 바퀴가 같은 시간 동안 회전하면서 지나간 거리는 같기 때문에 해당 관계를 이용해 바퀴 의 반지름 r<sub>wi</sub>와 오프셋 축에서부터 각 바퀴까지의 거리 d<sub>i</sub>를 구한다. 이와 같은 과정을 통해 ASOC 기반 모바일 로봇을 캘리브레이션 할 수 있다.

#### 제 2 절 캘리브레이션 방법의 특징

이 방법은 ASOC 기반 모바일 로봇을 캘리브레이션 하기에는 적합하지만, SWPC 기반 모바일 로봇을 캘리브레이션 하기에는 몇가지 문제점이 존재한다. 먼저, 기존 방법 [1]은 외부 측정장비 없이 캘리브레이션을 진행하기 위해 캐스터 모듈 간 거리 D를 직접 측정하고 직선 이동 제어의 용이성을 위해 각 모듈 간 중점 을 직접 측정해 로봇 원점으로 사용한다. 기존 방법 [1]에서 사용된 로봇은 모듈의



그림 2.2: Exposed steer axis [1](left) and not exposed steer axis(right).

조향축이 외부로 노출된 구조를 가져 모듈 간 거리와 중점을 측정하기 용이했다. 하지만, 대부분의 모바일 로봇은 조향축이 외부로 노출되지 않은 구조를 가지고 있고 본 연구에 사용되는 로봇 또한 [그림 2.2]과 같이 조향축이 외부로 노출되는 구조를 가지고 있지 않기 때문에 로봇을 분해해 측정하는 과정이 필요하게 된다. 또한, 조향축 사이 직선거리에 다른 부품들이 장착되어 있다면 직접 측정이 어려워 진다. 모듈 간 거리를 직접 측정을 하는 과정은 직접 측정을 하면서 생기는 오차에 취약해지는 문제 또한 있다.

기존 방법 [1]은 캐스터 모듈의 바퀴가 하나인 경우 적용이 불가능하다. ASOC 모듈의 두 바퀴를 고정하는 경우, 2점 접촉을 이루는 바퀴 부분에서 회전과 직선 운동이 일어나지 않아 고정 모듈의 조향축을 기준으로만 로봇이 회전한다. 따라서 조향축의 엔코더 정보를 통해 모바일 로봇의 회전 정보를 구할 수 있다. 하지만 바퀴가 하나만 있는 SWPC 모듈의 경우 조향축 모터의 고정을 해제하고 바퀴축 모터만 고정해 로봇을 회전시키게 되면, [그림 2.3]의 좌측과 같이 1점 접촉을 하는 바퀴 부분에서 원하지 않은 회전이 발생한다. 즉, 로봇이 고정 모듈의 조향축을 기 준으로 정확한 회전운동을 하는것이 불가능해진다. 고정 모듈의 조향축과 바퀴축



그림 2.3: Problems when applying calibration method of ASOC mobile robot to SWPC mobile robot.

모터를 모두 고정해 로봇을 회전시키게 되면 고정 모듈의 바퀴를 기준으로 로봇이 회전하게 되지만, 내부 정보만으로는 로봇의 회전 정보를 구할 수 없게 된다. 또한, 기존 방법에서 사용하는 움직이는 모듈의 파라미터를 계산하는 식에 [그림 2.3]과 같이 고정 모듈의 정보가 섞여 정확한 파라미터의 계산이 어려워진다. 다음 장에 서는 앞서 언급된 문제들을 해결하면서 SWPC 기반 모바일 로봇에 적용 가능한 캘리브레이션 방법을 제안한다.

# 제 3 장 SWPC 기반 모바일 로봇의 캘리브레이션

이 장에서는 기하학적 관계를 이용한 단일 바퀴 구동 캐스터(Single Wheel Powered Caster, SWPC) 기반 로봇의 캘리브레이션 방법을 소개한다. 앞서 언 급한 것처럼 SWPC 기반 로봇은 하나의 모듈을 완전히 고정하여 고정된 모듈의 바퀴를 기준으로 로봇을 회전시킬 수 있다. 하지만 모바일 로봇이 고정된 모듈의 바퀴를 기준으로 회전하는 경우 모터 엔코더만으로는 로봇의 회전 정보를 알 수 없게 된다. 따라서, 본 논문이 제안하는 방법은 로봇의 회전 정보를 얻기 위해 외부 측정장비를 사용한다. 외부 측정장비를 사용함으로써, 내부 정보로 측정이 불가능 했던 SWPC 기반 로봇의 회전 정보 측정이 가능해지고 이를 통해 구하고자 하는 모든 기구학적 파라미터를 직접 측정하는 과정 없이 캘리브레이션 과정을 통해 구할 수 있게 된다.

#### 제 1 절 캘리브레이션 방법

본 논문에서 구하고자 하는 SWPC 기반 로봇의 기구학적 파라미터는 [표 3.1] 에 정리했으며 [그림 1.3]에 나타냈다. *P<sub>s</sub>(x<sub>s</sub>, y<sub>s</sub>)*는 모바일 로봇 원점 좌표계 기준 로봇에 장착된 캐스터 모듈의 조향축의 위치다. *β*는 조향각도의 영점을 구하기 위해 장착된 영점센서의 예상 위치와 실제 위치간의 차이에 의해 발생하는 각도 오차다. *b*는 캐스터 모듈의 조향축과 바퀴축 간의 거리 오프셋이고 *r*은 캐스터 모듈 바퀴의 반지름이다.

위의 파라미터를 구하는 캘리브레이션을 위해 외부 측정장비를 통한 회전 정 보의 취득 과정이 필요하다. 먼저, 하나의 캐스터 모듈의 조향축과 바퀴축 모터를

$P_s(x_s, y_s)$	Position of steering axis with regards to robot base
	Angle error between assumed and real position of
β	homing sensor of steering axis
b	Distance between steering axis and wheel axis(Offset)
r	Wheel radius

표 3.1: Kinematic parameters of each caster module.

모두 고정하고(정적 모듈, stationary caster) 나머지 모듈(동적 모듈, active caster) 이 정적 모듈을 기준으로 회전할 수 있도록 같은 방향을 바라보게끔 정렬시킨다. 그 후 동적 모듈의 바퀴축 모터에 일정한 토크를 주고 조향축 모터는 자유회전을 하도록 두어 정적 모듈의 바퀴를 기준으로 자연스럽게 정렬을 하면서 로봇이 [그림 3.1]의 좌측 그림과 같이 회전하게 만든다. 로봇이 회전하는 동안 외부 측정장비로 측정된 로봇 원점과 방향 정보를 통해 로봇 좌표계 기준 로봇의 회전 중심점 *P*<sub>1</sub> 을 구한다. 그 후, 정적 모듈의 조향각도를 변경한 다음 위의 과정을 반복하여 [그 림 3.1]의 우측 그림과 같이 로봇 좌표계 기준 다른 위치에서의 회전 중심점 *P*<sub>2</sub>를 구한다.

바퀴가  $P_1, P_2$ 의 위치에 있을 때 엔코더로 측정한 조향각도  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ 를 통해  $\Delta \theta$ 를 구한다. 여기서, 측정한  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ 에는 실제 각도  $\theta_1, \theta_2$ 의 정보와 각도 오차  $\beta$ 의 정보가 들어있지만,  $\beta$ 는 영점센서의 예상 위치와 실제 위치의 차이에 의해 발생한 값으로 상수 값이기 때문에 [식 3.1]과 같이 두 측정값의 차이를 구하는 과정에서  $\beta$ 의 영향은 상쇄된다.



그림 3.1: Rotation of SWPC mobile robot(left). Two different rotation center point $(P_1, P_2)$ (right).

$$\Delta \theta = \hat{\theta}_2 - \hat{\theta}_1$$
  
=  $(\theta_2 + \beta) - (\theta_1 + \beta)$   
=  $\theta_2 - \theta_1$  (3.1)

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> 두 점 모두 정적 모듈의 조향축 P<sub>s</sub>(x<sub>s</sub>, y<sub>s</sub>)를 원의 중심으로 두고 오프셋
b를 반지름으로 둔 원 위의 점이므로 [그림 3.2]의 좌측 첫번째 그림과 같이 표현이
가능하다. 원 위의 두 점 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>를 알고 두 점 사이의 각도 Δθ를 알기 때문에 [식
3.2]의 관계를 통해 해당 원의 반지름이자 해당 캐스터 모듈의 조향축과 바퀴축
사이의 거리인 b를 구할 수 있다.



그림 3.2: Geometric relations: offset b(left), steer axis  $P_s(\text{center})$ , and angle error  $\beta(\text{right})$ .

$$\overline{P_1 P_2} = 2b \sin \frac{|\Delta \theta|}{2} \tag{3.2}$$

그 후, [그림 3.2]의 좌측 두번째 그림의 관계를 통해 조향축의 위치 *P<sub>s</sub>(x<sub>s</sub>, y<sub>s</sub>)* 를 구한다. [식 3.3]를 통해 *φ*를 구하고, [식 3.4]과 같이 *P*<sub>1</sub>을 기준으로 벡터  $\overrightarrow{P_1P_2}$ 를 *φ*만큼 회전한 방향으로 반지름 *b*의 크기만큼 이동하여 원의 중심점 *P<sub>s</sub>(x<sub>s</sub>, y<sub>s</sub>)* 를 구한다. 여기서, *rot*는 *z*축([그림 3.2]의 평면에서 수직한 축)으로 회전하도록 하는 행렬이다.

$$\phi = sign(\Delta\theta) * \frac{\pi - |\Delta\theta|}{2}$$
(3.3)

$$P_s = P_1 + b \operatorname{rot}(\phi) * \frac{\overrightarrow{P_1 P_2}}{|P_1 P_2|}$$
(3.4)

[그림 3.2]의 좌측 세번째 그림과 같이, 로봇 좌표계 기준 벡터  $\overrightarrow{P_1P_s}$ 의 각도  $\theta_1$ 은 바퀴가  $P_1$ 위치에 있을 때 해당 캐스터 모듈의 실제 조향각도다. 정적 모듈 의 바퀴가  $P_1$ 의 위치에 있을 때 측정한 조향각도(measured direction)  $\hat{\theta}_1$ 과 실제 조향각도(real direction)  $\theta_1$ 의 차이를 구하여 각도 오차  $\beta$ 를 구한다. 이 과정을 모 바일 로봇에 장착된 모든 모듈을 한번씩 고정해가면서 진행해 각 모듈의 기구학적 파라미터  $P_s(x_s, y_s), \beta, b$ 를 구할 수 있다.

그 후, [그림 3.3]에 표현한 것과 같이 위 과정에서 얻은 회전 정보와 기구학적 파라미터를 이용해 바퀴의 반지름 r을 구한다. 동적 모듈의 바퀴가 정적 모듈의 바퀴를 기준으로 회전하기 때문에 회전 중심점과 동적 모듈의 바퀴 사이의 거리인  $\overline{P_1P_w}$ 와 동적 모듈의 바퀴의 진행방향인  $\overline{P_wP_s}$ 가 서로 수직이다. 해당 관계를 이 용해 [식 3.5]과 같이 동적 모듈의 바퀴와 정적 모듈의 바퀴 간의 거리  $D(\overline{P_1P_w})$ 를 구할 수 있다. 로봇이  $\Delta \theta_{robot}$ 만큼 회전하는 동안 동적 모듈 바퀴의 위치가 지나간 거리와, 해당 동적 모듈 바퀴가 같은 시간 동안  $\Delta \theta_{wheel}$ 만큼 회전하면서 지나간 거 리는 같기 때문에 [식 3.6]를 통해 바퀴의 반지름 r을 구할 수 있다. 여기서,  $\Delta \theta_{robot}$ 은 외부 측정장비를 통해 측정하고 같은 시간 동안 캐스터 모듈의 바퀴 엔코더를 측정해  $\Delta \theta_{wheel}$ 을 측정한다. 정적 모듈 한 개당  $P_1, P_2$  두 개의 고정점을 갖기 때문 에 위의 과정을 통해 정적 모듈 한 개당 각각의 동적 모듈에 대한 반지름 r 정보를 2번 얻을 수 있다. 총 N 개의 모듈을 가진 로봇을 사용하는 경우, 한 모듈의 r에



그림 3.3: Geometry of robot while robot rotates around  $P_1$  for computation of r.

수 있다.

$$D = \sqrt{b^2 + \overline{P_1 P_s}^2} \tag{3.5}$$

$$r\Delta\theta_{wheel} = D\Delta\theta_{robot} \tag{3.6}$$

## 제 2 절 캘리브레이션 방법의 특징

위 과정을 통해 SWPC 기반 로봇의 모든 파라미터를 구할 수 있다. 제안된 방 법의 특징은 다음과 같다. 주행 경로를 따라 주행하는 과정 없이 제자리 회전만으로 모바일 로봇의 기하학적 관계를 분석해 기구학적 캘리브레이션을 진행하기 때문에 비시스템적 오차로부터 강인해 실험을 반복적으로 진행하지 않아 실험 시간 단축 이 가능하며 좁은 실험 공간을 필요로 해 실험 공간의 구성 및 통제가 간단하다. 기존 방법[11]의 로봇 원점과 모듈 간 거리를 직접 측정해야 하는 문제를 보완하고 SWPC 기반 로봇의 캘리브레이션이 가능하게 했다. 또한, 제안하는 방법은 최소 2 개의 캐스터 모듈만 있다면 캘리브레이션 방법을 적용할 수 있고 캐스터의 개수가 늘어나더라도 동일한 방법으로 캘리브레이션이 가능하다.

### 제 4 장 실험

서론에서 언급된 바와 같이, 기구학적 캘리브레이션 방법은 모바일 로봇의 종 류에 의존적이다. 차동 구동형 모바일 로봇과 차량형 모바일 로봇의 캘리브레이션 방법 [11,12,13]의 경우 기구학적 파라미터 오차와 주행 시 발생하는 오도메트리 오차의 관계를 이용한다. SWPC 기반 모바일 로봇의 경우 차동 구동형과 차량 형 로봇이 가지고 있지 않은 조향축과 바퀴축 사이의 거리인 오프셋 파라미터를 가지고 있고 전체적인 구조와 구동 방법이 상이하다. 이러한 이유로 SWPC 기반 로봇이 가지는 기구학적 오차와 오도메트리 오차의 관계는 차동 구동형과 차량형 로봇이 가지는 친구학적 오차와 오도메트리 오차의 관계는 차동 구동형과 차량형 리루이 가지는 관계와 다르다. 캐스터 기반 로봇을 위한 기존 방법 [1]은 ASOC 기반 모바일 로봇을 위한 방법으로 캐스터 모듈이 바닥과 2점 접촉을 해야 적용 이 가능하다. SWPC 모듈의 경우 바퀴를 한개만 가지고 있어 바닥과 1점 접촉을 이루기 때문에 접촉점에서 회전이 발생해 기존 방법 [1]을 위해 필요한 움직임을 만들지 못한다. 즉, 로봇의 종류에 따른 기구학적 형상 차이로 인해 캘리브레이션 대상 파라미터 및 구현 가능한 움직임이 달라지기 때문에 캘리브레이션 방법은 모 바일 로봇의 종류에 의존적이다. 그런 이유로 기존 캘리브레이션 방법 [1,11,12,13] 을 SWPC 기반 로봇에 적용하는 것은 어렵다.

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 캘리브레이션 방법을 검증하고, 실제 환경에서 캘리브레이션을 진행한다. 위에 언급된 바와 같이, 다른 캘리브레이션 방 법을 SWPC 기반 모바일 로봇에 적용할 수 없기 때문에 실제 환경에서 제안하는 캘리브레이션 방법이 적용되기 전과 후, 두 가지의 기구학적 파라미터를 이용해 주행 실험을 진행한 결과를 비교한다. 사용된 모바일 로봇은 [그림 1.3]에 나타난

것과 같이 4개의 SWPC 모듈을 사용한다.

#### 제 1 절 시뮬레이션 환경 캘리브레이션

시뮬레이션 실험은 임의의 오차를 부여한 기구학적 파라미터를 기반으로한 SWPC 기반 모바일 로봇의 회전 정보와 모터 엔코더 정보를 생성하고 제안된 방법을 통해 기구학적 파라미터를 추정하는 과정으로 구성된다.

먼저, 정적 모듈의 조향각도를 45.0°와 165.0°로 고정해 정적 모듈의 바퀴를 기 준으로 로봇이 반시계방향으로 회전하는 상황을 구성한다. 해당 상황에서 모바일 로봇이 주어진 기구학적 파라미터를 가지고 있는 경우 제자리 회전 시 생기는 기 하학적 관계를 만들어 로봇 원점의 이동경로, 조향축 엔코더의 정보, 그리고 바퀴 엔코더의 정보를 만들어낸다. 정적 모듈의 바퀴를 원점으로 하는 회전 정보를 [그 립 4.1]에 나타낸 것과 같이 수집한다. 노란원은 SWPC 기반 모바일 로봇이 고정된 모듈의 바퀴를 기준으로 회전하는 경우 로봇 중점의 이동경로이다. 수집된 정보 를 이용해 제안된 캘리브레이션 방법을 진행하여 기구학적 파라미터를 계산하고 설정된 파라미터와 비교한다.

총 10,000번의 시뮬레이션 실험을 진행했다. 시뮬레이션에 필요한 기구학적 파라미터의 경우 *P<sub>s</sub>*(*x<sub>s</sub>*, *y<sub>s</sub>*),*b*,*r*은 초기 설계 값에서 ±30.0%, β는 ±30.0°의 범 위 내의 무작위 값으로 설정했다. 무작위의 값으로 설정된 기구학적 파라미터를 이용해 생성된 시뮬레이션 실험 정보를 통해 구한 기구학적 파라미터와 설정된 기 구학적 파라미터 간의 평균 절대 오차(MAE)는 [표 4.1]에 정리하였으며, 임의로 부여된 다양한 오차를 모두 잘 추정하는 것을 확인했다. 이를 통해 제안된 캘리브 레이션 방법이 SWPC 기반 로봇의 파라미터를 정확하게 구할 수 있음을 보였다.



그림 4.1: Rotation data generating process in simulation.

	Mean Absolute Error(MAE)
$P_s \ (\mathrm{mm})$	6.7818e-15
$\beta$ (°)	2.7289e-16
$b \ (mm)$	7.1324e-15
$r (\rm{mm})$	1.0411e-13

 $\boxplus$  4.1: Mean Absolute Error (MAE) of given and calculated parameters in simulation.



그림 4.2: Three motion capture points for measuring position and orientation of robot.

### 제 2 절 실제 환경 캘리브레이션

실제 환경의 실험 또한 시뮬레이션과 동일하게 정적 모듈의 조향각도를 45.0° 와 165.0°로 고정해 정적 모듈의 바퀴를 기준으로 로봇이 반시계방향으로 회전하는 상황을 만들어 정보를 수집했다. 외부 측정장비로는 29개의 Vicon T-160 카메라 와 Vicon NEXUS 소프트웨어를 사용하는 모션 캡처 시스템을 이용해 100 HZ로 [그림 4.2]와 같이 로봇 위의 3점의 정보를 수집해 로봇 원점과 방향 정보를 구할 수 있도록 설정했다.

로봇이 제자리 회전을 하는 경우 주행보다는 덜 하지만 비시스템적 오차의 영 향을 받게된다. 바닥이 완전히 평평하지 못하다면 로봇이 제자리 회전을 하면서 내리막 구간에서 가속을 하고 오르막 구간에서 감속을 하게되며 [그림 4.3]과 같이 로봇이 회전하면서 내리막 방향으로 미끄러지게 된다. 로봇이 회전할 때 발생하는 미끄러짐을 방지하기 위해 [그림 4.4]과 같은 기구를 제작했다. 내부 부품은 정적



그림 4.3: Slip generated due to tilted ground.

모듈의 바퀴와 결합해 같이 따라 돌고 외부 부품은 바닥에 고정되어 내부 부품의 옆면을 막아 로봇이 미끄러지지 않고 [그림 4.5]과 같이 제자리에서 회전할 수 있게 했다. 해당 장비 하나로 미끄럼의 영향이 없는 실험환경을 구성하였고 회전 결과 는 [그림 4.6]에 표시된 것과 같이 미끄러짐 없이 완벽한 제자리 회전이 가능하게 하였다. [그림 4.6]에 보이는 두 원은 각기 다른 정적 모듈 바퀴의 위치 (*P*<sub>1</sub>,*P*<sub>2</sub>) 를 기준으로 로봇이 회전할 때의 로봇 원점의 회전 정보이고 두 원이 이어지는 부 분은 정적 모듈의 고정점이 *P*<sub>1</sub>에서 *P*<sub>2</sub>로 변하는 과정에서 얻어진 이동 정보이다. 로봇이 회전하는 동안 모터 엔코더와 모션 캡처 정보를 수집했으며, 이를 활용해 캘리브레이션을 진행했다. 캘리브레이션 전후 각 모듈의 기구학적 파라미터 값을 [표 4.2]에 정리했다.

#### 제 3 절 주행 실험

본 논문에서 제안하는 캘리브레이션 방법을 평가하기 위해 [그림 4.7]의 환경 에서 로봇이 정사각형의 경로를 주행하는 주행 실험을 진행하고 주행 시 발생하는



그림 4.4: Fixing tool for slip prevention. Inner part is connected to stationary caster wheel and outer part is connected to ground.



그림 4.5: Self rotation process for calibration.



그림 4.6: Trajectory of robot center point measured by motion capture system.

	Caster module	w/o Calibration	w/ Calibration
	1	(215.0, 125.0)	(216.16, 126.96)
$P_s(x_s, y_s)$	2	(215.0, -125.0)	(216.52, -124.74)
(mm)	3	(-215.0, -125.0)	(-216.22, -125.26)
~ /	4	(-215.0, 125.0)	(-216.67, 126.47)
	1	0.0	0.6349
$\beta$	2	0.0	1.5247
(°)	3	0.0	0.9764
	4	0.0	0.2154
	1	20.0	20.3907
b	2	20.0	20.2223
(mm)	3	20.0	20.3055
	4	20.0	20.2897
	1	55.0	54.3960
r	2	55.0	54.7413
(mm)	3	55.0	55.9731
	4	55.0	55.6682

 $\boxplus$  4.2: Kinematic parameters of each SWPC module.



그림 4.7: Tracking test environment with motion capture system for measuring robot pose.

오차를 분석했다. 다양한 기존 연구 [1,4,5,6,11,12,14,21]에서 기구학적 파라미터 의 변화가 오도메트리에 미치는 영향을 비교하기 위해 로봇이 주행한 정사각형의 경로 시작과 끝의 위치 오차를 비교하는 주행 실험을 진행했다. SWPC 기반 로 봇은 전방향 이동이 가능해 사각경로를 각 코너에서 회전없이 주행할 수 있지만, 진행된 실험에서는 캐스터의 조향축과 바퀴축 모터 모두 다양하게 사용할 수 있게 끔 각 코너에서 90°회전을 하도록 구성했다. 캘리브레이션 전후의 파라미터로 각각 2.5m×2.5m의 정사각형 경로를 2바퀴 주행하는 실험을 시계방향(CW)과 반시계 방향(CCW)으로 진행했다. 모바일 로봇이 주행하는 경우 불균일한 노면, 미끄러짐 등 로봇과 주행환경의 상호작용에 의해 발생하는 비시스템적 오차의 영향을 받게 된다. 이러한 비시스템적 오차의 영향을 줄이기 위해 주행 실험을 각각 4번 진행해 평균 결과를 비교했다. Holmberg [22]에 의해 제안된 캐스터 기반 로봇의 토크 제어기법을 사용했고 비시스템적 오차의 영향을 줄이기 위해 약 0.2m/s의 낮은 속력으로 주행하였다.

[그림 4.8]에 모바일 로봇이 정사각형의 경로를 시계방향으로 한바퀴 도는 과



그림 4.8: Robot tracking square path in clockwise direction.

정을 나타냈다. 흰색 1번에서 4번으로 그림 순서가 이어지고 노란색 번호가 각 그림에서의 주행 순서를 보인다. 마지막 흰색 4번 그림에서 노란색 3번 주행은 노란색 2번 주행 후 제자리 회전 주행을 한 것이다. 모션 캡처를 통해 측정된 이동 정보를 [그림 4.9]에 나타냈다. 캘리브레이션 후 반시계방향 주행은 좌측 상단, 캘리 브레이션 후 시계방향 주행은 좌측 하단, 캘리브레이션 전 반시계방향 주행은 우측 상단, 그리고 캘리브레이션 전 시계방향 주행은 우측하단에 표시하였다. 캘리브레 이션 후 경로가 전 경로보다 실제 정사각의 경로를 잘 추종하면서 주행한 것을 볼 수 있다. 주행 종료 시의 위치와 방향 정보를 [그림 4.10]에 나타냈고 위치와 방향의 절대 평균 오차(MAE)를 [표 4.3]에 정리하였다. 총 20m의 경로 이동 및 8번의 90° 회전이 이루어진 주행실험 후, 캘리브레이션 이전의 기구학적 파라미터를 사용한 로봇은 주행 시 평균 0.4674m의 위치 오차와 9.6721°의 방향 오차를 보였다. 제 안된 기구학적 캘리브레이션을 진행한 후의 기구학적 파라미터를 사용한 로봇은 평균 0.1655m의 위치 오차와 1.9200°의 방향 오차를 보였다. 제안된 방법을 통해 위치 오차를 64.60%, 방향 오차를 80.15% 줄이며 오도메트리 정밀도가 향상된 것 을 확인하였다. 사각 경로 주행 실험을 통해 본 논문에서 제안하는 캘리브레이션 방법이 실제 로봇의 정확한 기구학적 파라미터를 구해 시스템적 오차를 감소시켜 오도메트리 정밀도 향상이 가능함을 보였다.

w/	o Calibration	$n \mid w/$ Calibration
Position (m)	0.4674	0.1655
Heading (°)	9.6721	1.9200

표 4.3: Mean Absolute Error (MAE) of position and heading.



그림 4.9: Robot trajectory of tracking test.



그림 4.10: Results of tracking test: end position and heading.

## 제 5 장 결론

본 논문은 단일 바퀴 구동 캐스터(Single Wheel Powered Caster, SWPC) 기 반 모바일 로봇의 캘리브레이션 방법을 제안했다. 제안하는 방법은 SWPC 기반 모바일 로봇에 장착된 캐스터 모듈 중 하나를 고정시켜 고정된 모듈의 바퀴를 기 준으로 로봇이 회전하는 경우 생기는 기하학적 관계, 로봇의 회전 정보, 그리고 모터 엔코더의 정보를 이용해 각 캐스터 모듈의 위치 *P<sub>s</sub>*, 조향축의 각도 오차 *β*, 조향축과 바퀴축 사이의 거리 *b*, 그리고 바퀴의 반지름 *r*을 보정한다. 시뮬레이션 환경에서 실험을 진행해 제안하는 방법이 기구학적 파라미터를 정확하게 구할 수 있음을 검증했다. 실제 환경에서 로봇을 이용해 캘리브레이션을 진행하였고 캘리 브레이션 전후의 파라미터를 이용해 사각의 경로를 주행하는 경로 주행 실험을 진행해 캘리브레이션 후 파라미터를 이용해 주행하는 경우 위치오차를 감소시킴 을 보이며 제안된 방법이 정확한 기구학적 파라미터를 구해 오도메트리 정밀도의 향상이 가능함을 확인했다.

제안하는 방법의 특징은 다음과 같다. 첫째, 로봇의 기하학적 관계를 이용했다. 로봇이 제자리회전을 하는 경우 생기는 기하학적 관계를 분석하기 때문에 로봇을 주행하지 않아도 캘리브레이션을 할 수 있게 된다. 둘째, 비시스템적 오차로부터 강인한 캘리브레이션 방법이다. 캘리브레이션을 위해 로봇을 주행하게 되면 비시 스템적 오차의 영향을 무시하기 어려워 지고 반복 실험을 통해 비시스템적 오차의 영향을 줄여야 하는 문제가 발생한다. 하지만, 제안하는 방법은 제자리 회전을 통 해 캘리브레이션에 필요한 정보를 얻기 때문에 로봇을 주행하는 것에 비해 비교적 비시스템적 오차에 강인하다. 셋째, 캘리브레이션을 위해서 로봇이 제자리 회전을

할 공간만 있으면 되기 때문에 넓은 실험공간을 필요로 하지 않는다. 넷째, 외부 측정장비를 이용해 로봇의 회전을 측정함으로써 모바일 로봇의 기구학 파라미터를 직접 측정하는 과정 없이 모든 파라미터를 보정 할 수 있다. 마지막으로, SWPC 기반 모바일 로봇을 캘리브레이션 할 수 있는 방법이다.

제안하는 방법의 한계는 다음과 같다. SWPC 기반 모바일 로봇의 경우 제자리 회전 정보를 내부 정보만으로 알기 어렵기 때문에 제자리 회전 정보를 얻기 위해 외부 측정장비를 사용하게 되고 그로 인해 외부 측정장비의 오차의 영향을 받게 되는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 모션캡처 장비를 사용해 측정장비의 오차가 적어 정확한 캘리브레이션이 가능했지만 라이다와 같이 모션캡처 장비보다 낮은 정확도를 가졌지만 접근성은 더 좋은 외부 측정장비를 사용하는 경우에도 비슷한 정확도를 낼 수 있게 만드는 연구가 필요하다.

# 참고 문헌

- J. Doebbler, J. J. Davis, J. L. Junkins, and J. Valasek, "Odometry and calibration methods for multi-castor vehicles," in 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2110–2115, IEEE, 2008.
- H. C. Kim, S. Park, and J. Park, "Calibration of mobile robot with single wheel powered caster," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 17, no. 2, pp. 183–190, 2022.
- [3] J. Borenstein, "Experimental results from internal odometry error correction with the omnimate mobile robot," *IEEE Transactions on Robotics* and Automation, vol. 14, no. 6, pp. 963–969, 1998.
- [4] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots," *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol. 12, no. 6, pp. 869–880, 1996.
- [5] C. Jung, C. Moon, D. Jung, and W. Chung, "Design of experimental test tracks for odometry calibration of wheeled mobile robots," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 9, no. 3, pp. 160–169, 2014.
- [6] K. S. Chong and L. Kleeman, "Accurate odometry and error modelling for a mobile robot," in *Proceedings of International Conference on Robotics* and Automation, vol. 4, pp. 2783–2788, IEEE, 1997.

- S. Thrun, "Probabilistic robotics," Communications of the ACM, vol. 45, no. 3, pp. 52–57, 2002.
- [8] J. Borenstein and L. Feng, "Gyrodometry: A new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 423–428, IEEE, 1996.
- [9] L. C. Bento, U. Nunes, F. Moita, and A. Surrecio, "Sensor fusion for precise autonomous vehicle navigation in outdoor semi-structured environments," in *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2005., pp. 245–250, IEEE, 2005.
- [10] U. Onyekpe, V. Palade, A. Herath, S. Kanarachos, and M. E. Fitzpatrick, "Whonet: Wheel odometry neural network for vehicular localisation in gnss-deprived environments," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 105, p. 104421, 2021.
- [11] J. Borenstein and L. Feng, "Umbmark: A benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots," in *Mobile Robots X*, vol. 2591, pp. 113– 124, SPIE, 1995.
- [12] C. Jung, D. Jung, and W. Chung, "Accurate calibration of odometry errors for wheeled mobile robots by using experimental orientation errors," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 319–326, 2014.

- [13] K. Lee, W. Chung, and K. Yoo, "Kinematic parameter calibration of a carlike mobile robot to improve odometry accuracy," *Mechatronics*, vol. 20, no. 5, pp. 582–595, 2010.
- [14] G. Antonelli, S. Chiaverini, and G. Fusco, "A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-squares technique: theory and experimental validation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 5, pp. 994–1004, 2005.
- [15] D. Jung, J. Seong, C.-b. Moon, J. Jin, and W. Chung, "Accurate calibration of systematic errors for car-like mobile robots using experimental orientation errors," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, no. 9, pp. 1113–1119, 2016.
- [16] P. J. McKerrow and D. Ratner, "Calibrating a 4-wheel mobile robot," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 859–864, IEEE, 2002.
- [17] K. Lee and W. Chung, "Calibration of kinematic parameters of a car-like mobile robot to improve odometry accuracy," in 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2546–2551, IEEE, 2008.
- [18] T. Abbas, M. Arif, and W. Ahmed, "Measurement and correction of systematic odometry errors caused by kinematics imperfections in mobile robots," in 2006 SICE-ICASE International Joint Conference, pp. 2073– 2078, IEEE, 2006.

- [19] A. Gfrerrer, "Geometry and kinematics of the mecanum wheel," Computer Aided Geometric Design, vol. 25, no. 9, pp. 784–791, 2008.
- [20] J. H. Lee, S. Yuta, E. Koyanagi, and B.-J. Yi, "Command system and motion control for caster-type omni-directional mobile robot," in 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1862–1868, IEEE, 2005.
- [21] E.-J. Jung and B.-J. Yi, "Odometry and navigation of an omni-directional mobile robot with active caster wheels," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 10, pp. 1014–1020, 2009.
- [22] R. A. Holmberg, Design and development of powered-caster holonomic mobile robots. Stanford University, 2000.
- [23] K.-L. Han, H. Kim, and J. S. Lee, "The sources of position errors of omnidirectional mobile robot with mecanum wheel," in 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 581–586, IEEE, 2010.

#### Abstract

# Calibration of Mobile Robot with Single Wheel Powered Caster

Hyoung Cheol Kim

Department of Intelligence and Information The Graduate School of Convergence Science and Technology Seoul National University

Kinematic parameters of mobile robot have a great influence on its odometry and control, so many researches were conducted to find accurate kinematic parameters of mobile robot. Since a kinematic calibration method, for finding accurate kinematic parameters, is dependent on the kinematic type of mobile robot, calibration method for certain type is hard to apply for another type. For caster type mobile robots which has complex kinematic model, kinematic parameters are important since inaccurate kinematic parameters cause internal force which results in wheel slippage, a non-systematic error. Previous study on kinematic calibration for caster type mobile robot proposed a method that can only calibrate double-wheeled caster type mobile robot and not singlewheeled caster type mobile robot. This paper proposes a kinematic calibration method for single-wheeled caster type mobile robot. Proposed method uses geometric relationship and movement information of robot and its motor when the robot rotates around its stationary caster wheel. Simulation and hardware experiments conducted in this paper validates the proposed calibration method and shows its performance.

Keywords: Kinematic Calibration, Mobile Robot, Powered Caster Student Number: 2020-27847