Journal of Next-generation Convergence Information Services Technology Vol.15, Suppl.1, November (2026) pp.39-52
ISSN 2384-101X(p) 2672-1163(e) *http://dx.doi.org/10.29056/jncist.2026.11.04*

보행 로봇 연구의 동향과 주제 변화 분석: 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링 (2016-2025)

Research Trends and Thematic Evolution in Legged Robotics: A Bibliometric Analysis and LDA Topic Modeling (2016-2025)

정혜주[1], 연주한[2], 권현정[3], 김문구[4], 김천규[5]*

Hye Ju Jung[1], Juhan Yeon[2], Hyun Jung Kwon[3], Moon-Koo Kim[4], Chunkyu Kim[5]*

요 약

보행 로봇은 비정형 환경에서의 높은 이동성을 바탕으로 재난 대응, 국방, 물류, 의료 등 다양한 분야의 핵심 기술로 부상하고 있으나, 연구 전반의 동향과 주제 변화를 통합적으로 분석한 연구는 드물다. 본 연구는 2016~2025년 Scopus에 수록된 보행 로봇 논문 2,044편을 대상으로 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링을 결합하여 전기(2016~2020)와 후기(2021~2025)를 비교하였다. 분석 결과, 후기 논문 수는 전기 대비 44.5% 증가하였다. 중국은 생산성에서, 미국은 피인용 영향력(CPP 27.9, h-index 38)에서 각각 1위를 차지하여 생산과 영향력이 분리된 이원 구조가 나타났다. 협력 네트워크에서는 미국이 핵심 허브 역할을 수행하였고, 후기에는 중국이 고유벡터 중심성 1위로 부상하였다. 토픽 분석(K=5)에서는 운동·동역학·신체 토픽(T1)의 비중이 51.2%에서 44.4%로 감소한 반면, 상호작용·작업·행동 토픽(T4)은 19.2%에서 25.9%로 가장 크게 성장하였다. 이는 보행 로봇 연구가 기초 제어 기술에서 인간-로봇 상호작용과 응용 중심으로 전환되고 있음을 보여주며, AI 기반 자율 보행과 응용 중심 연구개발에 대한 지원 필요성을 시사한다.

핵심어 : 보행 로봇, 계량서지분석, LDA 토픽 모델링, 연구 동향, 인간-로봇 상호작용

1 Department of Technology Practical Convergence, Chungnam National University, Daejeon, Korea [Ph.D. Candidate]
Global Commercialization Center, KAIST, Daejeon, Korea [Senior Researcher]
e-mail: frv0906@kaist.ac.kr
2 Department of Technology Practical Convergence, Chungnam National University, Daejeon, Korea [Professor]
e-mail: juhanyeon@cnu.ac.kr
3 Global Commercialization Center, KAIST, Daejeon, Korea [Research Professor]
e-mail: juyikwon@kaist.ac.kr
4 ICT Strategy Research Division, ETRI, Daejeon, Korea [Principal Researcher]
e-mail: wisemkkim@naver.com
5 Department of Technology Practical Convergence, Chungnam National University, Daejeon, Korea [Professor]
e-mail: chunkyuk@cnu.ac.kr (Corresponding author)

*본 논문은 2026년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (1711195821, 지역 과학기술 성과 실용화 지원사업(충남대학교)).

*본 논문은 2026년도 차세대컨버전스정보서비스학회 하계학술대회에서 발표한 논문을 수정 및 보완하여 확장한 것임.

Received(September 19, 2026), Review Result(1st: October 12, 2026), Accepted(November 12, 2026), Published(November 30, 2026)

© 2026 The Authors. Published by NCISS.
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/.

Abstract

Legged robots have emerged as a key technology across disaster response, defense, logistics, and healthcare owing to their high mobility in unstructured environments, yet few studies have integratively examined the research trends and thematic shifts of this field. This study analyzes 2,044 articles on legged robotics indexed in Scopus from 2016 to 2025, combining bibliometric analysis with LDA topic modeling to compare an early phase (2016-2020) and a later phase (2021-2025). The number of publications increased by 44.5% in the later phase. China ranked first in productivity and the United States in citation impact (CPP 27.9, h-index 38), revealing a dual structure in which production and influence are separated. In the collaboration network, the United States served as the central hub, while China rose to the top in eigenvector centrality in the later phase. Topic modeling (K=5) showed that the share of the motion-dynamics-body topic (T1) declined from 51.2% to 44.4%, whereas the interaction-task-behavior topic (T4) grew most sharply, from 19.2% to 25.9%. These results indicate a shift from foundational control research toward human-robot interaction and application-oriented research, suggesting the need to support AI-based autonomous locomotion and application-oriented research and development.

Keyword : legged robots, bibliometric analysis, LDA topic modeling, research trends, human-robot interaction

1. 서론

보행 로봇(legged robots)은 인간이나 동물의 보행 방식을 모방하여 다리로 이동하는 로봇으로, 바퀴형 로봇이 다루기 어려운 계단, 경사면, 붕괴 지역 등 비정형 환경에서 높은 이동성을 확보할 수 있다 [1][2]. 이러한 특성으로 보행 로봇은 재난 대응, 국방, 물류, 건설, 의료 등 인간의 접근이 제한되는 분야에서 핵심 기술로 주목받고 있다 [3]. 특히 최근 센서, 구동기, 제어 알고리즘, 인공지능 기술이 함께 발전하면서 보행 로봇의 성능과 활용 가능성이 빠르게 확대되었다 [4][5].

이러한 변화는 학술 연구의 성장으로 이어졌다. 보행 로봇은 기계공학, 제어공학, 센서, 인공지능 등이 결합되는 분야로, 관련 연구는 양적으로 확대되는 동시에 주제도 넓어지고 있다 [6]. 기존의 동역학·제어 중심 연구에 더하여 센서 융합, 자율 이동, 강화학습·딥러닝 기반 제어, 인간-로봇 상호작용 등 다양한 주제가 자리 잡고 있다 [7][8].

그러나 분야 전반의 흐름을 정량적으로 정리한 연구는 충분하지 않다. 기존 연구는 사족보행 제어나 강화학습 기반 보행 등 특정 세부 기술에 집중되어 왔으며 [9][10][11], 연구 동향을 다룬 연구도 정성적 서술에 머무는 경우가 많았다. 계량서지분석을 적용한 연구 역시 특정 응용 분야에 국한되어, 보행 로봇 전반의 주제 구조와 시기별 변화를 통합적으로 분석한 연구는 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구는 Scopus에 수록된 보행 로봇 논문을 대상으로 계량서지분석과 토픽 모델링을 결합하여 연구 동향과 주제 변화를 통합적으로 분석한다. 계량서지분석으로는 연구 생산성, 저널과 국가별 분포, 국가 간 협력 구조를 파악하고, 토픽 모델링으로는 주요 주제의 분포와 변화 양상을 도출한다. 분석 기간은 딥러닝 기반 인공지능이 로보틱스 분야로 본격 확산되기 시작한 2016년 이

후로 설정하고 [12], 이를 두 시기로 구분하여 주제 구조의 변화를 비교한다.

본 연구의 질문은 다음과 같다. 첫째, 보행 로봇 연구는 양적으로 어떻게 성장해 왔으며, 생산성과 학술적 영향력은 어떠한 구조적 특징을 보이는가? 둘째, 국가와 저널 중심의 연구 생산 구조와 국가 간 협력 관계는 어떠한 특징을 가지는가? 셋째, 보행 로봇 연구를 구성하는 주요 토픽은 무엇이며 어떻게 분포하는가? 넷째, 이러한 토픽 구조는 시기별로 어떻게 변화하는가?

제2장에서는 보행 로봇의 개념과 선행 연구를 검토하고, 제3장에서는 연구 데이터와 분석 방법을 설명한다. 제4장에서는 연도별 지식 생산, 협력 구조, 토픽 분포와 시기별 변화를 차례로 제시하고, 제5장에서는 연구 결과를 종합하여 시사점과 연구의 한계를 논의한다.

2. 이론적 배경

2.1 보행 로봇의 개념과 특징

보행 로봇은 다리를 이용해 이동하는 로봇으로, 지면 접촉을 기반으로 이동한다는 점에서 바퀴형이나 궤도형 로봇과 구별되며, 다리 수에 따라 이족보행, 사족보행, 다족보행 등으로 구분된다 [13]. 휴머노이드 로봇 역시 이족보행을 기반으로 하므로 보행 로봇의 한 유형으로 볼 수 있다.

보행 로봇의 핵심 특징은 비정형 환경에서의 높은 이동성과 적응 능력이다. 다리 구조를 기반으로 계단, 경사면, 장애물이 많은 지형 등 바퀴형이나 궤도형 로봇이 접근하기 어려운 환경에서도 안정적으로 이동할 수 있다 [6]. 또한 외부 충격이나 지형 변화에 대응하여 자세를 유지하거나 복원하도록 설계되며, 이러한 안정화 기술은 실제 활용 가능성을 결정하는 핵심 요소로 평가된다 [7][8]. 이에 따라 보행 로봇은 인간의 접근이 어렵거나 위험한 환경에서 유용하여, 붕괴 지역 탐색과 위험 지역 정찰, 국방 분야의 험지 이동, 산업 현장의 시설 점검과 물류 등에 적용되고 있다 [3][6]. 최근에는 인간 중심 작업 환경에서 인간과 협업하거나 이동과 작업을 통합 수행하는 방향으로 활용 범위가 확대되고 있다 [14][15]. 이처럼 보행 로봇은 기존 이동 로봇의 지형적 한계를 보완하는 기술로서 학술적·산업적 중요성을 지닌다.

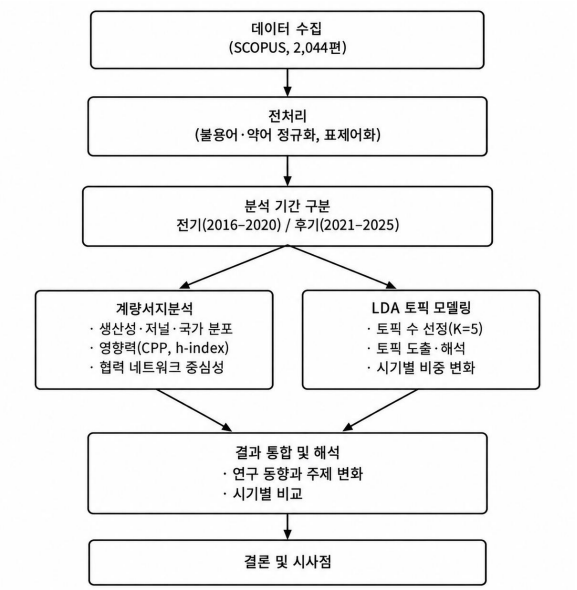
2.2 보행 로봇 관련 선행 연구: 계량서지분석을 중심으로

보행 로봇이 휴머노이드를 비롯한 다양한 형태로 여러 산업과 서비스 분야에 적용되면서, 그 응용 분야를 대상으로 한 계량서지 연구가 이루어져 왔다. 아바타-인간 상호작용 [16], 아바타 마케팅 [17], 관광 안내 기술 [18], 자폐 치료용 인공지능 [19] 등을 분석한 연구가 이에 해당하나, 이들은 보행 로봇 분야 자체의 연구 동향이나 지식 구조를 다루지 않는다. 보다 근접한 연구로는 이동 로봇 [20]과 협동 로봇 [21]의 연구 동향 분석이 있으나 이 역시 인접 분야에 한정된다. 이처럼 보행

로봇 분야의 계량서지 연구는 수가 적고 대상도 특정 응용 분야나 인접 분야에 한정되어 왔으며, 이족·사족·다족 보행 로봇 전반의 연구 동향과 주제 구조를 시기별로 비교 분석한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구는 이러한 공백에 주목한다.

3. 연구 방법

본 연구는 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링을 결합하여, 연구 생산성, 저널 및 국가별 분포와 영향력, 국가 간 협력 구조와 함께 주요 주제의 분포를 분석하였다. 분석 기간을 두 시기로 구분하여 주제 구조와 연구 동향의 변화를 비교하였다. [그림 1]은 전체 분석 절차를 나타낸 것이다.



[그림 1] 연구 프로세스

[Fig. 1] Research Process

3.1 데이터 수집

분석 데이터는 학술 데이터베이스 Scopus를 활용하여 수집하였다. Scopus는 다양한 학문 분야를 포괄하여 계량서지분석에 널리 활용된다 [22]. 보행 로봇 관련 연구를 수집하기 위해 보행 로봇을 대표하는 핵심어인 humanoid, bipedal robot, quadrupedal robot, hexapedal robot을 제목에서 검색하는 검색식을 구성하였으며, 2026년 5월 1일 기준으로 데이터를 수집하였다.

검색 대상 기간은 2016년부터 2025년까지로 설정하였으며, 자료 유형은 영문으로 최종 출판된 학술지 논문과 리뷰 논문으로 한정하여 분석의 일관성을 확보하였다. 그 결과 2,044편의 논문을 확

보하였다. 분석 기간은 2016~2020년(전기)과 2021~2025년(후기)의 두 시기로 균등하게 구분하여 비교하였다. 2016년을 기준 시점으로 설정한 것은 이 시기에 딥러닝 기반 인공지능 기술이 로보틱스 분야로 본격적으로 확산되기 시작하였고 [23][24], 이러한 기술 발전이 보행 로봇의 인지, 자율 이동, 균형 제어에 적용되면서 규칙 기반 제어에서 학습 기반 제어로의 전환이 나타나기 시작하였기 때문이다 [7][25].

3.2 계량서지분석 방법

계량서지분석은 특정 분야의 연구 성과를 정량적으로 분석하여 연구 동향, 학술적 영향력, 협력 관계를 체계적으로 파악하는 방법이다 [26]. 본 연구에서는 연도별 논문 수로 성장 추이를, 주요 저널과 국가별로 생산성 및 영향력을 분석하였다. 연구 영향력은 논문 수, 피인용 수, 논문당 평균 피인용 수(CPP), h-index로 평가하였다. CPP는 총 피인용 수를 논문 수로 나눈 값으로 질적 영향력을, h-index는 일정 횟수 이상 인용된 논문 수를 기반으로 연구 주체의 학문적 기여도를 나타낸다 [27]. 국가 간 협력 구조는 국가를 노드로, 공동 연구 관계를 에지로 하는 공동저자 기반 협력 네트워크로 분석하였다 [28]. 각 국가의 위치와 역할은 연결 규모를 나타내는 연결 중심성, 매개 역할을 나타내는 매개 중심성, 접근성을 나타내는 근접 중심성, 영향력 있는 국가와의 연결성을 반영하는 고유벡터 중심성으로 파악하였다 [28][29].

3.3 LDA 토픽 모델링 방법

제목과 초록을 결합한 2,044편의 텍스트에 LDA 토픽 모델링을 수행하였다. 전처리에서는 결측·저작권 표기 제거, 소문자 변환, 특수문자·숫자 제거(3D 등은 보존), 표제어화를 수행하고, 불용어 362개(일반 198개, 도메인 164개)를 제거하였으며 주요 약어 63개를 정규화하였다. 1회 출현어와 문서의 90% 이상에 등장한 단어를 제거하여 어휘 5,781개의 문서-단어 행렬을 구축하였다(문서당 평균 71.3토큰). 최적 토픽 수(K)는 2~20개 범위에서 일관성 점수(C_v)와 혼란도를 비교하고 해석의 명확성을 고려하여 결정하였다. C_v는 토픽 내 단어의 의미적 연관성을, 혼란도는 모델의 문서 설명력을 나타낸다. 각 토픽은 상위 키워드와 분류된 논문을 검토하여 해석하였다. 분석은 Python으로 수행하였으며, 문장 다듬기에 Claude Opus 5.5를 보조적으로 활용하였다.

4. 분석 결과

4.1 연도별 지식 생산

보행 로봇 연구의 성장 추이를 파악하기 위해 2016년부터 2025년까지 연도별 논문 출판 수를

분석하였으며, 그 결과를 [표 1]과 같이 정리하였다. 전체 기간 동안 출판 수는 2016년 164편에서 2025년 328편으로 2배로 증가하였으며, 연평균 성장률(CAGR)은 8.0%로 나타났다. 초기인 2016~2017년에는 연 150편 내외였으나 이후 꾸준히 확대되어 2024년 254편, 2025년 328편으로 최근 증가 폭이 커졌다. 2023년에는 일시적으로 192편으로 감소하였으나 이후 다시 증가세를 회복하였다.

분석 기간을 두 시기로 구분하면 전기(2016~2020)는 836편(연평균 167.2편, CAGR 4.8%), 후기(2021~2025)는 1,208편(연평균 241.6편, CAGR 12.1%)으로 후기 생산성이 전기 대비 44.5% 증가하였다. 전체 논문의 59.1%가 후기에 집중되어 최근 연구가 가속적으로 확대되고 있음을 보여준다.

[표 1] 연도별 논문 출판 수 (2016-2025)

[Table 1] Number of Publications by Year (2016-2025)

연도	논문 수	전년 대비(%)	비중(%)
2016	164	-	8.0
2017	144	-12.2	7.0
2018	162	12.5	7.9
2019	168	3.7	8.2
2020	198	17.9	9.7
2021	208	5.1	10.2
2022	226	8.7	11.1
2023	192	-15.0	9.4
2024	254	32.3	12.4
2025	328	29.1	16.0
합계	**2,044**		**100**

4.2 저널 분포

[표 2]는 전체 기간 출판 수 상위 10개 저널의 논문 수와 영향력 지표를 정리한 것이다. 보행 로봇 논문은 646개 저널에 분산 게재되었으며, 상위 저널은 IEEE Robotics and Automation Letters(149편), International Journal of Humanoid Robotics(78편), Robotics and Autonomous Systems(59편) 순이다. 1위 저널은 피인용 수, h-index, CPP(23.0)에서도 최상위이며, International Journal of Social Robotics는 출판 수 4위이나 CPP 22.7로 두 번째로 높다. 반면 Biomimetics는 CPP 2.2, h-index 5로 영향력이 가장 낮은데, 게재 논문이 후기에 집중되어 인용이 충분히 누적되지 않았기 때문으로 보인다. 상위 저널의 주제는 핵심 기술, 인간 중심 연구, 다학제 응용, 생체모방 설계로 분화되어 있다.

[표 3]은 시기별 상위 5개 저널의 분포를 정리한 것이다. 전기(2016~2020)에는 IEEE Robotics and Automation Letters를 중심으로 제어·자율 시스템·휴머노이드 저널이 상위를 차지해 기술 연구가 지

배적이었다. 후기(2021~2025)에는 이 저널이 1위를 유지하였고, Biomimetics(생체모방), International Journal of Social Robotics(인간-로봇 상호작용), IEEE Access(오픈 액세스 응용)가 새롭게 진입하여, 제어·시스템 중심 구조가 인간 중심 연구, 생체모방, 응용·확산 중심으로 다변화되었다.

[표 2] 보행 로봇 연구의 저널 분포 (전체 상위 10개)

[Table 2] Journal Distribution of Legged Robot Research (Top 10 Overall)

순위	저널	논문수	비중(%)	피인용	CPP	h-index
1	IEEE Robotics and Automation Letters	149	7.3	3,423	23.0	31
2	International Journal of Humanoid Robotics	78	3.8	944	12.1	16
3	Robotics and Autonomous Systems	59	2.9	853	14.5	18
4	International Journal of Social Robotics	55	2.7	1,250	22.7	18
5	IEEE Access	46	2.3	517	11.2	12
6	Advanced Robotics	41	2.0	483	11.8	14
6	Biomimetics	41	2.0	89	2.2	5
8	Robotica	36	1.8	347	9.6	12
9	Applied Sciences (Switzerland)	34	1.7	479	14.1	11
10	Journal of Intelligent & Robotic Systems	33	1.6	416	12.6	12

주: 전체 2,044편, 총 피인용 33,274건, 고유 저널 646개. CPP는 논문당 평균 피인용 수.

[표 3] 시기별 저널 분포(시기별 상위 5개)

[Table 3] Journal Distribution by Period (Top 5 Journals in Each Period)

시기	순위	저널	논문수	비중(%)	CPP
전기(2016 – 2020)	1	IEEE Robotics and Automation Letters	59	7.1	40.3
	2	International Journal of Humanoid Robotics	48	5.7	16.6
	3	Robotics and Autonomous Systems	39	4.7	16.1
	4	Advanced Robotics	30	3.6	12.7
	5	International Journal of Advanced Robotic Systems	27	3.2	9.0
후기(2021 – 2025)	1	IEEE Robotics and Automation Letters	90	7.5	11.6
	2	Biomimetics	41	3.4	2.2
	3	International Journal of Social Robotics	37	3.1	13.4
	4	IEEE Access	31	2.6	6.9
	5	International Journal of Humanoid Robotics	30	2.5	4.8

4.3 국가 분포

[표 4]는 출판 수 상위 10개국의 논문 수와 영향력 지표를 정리한 것이다. 중국은 499편(24.4%)으로 출판 수 1위이나 CPP는 10.9로 낮고, 미국은 3위(247편)이지만 피인용 비중 20.7%, CPP 27.9, h-index 38로 질적 지표 1위이다. 상위 국가는 양적 생산형(중국, 인도, 대만), 질적 영향력형(미국,

영국, 독일), 균형형(일본, 한국, 이탈리아, 프랑스)으로 구분되어, 아시아 중심의 양적 성장과 북미·유럽 중심의 질적 영향력이 병존하는 이원적 구조를 보인다.

[표 4] 보행 로봇 연구의 국가 분포(전체 상위 10개)

[Table 4] Country Distribution of Legged Robot Research (Top 10 Overall)

순위	국가	논문수	비중(%)	피인용	피인용(%)	CPP	h-index
1	China	499	24.4	5,420	16.3	10.9	34
2	Japan	251	12.3	3,862	11.6	15.4	31
3	United States	247	12.1	6,888	20.7	27.9	38
4	Italy	189	9.2	3,960	11.9	21.0	32
5	India	132	6.5	1,929	5.8	14.6	25
6	United Kingdom	125	6.1	2,962	8.9	23.7	28
7	Germany	119	5.8	2,599	7.8	21.8	23
8	France	112	5.5	2,343	7.0	20.9	24
9	South Korea	111	5.4	2,360	7.1	21.3	21
10	Taiwan	78	3.8	959	2.9	12.3	18

주: 전체 고유 국가 83개. 국가 귀속은 저자 소속국 기준.

[표 5]는 시기별 상위 5개국을 정리한 것이다. 전기에는 중국, 일본, 미국이 균형을 이루었으나, 후기에는 중국의 출판 비중이 30.1%로 크게 확대되고 인도가 새롭게 진입하였다. 미국은 두 시기 모두 높은 CPP를 유지하여 중국의 양적 집중과 미국의 질적 영향력이 더욱 뚜렷해졌다.

[표 5] 시기별 국가 분포 (시기별 상위 5개)

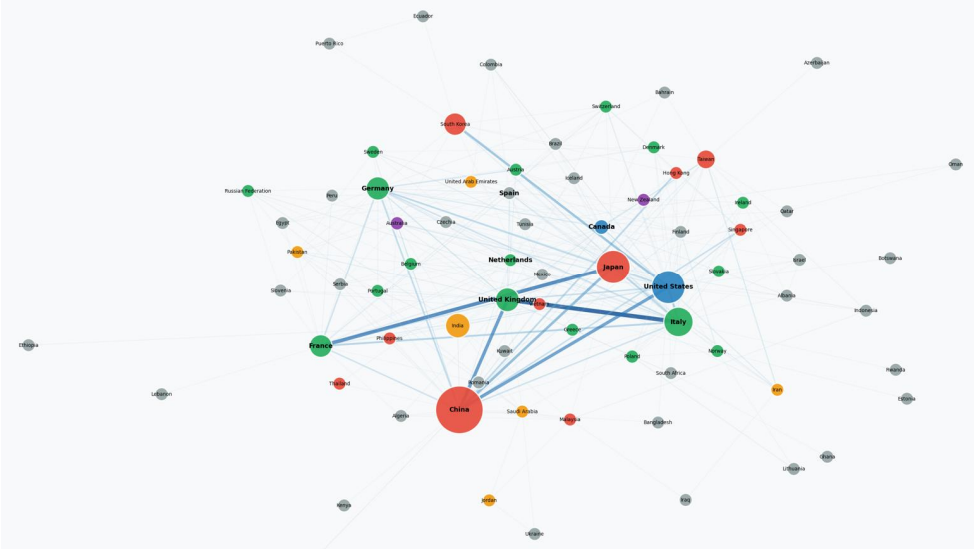
[Table 5] Country Distribution by Period (Top 5 Countries in Each Period)

시기	순위	국가	논문수	비중(%)	CPP
전기(2016 – 2020)	1	China	135	16.1	15.8
	2	Japan	131	15.7	20.0
	3	United States	105	12.6	36.2
	4	Italy	93	11.1	31.7
	5	France	61	7.3	29.7
후기(2021 – 2025)	1	China	364	30.1	9.0
	2	United States	142	11.8	21.8
	3	Japan	120	9.9	10.4
	4	Italy	96	7.9	10.6
	5	India	84	7.0	11.0

4.4 국가 간 협력 네트워크

국가 간 공동저자 네트워크는 74개국, 310개 협력 관계로 구성된다. [그림 2]는 논문 생산량을

노드 크기로, 공동 연구 강도를 연결선 두께로, 지역을 노드 색으로 표현한 것이다. 중국, 미국, 일본, 유럽 주요국이 큰 노드를 이루며 굵게 연결된 반면, 소규모 국가는 외곽에서 제한적으로 연결되는 중심-주변 구조가 나타난다.



[그림 2] 보행 로봇 연구의 국제 협력 네트워크 (2016-2025)

[Fig. 2] International Collaboration Network in Legged Robot Research (2016-2025)

[표 6]은 연결 중심성 상위 10개국의 중심성 지표를 정리한 것이다. 미국은 연결 중심성(0.58)이 가장 높고 매개·근접 중심성에서도 1위로 네트워크의 핵심 허브에 위치하며, 이탈리아(0.45), 영국(0.41), 중국(0.40)이 뒤를 잇는다. 반면 고유벡터 중심성은 중국(0.44)이 가장 높아 영향력 있는 국가들과 긴밀히 연결되어 있다.

[표 6] 국가 협력 네트워크 중심성 (전체, 연결 중심성 상위 10개)

[Table 6] Centrality of the Country Collaboration Network (Top 10 by Degree Centrality)

순위	국가	연결	매개	근접	고유벡터
1	United States	0.58	0.22	0.69	0.36
2	Italy	0.45	0.07	0.62	0.41
3	United Kingdom	0.41	0.13	0.61	0.41
4	China	0.40	0.08	0.60	0.44
5	Germany	0.38	0.05	0.58	0.25
6	Canada	0.34	0.07	0.57	0.12
7	France	0.30	0.05	0.54	0.30
8	Japan	0.27	0.06	0.57	0.31

9	Netherlands	0.27	0.09	0.53	0.08
10	Spain	0.26	0.04	0.53	0.08

주: 네트워크 74개국·310개 에지.

[표 7]은 시기별 연결 중심성 상위 5개국의 중심성 지표를 정리한 것이다. 전기에는 독일(0.46), 영국, 미국, 이탈리아 등 유럽·북미 국가가 중심이었으나, 후기에는 미국(0.51)이 1위로 올라서고 중국(0.40)이 3위로 진입하여 고유벡터 중심성에서도 1위(0.48)를 기록하였다. 독일과 프랑스가 상위 5개국에서 제외되면서 협력 구조는 유럽 중심에서 미국·중국 양축으로 재편되고 있다.

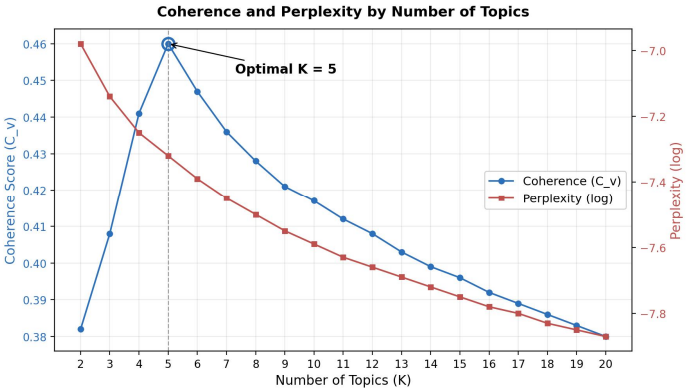
[표 7] 시기별 국가 협력 네트워크 중심성 (시기별 연결 중심성 상위 5개)

[Table 7] Centrality of the Country Collaboration Network by Period (Top 5 by Degree Centrality in Each Period)

시기	순위	국가	연결	매개	근접	고유벡터
전기(2016 – 2020)	1	Germany	0.46	0.13	0.59	0.29
	2	United Kingdom	0.44	0.17	0.62	0.37
	3	United States	0.44	0.23	0.59	0.32
	4	Italy	0.42	0.10	0.58	0.45
	5	France	0.33	0.10	0.55	0.40
후기(2021 – 2025)	1	United States	0.51	0.21	0.66	0.39
	2	Italy	0.46	0.18	0.63	0.37
	3	China	0.40	0.16	0.60	0.48
	4	United Kingdom	0.30	0.09	0.56	0.43
	5	Canada	0.29	0.11	0.55	0.13

주: 전기 49개국 160개 에지, 후기 71개국 229개 에지.

4.5 LDA 토픽 모델링 결과



[그림 3] 토픽 수에 따른 일관성 점수와 혼란도

[Fig. 3] Coherence Score and Perplexity by Number of Topics

[그림 3]은 토픽 수(2~20개)에 따른 일관성 점수(C_v)와 혼란도의 변화를 나타낸 것이다. 혼란도는 토픽 수가 늘수록 완만하게 증가하였고 일관성 점수는 5개에서 0.46으로 정점을 이룬 후 감소하여, 해석 가능성과 통계적 적합성을 고려해 K=5로 결정하였다.

토픽의 비중과 상위 키워드는 [표 8]과 같으며, 비중은 우세 토픽으로 배정된 논문의 비율이다.

[표 8] LDA 토픽별 비중과 상위 키워드(K=5)

[Table 8] Topic Proportions and Top Keywords by LDA Topic (K=5)

토픽	비중(%)	핵심 키워드 (상위 10개)
T1 운동·동역학·신체	47.1	motion, dynamic, body, controller, simulation, whole, time, trajectory, optimization, contact
T2 사회·참여·인간 중심	11.5	child, social, participant, interaction, disorder, group, old, care, activity, patient
T3 관절·팔·손	13.5	joint, arm, hand, network, motion, design, movement, space, neural, mechanism
T4 상호작용·작업·행동	23.2	interaction, task, behavior, user, technology, perception, learning, service, response, development
T5 센서·객체·질량	4.7	sensor, object, mass, center, 3D, footstep, image, center_of_mass, recovery, force

토픽 1(운동·동역학·신체)은 47.1%로 가장 큰 비중을 차지하며, 사족 로봇의 운동 최적화, 이족 로봇의 외란 보상·균형 제어, 궤도 생성 등 동적 보행 제어를 다루는 가장 기초적인 영역이다. 토픽 2(사회·참여·인간 중심)는 11.5%로, 아동 불안 완화, 우울·사회불안 중재, 자폐 지원 등 휴머노이드의 임상·복지 응용을 다룬다. 토픽 3(관절·팔·손)은 13.5%로, 텐던·케이블 구동 팔과 어깨, 인체모사형 손, 역기구학 등 신체 부위의 기구 설계를 다루는 하드웨어 영역이다. 토픽 4(상호작용·작업·행동)는 23.2%로 두 번째로 크며, 자율 인지, 인간형 행동 설계, 사용자 반응과 수용성, 공공 환경 행동 평가 등 실제 환경에서의 상호작용 연구로 후기에 급성장하였다. 토픽 5(센서·객체·질량)는 4.7%로 가장 작으며, 전자피부, 광섬유 힘 센서, 객체 인식 등 센서 인식 기술을 다룬다.

[표 9]는 시기별 토픽 비중의 변화를 정리한 것이다. 토픽 1은 전기 51.2%에서 후기 44.4%로 약 7%p 감소하였으나, 군집 알고리즘 기반 경로 최적화와 비선형 운동 최적화 중심에서 외란 보상 제어, 근건 구동 제어, 전신 제어 등 실제 환경의 교란에 강건한 제어 기술로 고도화되었다.

[표 9] 시기별 토픽 비중 변화(%)

[Table 9] Changes in Topic Proportions by Period (%)

시기	T1	T2	T3	T4	T5
전기(2016 – 2020)	51.2	10.2	13.3	19.2	6.1
후기(2021 – 2025)	44.4	12.4	13.6	25.9	3.7

가장 크게 성장한 토픽 4는 19.2%에서 25.9%로 약 7%p 증가하였다. 전기에는 휴머노이드 개발 서베이, 인간형 행동 설계, 의인화의 개념적 논의 등 탐색적 연구가 주를 이루었으나, 후기에는 자율 인지, 사용자 정서·인지 반응, 공공장소 행동 평가, 프라이버시 우려 등 실제 사용 환경을 전제로 한 응용 연구로 구체화되었다. 토픽 2도 10.2%에서 12.4%로 확대되어, 자폐 특성 평가 등 임상 적용 가능성 탐색에서 수술 전 아동 불안 관리, 우울·사회불안 중재 등 구체적 치료 응용으로 발전하였다. 토픽 3은 13% 내외로 안정적으로 유지되었고, 토픽 5는 6.1%에서 3.7%로 축소되었는데, 이는 개별 센서·소재 연구가 시스템 통합 연구의 일부로 수행되는 경향과 관련된 것으로 보인다. 종합하면 보행 로봇 연구는 기초 제어 기술에서 상호작용·작업 수행·인간 중심 응용으로 무게중심이 이동하는 동시에 각 주제 내부에서도 탐색적 연구에서 응용·고도화 연구로 발전하고 있다.

5. 결론

본 연구는 보행 로봇 논문 2,044편을 계량서지분석과 LDA 토픽 모델링으로 분석하여 전기와 후기를 비교하였다. 그 결과 후기 논문 수는 전기 대비 44.5% 증가하였고 생체모방, 인간-로봇 상호작용, 오픈 액세스 응용 저널의 비중이 커졌다. 국가별로는 중국이 생산성에서, 미국이 피인용 영향력에서 1위를 차지하는 이원 구조가 나타났으며, 협력 구조는 유럽 중심에서 미국·중국 양축으로 재편되었다. 주제 면에서는 토픽 1(운동·동역학·신체)의 비중이 감소하고 토픽 4(상호작용·작업·행동)가 가장 크게 성장하였으며, 각 주제 내부에서도 탐색·기초 연구에서 강건 제어와 응용 연구로 심화되었다. 본 연구의 결과가 주는 시사점은 다음과 같다.

첫째, 보행 로봇이 실제 환경에서 인간과 상호작용하며 임무를 수행하는 플랫폼으로 발전하고 있으므로 강화학습 기반 제어, 인간-로봇 상호작용, 안전성을 포함한 융합형 연구에 대한 지속적 지원이 필요하다. 둘째, 생산과 영향력의 분리와 미국·중국 중심의 협력 재편은 한국과 같은 중간 규모 연구국이 협력 대상과 방식을 전략적으로 선택해야 함을 시사한다. 셋째, 연구 관심이 실제 활용으로 이동하고 있으므로 제조, 물류, 재난 대응, 의료 등 분야별 응용 연구를 확대해야 한다.

본 연구는 보행 로봇 연구 전반의 동향과 주제 구조에 분석 범위를 두었다. 향후 연구에서는 지역별 연구 전략과 협력 구조의 차이, 그리고 공학·사회과학·자연과학 등 학문 분야별 연구 주제와 접근 방식의 차이를 비교 분석할 필요가 있다.

References

[1] F. Rubio, F. Valero, and C. Llopis-Albert, "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 1-22, Apr. 2019, doi: 10.1177/1729881419839596.

[2] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing, and S. Kim, "MIT Cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, Oct. 1-5, 2018, pp. 2245-2252, doi: 10.1109/IROS.2018.8593885.

[3] E. Krotkov et al., "The DARPA Robotics Challenge finals: Results and perspectives," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 2, pp. 229-240, Mar. 2017, doi: 10.1002/rob.21683.

[4] M. Bjelonic et al., "Keep rollin'—Whole-body motion control and planning for wheeled quadrupedal robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 2116-2123, Apr. 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2899750.

[5] F. Jenelten, T. Miki, A. E. Vijayan, M. Bjelonic, and M. Hutter, "Perceptive locomotion in rough terrain—Online foothold optimization," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5370-5376, Oct. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3007427.

[6] M. Hutter et al., "ANYmal—A highly mobile and dynamic quadrupedal robot," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Republic of Korea, Oct. 9-14, 2016, pp. 38-44, doi: 10.1109/IROS.2016.7758092.

[7] J. Hwangbo et al., "Learning agile and dynamic motor skills for legged robots," *Science Robotics*, vol. 4, no. 26, Art. no. eaau5872, Jan. 2019, doi: 10.1126/scirobotics.aau5872.

[8] C. D. Bellicoso, F. Jenelten, C. Gehring, and M. Hutter, "Dynamic locomotion through online nonlinear motion optimization for quadrupedal robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2261-2268, July 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2794620.

[9] J. Ibarz, J. Tan, C. Finn, M. Kalakrishnan, P. Pastor, and S. Levine, "How to train your robot with deep reinforcement learning: Lessons we have learned," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, nos. 4-5, pp. 698-721, Apr. 2021, doi: 10.1177/0278364920987859.

[10] B. Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, "Mini Cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control," in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, May 20-24, 2019, pp. 6295-6301, doi: 10.1109/ICRA.2019.8793865.

[11] T. Miki, J. Lee, J. Hwangbo, L. Wellhausen, V. Koltun, and M. Hutter, "Learning robust perceptive locomotion for quadrupedal robots in the wild," *Science Robotics*, vol. 7, no. 62, Art. no. eabk2822, Jan. 2022, doi: 10.1126/scirobotics.abk2822.

[12] X. B. Peng, G. Berseth, K. Yin, and M. van de Panne, "DeepLoco: Dynamic locomotion skills using hierarchical deep reinforcement learning," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 36, no. 4, Art. no. 41, July 2017, doi: 10.1145/3072959.3073602.

[13] B. Siciliano and O. Khatib, Eds., *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008.

[14] C. D. Bellicoso et al., "ALMA—Articulated locomotion and manipulation for a torque-controllable robot," in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, May 20-24, 2019, pp. 8477-8483, doi: 10.1109/ICRA.2019.8794273.

[15] A. Ajoudani, A. M. Zanchettin, S. Ivaldi, A. Albu-Schäffer, K. Kosuge, and O. Khatib, "Progress and prospects of the human-robot collaboration," *Autonomous Robots*, vol. 42, no. 5, pp. 957-975, June 2018, doi: 10.1007/s10514-017-9677-2.

[16] P. Kumar and A. Jhawar, "Avatar-human interaction: Bibliometric review and future research avenues through the theory-context-methods lens," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 41, no. 15, pp. 9618-9632, Aug. 2025, doi: 10.1080/10447318.2024.2426913.

[17] Y. Qu, C. K. Y. Lo, and E. Baek, "From humanoid to virtual humans: A systematic literature review of avatar marketing," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 41, no. 20, pp. 12602-12621, Oct. 2025, doi: 10.1080/10447318.2025.2464889.

[18] İ. Şahin, N. Cakmakoglu Arici, and D. E. Koç, "Tour guiding technologies: A bibliometric analysis, mapping trends and future research agenda," *Journal of Hospitality and Tourism Technology*, early access, pp. 1-35, Jan. 2026, doi: 10.1108/JHTT-12-2024-0867.

[19] S. Zhang, S. Wang, R. Liu, H. Dong, X. Zhang, and X. Tai, "A bibliometric analysis of research trends of artificial intelligence in the treatment of autistic spectrum disorders," *Frontiers in Psychiatry*, vol. 13, Art. no. 967074, Aug. 2022, doi: 10.3389/fpsyt.2022.967074.

[20] T. de J. Mateo Sanguino, "50 years of rovers for planetary exploration: A retrospective review for future directions," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 94, pp. 172-185, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.04.020.

[21] P. Kumar, S. Gupta, N. Virmani, and S. Jagtap, "Applications of cobots in manufacturing: A bibliometric analysis," *International Journal of Innovation Studies*, vol. 10, no. 1, pp. 80-93, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.ijis.2025.10.002.

[22] P. Mongeon and A. Paul-Hus, "The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis," *Scientometrics*, vol. 106, no. 1, pp. 213-228, Jan. 2016, doi: 10.1007/s11192-015-1765-5.

[23] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, May 2015, doi: 10.1038/nature14539.

[24] M. I. Jordan and T. M. Mitchell, "Machine learning: Trends, perspectives, and prospects," *Science*, vol. 349, no. 6245, pp. 255-260, July 2015, doi: 10.1126/science.aaa8415.

[25] J. Lee, J. Hwangbo, L. Wellhausen, V. Koltun, and M. Hutter, "Learning quadrupedal locomotion over challenging terrain," *Science Robotics*, vol. 5, no. 47, Art. no. eabc5986, Oct. 2020, doi: 10.1126/scirobotics.abc5986.

[26] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines," *Journal of Business Research*, vol. 133, pp. 285-296, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

[27] J. E. Hirsch, "An index to quantify an individual's scientific research output," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, no. 46, pp. 16569-16572, Nov. 2005, doi: 10.1073/pnas.0507655102.

[28] M. E. J. Newman, "The structure of scientific collaboration networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, no. 2, pp. 404-409, Jan. 2001, doi: 10.1073/pnas.98.2.404.

[29] L. C. Freeman, "Centrality in social networks: Conceptual clarification," *Social Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 215-239, 1978, doi: 10.1016/0378-8733(78)90021-7.