L-Code: 삼종 길이 쇄선과 De bruijn 수열을 이용한 2차원 좌표 코드*

현호혁[1], 한창훈[1], 우승문[2], 박행운[3], 이정준[1]

[1]한국공학대학교 컴퓨터공학부, [2]한국공학대학원 컴퓨터공학과, [3]더코더

{2023156036, han.chang.hoon, smwoo529}@tukorea.ac.kr, henry@thecoder.co.kr, jjlee@tukorea.ac.kr

L-Code: 2D Coordinate Coding Using Tri-length Dash-Dot Lines and De Bruijn Sequences

Ho-Hyuk Hyeon[1], Chang-Hoon Han[1], Seung-Moon Woo[2], Henry Park[3], Jeong-Joon Lee[1]

[1]Department of Computer Engineering, Tech University of Korea

[2]Department of Computer Engineering, Graduate School of Tech University of Korea

[3]The Coder Co., Ltd

요 약

최근 로봇 공학, 스마트 물류 등의 발전으로 실내 정밀 위치 추정 기술이 요구됨에 따라, 부분적 관찰만으로 전역 좌표 식별이 가능한 De Bruijn 수열을 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 그 중 명목 위치로부터 특정 거리만큼 변위 시켜 데이터를 부호화 하는 가상 격자 방식은 원거리 촬영 시 발생하는 투시 왜곡에 의해 고정된 변위 값을 정밀하게 식별하기 어려워 인식 정밀도가 저하되는 물리적 한계를 지닌다. 본 논문은 이를 극복하기 위해 기존 패턴 내에 기준 구조인 'Tri-length dash dot line'을 결합한 새로운 2차원 좌표 체계, L-Code를 제안한다. L-Code는 왜곡 환경에서도 안정적인 특징점을 제공하여 정밀한 투시 왜곡 보정과 방향 모호성 해결을 가능하게 한다. 실험 결과, 제안 시스템은 카메라 기울기와 회전이 복합된 환경에서도 높은 위치 검출 성공률을 달성하며 기존 방식 대비 향상된 투시 왜곡 강인성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 로봇 공학 및 스마트 물류 산업의 발전과 함께, 로봇의 정밀 자율 주행을 위한 실내 위치 추정 기술이 핵심 기반 기술로 요구되고 있다[1]. 이를 위해 부분적인 관찰만으로 전역 좌표 식별이 가능한 De Bruijn 수열[2]을 응용한 방식들이 활발히 연구되어 왔다. 그림 1과 같이 초기 형태인 이진 격자 부호화 방식[3]은 데이터 밀도가 부족하고, 센서가 표면에 밀착되어야만 판독이 가능한 한계가 있었다.

* 본 논문은 '㈜더코더'의 지원을 받아 작성되었습니다.

* 본 논문은 2026년도 과학기술 정보통신부 및 정보통신기획평가원의 'SW중심대학사업' 지원을 받아 작성되었습니다. (2025-0-00050)

이러한 제약을 극복하고 데이터 밀도를 획기적으로 높이기 위해, 본래 스마트 펜과 같은 근접 매체를 위해 고안되었던 '가상 격자 기반 부호화 방식[4]'을 위치 추정에 도입하려는 시도가 있어 왔다.[5] 이 방식은 주로 명목상의 격자점(Nominal position)으로부터 마커를 특정 거리만큼 이탈시키는 고정적 변위를 통해 데이터를 부호화하고, 위치와 방향 파라미터를 식별하기 위해 일정 주기마다 점을 변위 없이 명목 위치에 배치하여 왜곡 보정의 기준 마커로 이용한다.

본 방식은 위치 정보의 부호화 및 격자 복원이라는 두 가지 핵심 기하학적 메커니즘이 모두 단일한 형상의 마커와 미세한 물리적 변위에만 전적으로 의존한다는 취약성을 지닌다. 특히

기준 마커가 데이터 마커와 동일한 점 형태를 취하고 있어, 원거리 관측이나 카메라의 자세 변화로 인해 투시 왜곡이 발생할 경우 격자 복원의 기준이 되어야 할 기준 마커가 존재함에도 불구하고 왜곡에 의한 오차와 마커 고유의 변위량을 변별하지 못하는 식별 모호성이 야기된다. 이는 결과적으로 좌표 복원 알고리즘의 실패로 직결되어, 시스템의 인식 강인성을 저해하는 원인이 된다.

또한 기존의 고정된 격자 및 변위 방식은 단일 정밀도만을 지원하여, 로봇의 작업 단계(이동 및 정밀 제어)에 따라 요구되는 가변 정밀도를 충족하지 못해 동적 운용 환경에 적용하기 어렵다는 한계를 지닌다.

본 논문은 이러한 기존 고정 변위 체계의 식별 취약성과 고정 정밀도의 한계를 극복하기 위해, 새로운 기하학적 참조 구조인 'Tri-length Dash-Dot (TDD) Line'을 결합한 실내 위치 인식 시스템을 제안한다. 제안 방식은 기존의 점 형태 기준 마커 대신 선형 구조와 주기를 가진 TDD Line을 패턴 내에 삽입하여, 투시 왜곡 환경에서도 데이터 마커와 구분되는 왜곡 보정의 기준을 제공한다. 이를 통해 로봇의 주행과 작업 환경에 모두 최적화된 가변 정밀도를 성공적으로 구현하고자 한다.

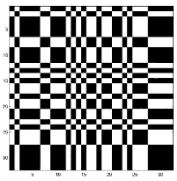


그림 1 이진 격자 부호화



그림 2 가상 격자 기반 위치 부호화

2. 본 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 3장에서는 L-Code의 원리와 디코딩 과정 및 투시 왜곡 보정을 위한 핵심 구조인 TDD-Line의 설계 기법과 디코딩 알고리즘을 기술한다. 4장에서는 제안된 시스템의 성능을 검증하기 위해 실험 환경을 제시하고, L-Code의 강건성을 분석한다. 5장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 향후 연구 방향을 제시한다.

3. L-Code의 원리

L-Code는 기존의 가상 격자 기반 위치 부호화 방식[4]에 본 논문에서 제안하는 TDD-Line을 결합한 하이브리드 시스템이다. L-Code의 핵심 설계 원리는 TDD-Line을 기반으로, 기존 가상 격자 방식을 안정적으로 매핑하는 데 있다. De Bruijn 배열을 응용하였으며, 부분적인 가림이나 손상 환경에서도 디코딩이 가능하도록 윈도우 크기를 5x5로 설정하였다. 또한 데이터 밀도와 인식률의 균형을 고려하여 데이터 심볼(Alphabet)은 4(0, 1, 2, 3)로 정의하였다.

3.1 TDD-Line의 설계 원리 및 특징

Triple-Order를 통한 방향성 확보: 명목 위치에 서로 인접한 두개의 점을 이은 선분의 길이를 L이라 할 때 L, $1.1L$, $1.3L$의 비율을 갖도록 세 가지 타입(A, B, C)의 선분을 정의한다. 이를 고유한 삼종 순서(Triple-Order) A-B-C로 배치하여 쇄선 패턴을 형성한다. 이 순서 정보는 카메라 관측 시 패턴의 회전 상태를 판별하는 기하학적 단서로 작용하여, 기존 방식[4]의 방향 모호성 문제를 해결한다.

- 강인한 기하학적 특징점: TDD-Line은 점과 선의 조합으로 구성된다. 여기서 추출된 특징점들은 호모그래피 행렬 계산 시 기준으로 활용되어, 왜곡된 이미지를 정방형 평면 좌표계로 정밀하게 보정한다.
- 가변 위치 정밀도 지원: 기존 방식은 인접한 점과 점 사이의 상대적 거리 및 고정 변위에만 의존하여 격자를 복원하므로 단일 정밀도만을 지원하였다. 반면, 제안 방식은 TDD-Line을 통한 디코딩을 기반으로 하여 인접 마커 간의 거리 제약에서 벗어난다. 따라서 패턴의 스케일을 변경하더라도 마커가 서로 중첩되지 않는 범위 내에서 변위 거리를 유연하게 설정할 수 있으며, 이는 환경에 따라 인코딩 해상도를 조절할 수 있는 가변 정밀도 구현의 기반이 된다.

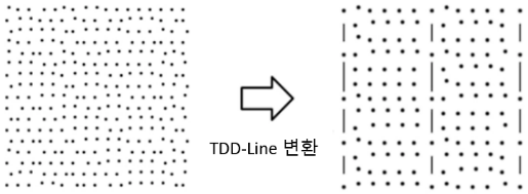


그림 3 TDD-Line 변환

3.2 L-Code 디코딩 과정

인식 과정은 다음과 같이 수행된다.

- 특징점 추출 및 전처리: 조명 변화에 강인한 이진 영상을 획득하기 위해 입력 영상에 적응형 이진화를 적용한다. 이후 Blob 검출기와 Line 검출기를 병행 운용하여 마커와 TDD-Line의 구조를 각각 식별한다.
- 투시 왜곡 보정: TDD-Line의 정보를 바탕으로 가상 격자 복원을 위한 호모그래피 행렬을 계산한다. TDD-Line 영역의 4개의 대응점을 활용하여, 투시 왜곡이 발생한 이미지를 정방형 평면 좌표계로 역 변환한다. 이를 통해 마커 간의 상대적 거리와 방향성이 보존된 영상을 획득한다.
- 방향성 검증: TDD-Line 내에 설계된 A-B-C 패턴의 배열 순서를 판독한다. 이를 통해 De Bruijn 수열의 방향 모호성(Orientation Ambiguity) 문제를 해결하고, 패턴의 회전 상태에 관계없이 데이터 읽기 방향의 절대 기준을 확정한다.
- 디지타이징: 각 마커가 명목 위치로부터 이탈한 방향을 분석하고, 이에 대응하는 정수형 디지털 코드로 변환한다.

- 전역 좌표 추정: 마지막으로 추출된 이차원 수열 내의 기호 배열을 이용해 De Bruijn 디코딩을 수행한다. 검출된 부분 패턴이 전체 좌표계에서 가지는 고유한 인덱스를 산출함으로써 전역 위치 좌표를 최종적으로 식별한다.

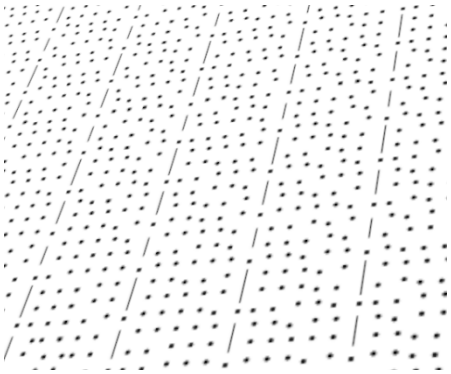


그림 4 TDD-Line을 결합한 L-Code 패턴

4. 성능평가

본 섹션에서는 제안된 TDD-Line 시스템의 투시 왜곡 강인성을 검증하기 위해 기존의 가상 격자 기반 위치 부호화 방식과의 비교 실험을 수행하였다.

4.1 실험 환경 및 설정

- 디바이스 및 해상도: Samsung Galaxy S20+, HD(1280x720)
- 패턴규격: 격자 간격 2mm, 점 지름 0.25mm
- 변수 설정: 기울기 0°~45°, 회전 0° ~ 180°
- 거리 및 조명: 10 ~ 50cm (10cm씩 증가), 균일 조명 환경
- 평가 지표 및 횟수: 패턴 검출 성공률 (기울기 기준, 각 조건별 100회씩 인식 시도)

4.2 결과 분석 및 고찰

- 기존 방식은 미세 변위에 의존하여 15° 이상의 기울기에서 인식률이 0%로 급감했다. 반면 제안 시스템은 단일 왜곡 환경에서 높은 성공률을 유지해 투시 왜곡 복원에 유리함을 입증했다. 단, 복합 자세에서는 81%로 하락한 케이스가 있으나, 전체 조건 평균은 98% 이상을 달성했다.

	0°	15°	30°	45°
기존 시스템[4]	100	0	0	0
제안 시스템	100	100	100	98

표 1 기존 시스템과 제안 시스템의 성공률 비교

- 실패 사례 분석: 복합 자세에서의 81% 하락의 원인은 현재 구현된 디코딩 알고리즘 내 '초기 기준점 탐색 로직'의 한계에 기인한다. 이는 향후 호모그래피 투영 비율을 반영한 로직의 반영으로 해결 가능하다.
- 거리 변화 및 속도: 10cm에서 50cm의 조건까지 모두 TDD-Line 방식은 안정적인 패턴 검출률을 유지하였다. 프레임당 처리 속도 평가(평균 30ms)에서도 실시간 위치 인식에 적합한 성능을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 2차원 De Bruijn 수열 기반 위치 인식의 원거리 투시 왜곡 문제를 해결하기 위해 TDD-Line 기반의 새로운 패턴 구조와 디코딩 알고리즘을 제안하였다.

실험 결과, 제안 방식은 최대 45°의 기울기와 10~50cm의 거리 변화 환경에서도 평균 98% 이상의 높은 검출 성공률과 평균 30ms의 처리 속도를 달성하여, 실시간 위치 인식 시스템으로서의 신뢰성과 강인성을 입증하였다.

나아가 본 연구를 통해 로봇의 주행 환경에 따라 해상도를 조절할 수 있는 가변 정밀도 체계의 적용 가능성을 확인하였다. 이는 기존 방식을 계승하면서도 인식 정밀도와 범위를 상황에 맞게 조절할 수 있어, 실제 시스템에서의 활용도를 높일 수 있다.

향후 연구로는 제안한 알고리즘을 저사양 임베디드 기기에 최적화하고 이미지 전처리 로직을 개선할 계획이다. 또한, 현재 일부 관찰되는 왜곡 상황에서의 인식 오류를 해결하기 위해 디코딩 로직을 고도화하여 시스템의 완성도를 높이고자 한다.

참고 문헌

[1] Research and Markets, “Indoor Location Technologies and Global Markets”, 2024.

[2] N. G. De Bruijn, “A combinatorial problem”, Proceedings of the Section of Sciences of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen te Amsterdam, Vol. 49, No. 7, pp. 758-764, 1946.

[3] E. R. Scheinerman, “Determining planar location via complement-free De Bruijn sequences using discrete optical sensors”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 6, pp. 883-889, 2001.

[4] Mats Petter Pettersson and Tomas Edso, “Coding pattern and apparatus and method for determining a value of at least one mark of a coding pattern”, US Patent 6,663,008 B1, 2003.

[5] L. Hostettler, A. Özgür, S. Lemaignan, P. Dillenbourg, and F. Mondada, “Real-time high-accuracy 2D localization with structured patterns”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5015-5020, 2016.