실내 공간에서 로봇의 이동 특성을 반영한 라스트마일 딜리버리 모델

2021.11.01

김준수 (jskim0305@inha.edu)
정호상 (hjung@inha.ac.kr)
인하대학교 물류전문대학원

목차

1. 소개

2. 선행연구분석

3. 문제정의

4. 수리모델(두개의부분으로구성)

5. 실험디자인및결과

6. 결론및향후연구방향

참고문헌

01 소개

- **실내 공간에서의 로봇 기반 라스트마일 딜리버리를 위한 도전**
  - 온라인 쇼핑의 증가에 따른 도심에서의 라스트마일 딜리버리 수요 증가 (Shen et al., 2020)
  - 배송 로봇이 새로운 대안으로 떠오르며 로봇 기반 라스트마일 딜리버리 국내외 사례 및 연구 증가 추세 (Boysen et al., 2018; Figliozzi, M., and Jennings, D., 2020)
  - 실제로 로봇 관련 기술도 빠르게 증가하고 있으며 (Zhang et al., 2019; Azizi et al., 2021), 우리나라 정부도 2020년 10월 발표한 '로봇 산업 선제적 규제 혁신 로드맵'에서 물류 로봇을 집중 육성 분야로 선정

<배달의민족 실내 배송 로봇>

<LG전자 실내외 배송 로봇>

01 소개

- **본 연구의 중요성**
  - 로봇 기반 라스트마일 딜리버리에 대한 관심이 전세계적으로 증가하고 있으나 기술에 대한 연구가 우선이 되고 있으며 운영 최적화 측면 (스케줄링, 라우팅) 에서는 아직 연구가 부족
  - 대부분의 선행 연구는 기존의 Vehicle Routing Problem 을 활용해서 실외에서의 라우팅 문제를 푸는 데 초점 (Boysen et al., 2018; Simoni et al., 2020; Yu et al., 2020; Chen et al., 2020, 2021)
  - 도심에서 라스트마일 딜리버리의 최종 목적지는 고층 빌딩 내부이므로 이를 위해 현실적인 로봇 이동 시간 추정과 로봇 라우팅 최적화 라는 두 가지 문제 도출
  - 엘리베이터 이용과 같은 실내 공간의 특성과 가감속, 코너링과 같은 로봇의 이동 특성을 반영한 로봇 이동 시간 추정식을 개발
  - 실제 건물 구조와 유사하게 디자인된 환경에서 Vehicle Routing Problem with Multiple Trips 수리 모델을 통해 현실적인 로봇 이동 시간 추정의 필요성 입증

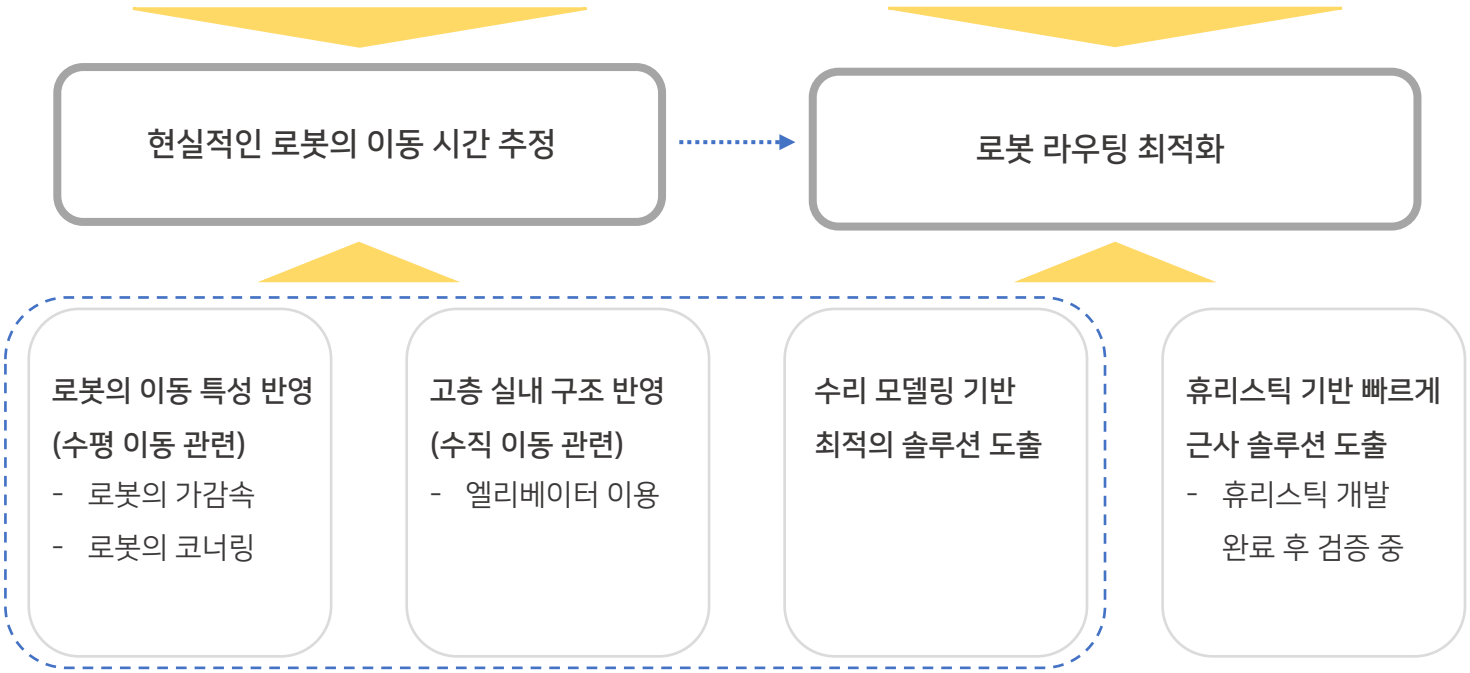
02 선행연구 분석

Table 1. 로봇 딜리버리 라우팅 선행 연구 조사

Papers	Modeling approach	Travel time calculation	Environments
Boysen et al., 2018	MILP	Distance/speed	Outdoors
Simoni et al.,	MILP	Distance/speed	Outdoors
Yu et al., 2021	MILP	Distance/speed	Outdoors
Chen et al., 2020	MILP	Distance/speed	Outdoors
Chen et al., 2021	MILP	Distance/speed	Outdoors
Mantha et al., 2020	LP	Distance/speed	Indoors
Lee et al., 2020	MILP	Distance/speed + characteristic of indoor environments	Indoors
Ours	MILP	Distance/speed + characteristic of robot + characteristic of indoor environments	Indoors

03 문제 정의

실내 로봇 기반 라스트마일 딜리버리를 위해 해결해야 하는 두 가지 문제



04 수리 모델 (로봇 이동 시간 추정)

- 두 노드 사이 로봇의 수평 이동 시간 추정 (t_{ij}^{h})
  - 출발 노드 i 에서 도착 노드 j 로 가는 경우 이를 L_1, L_2, L_3 세 개의 구간으로 나누어서 이동 시간 계산 가능

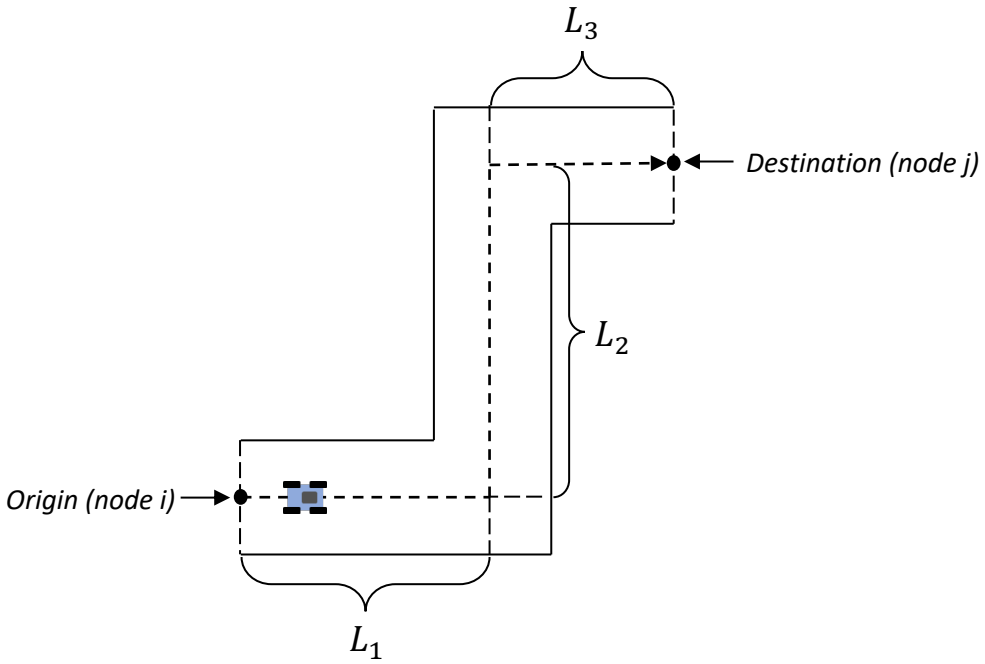


Figure 1. 수평 이동 예시

04 수리 모델 (로봇 이동 시간 추정)

- **두 노드 사이 로봇의 수평 이동 시간 추정 (t_{ij}^{h})**
  - 세 구간 L_1, L_2, L_3 를 다시 가속 (Acceleration), 등속 (Uniform), 감속 (Deceleration) 으로 삼등분 하여 단순하게 거리를 속력으로 나누는 접근이 아닌 가속과 감속, 그리고 코너링과 같은 로봇의 이동 특성을 반영하여 더 현실적인 로봇 이동 시간을 추정 → 적용되는 로봇의 최대 속도는 $1m/s$. 최대 가속도, 최대 감속 및 안전 속도는 각각 $0.3m/s^2, 0.6m/s^2, 0.5m/s$ 로 설정 (Park & Huh, 2016).

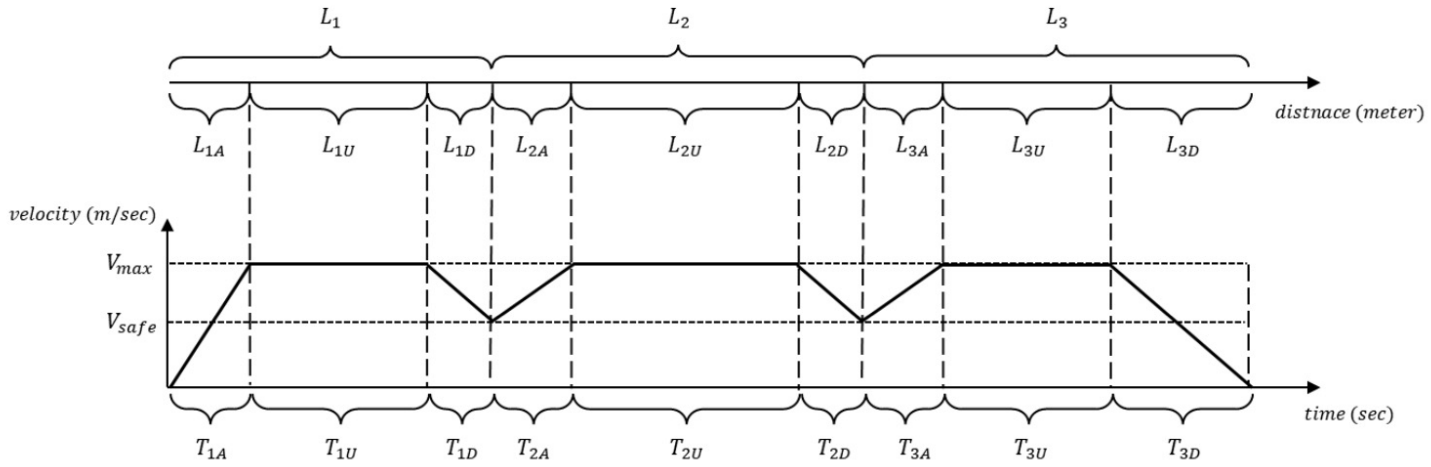


Figure 2. 수평 이동 거리 및 시간 계산 그래프

04 수리 모델 (로봇 이동 시간 추정)

- 두 노드 사이 로봇의 최종 수평 이동 시간 추정식 (t_{ij}^{h})

$$t_{ij}^{h}$$

$$= \frac{V_{max}}{A} + \frac{V_{max}}{D} + c_{ij}\left(\frac{V_{max} - V_{safe}}{A} + \frac{V_{max} - V_{safe}}{D}\right)$$

$$+ \frac{\sum_{m}^{c_{ij}+1} L_m - \sum_{m=1}^{c_{ij}+1}\left\{\frac{\left(V_{max} - V_{min_A}^{m}\right)^2}{2A} + \frac{V_{min_A}^{m}\left(V_{max} - V_{min_A}^{m}\right)}{A} + \frac{\left(V_{max} - V_{min_D}^{m}\right)^2}{2D} + \frac{V_{min_D}^{m}\left(V_{max} - V_{min_D}^{m}\right)}{D}\right\}}{V_{max}}$$

$$If\ c_{ij} = 0, V_{min_A}^{m} = V_{min_D}^{m} = 0$$

$$If\ c_{ij} = 1, V_{min_A}^{1} = 0,\ V_{min_D}^{1} = V_{safe},$$

$$V_{min_A}^{c_{ij}+1} = V_{safe}, \text{ and } V_{min_D}^{c_{ij}+1} = 0$$

$$If\ c_{ij} \geq 2, V_{min_A}^{1} = 0,\ V_{min_D}^{1} = V_{safe},$$

$$V_{min_A}^{m} = V_{min_D}^{m} = V_{safe},$$

$$V_{min_A}^{c_{ij}+1} = V_{safe}, \text{ and } V_{min_D}^{c_{ij}+1} = 0$$

04 수리 모델 (로봇 이동 시간 추정)

- **두 노드 사이 로봇의 수직 이동 시간 추정 (t_{ij}^{v})**
  - n 층에 있는 출발 노드 i 에서 m 층에 있는 도착 노드 j 로 이동
  - 중간에 L_4 라는 엘리베이터를 타고 층간 이동 하는 부분이 존재

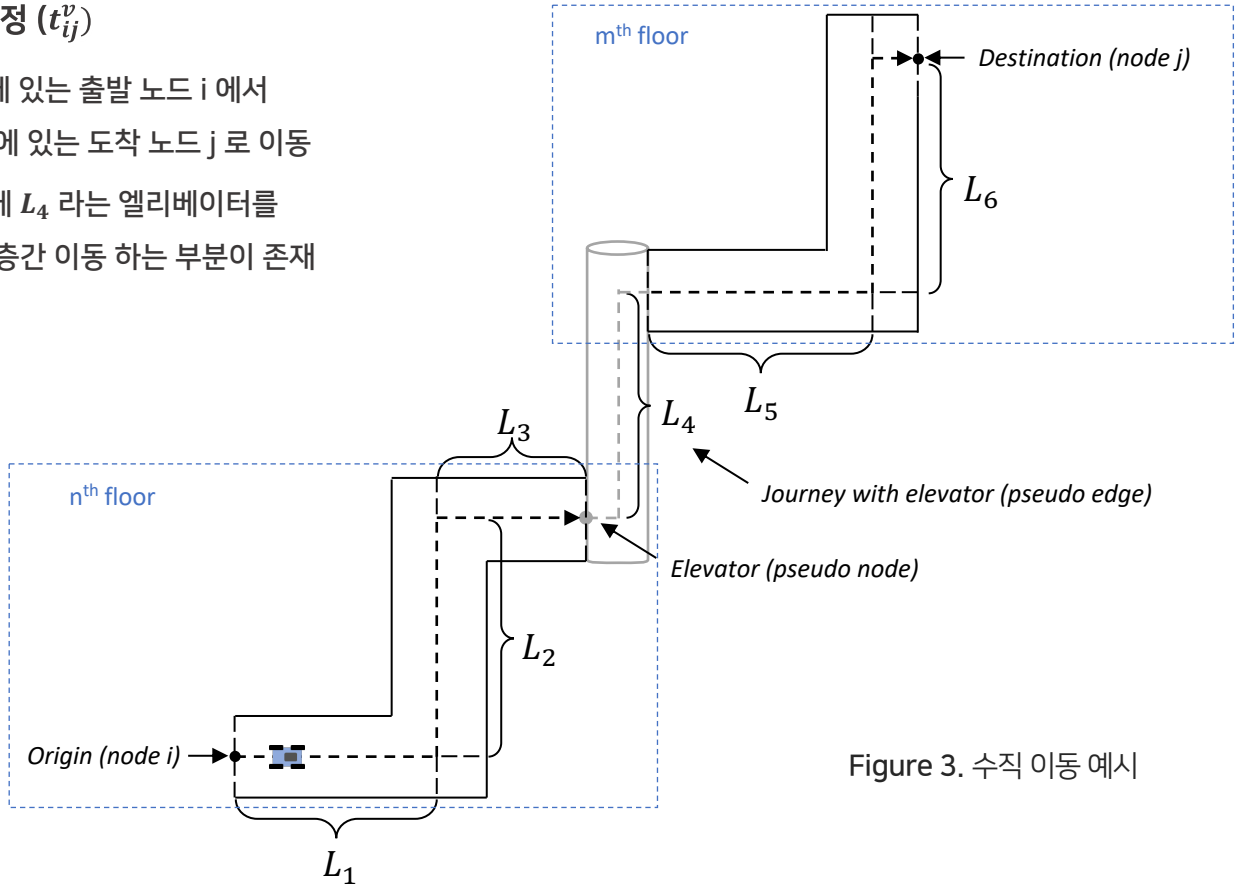


Figure 3. 수직 이동 예시

04 수리 모델 (로봇 이동 시간 추정)

- **두 노드 사이 로봇의 수직 이동 시간 추정 (t_{ij}^{v}) 에서 엘리베이터라는 불확실성 존재**
  - 엘리베이터를 타고 이동하는 시간을 단순히 층간 높이 나누기 엘리베이터의 속력으로 하기에는 많은 변수가 존재
    (예: 엘리베이터를 기다리는 시간, 엘리베이터가 멈추는 시간, 이동 중간에 멈출 확률)

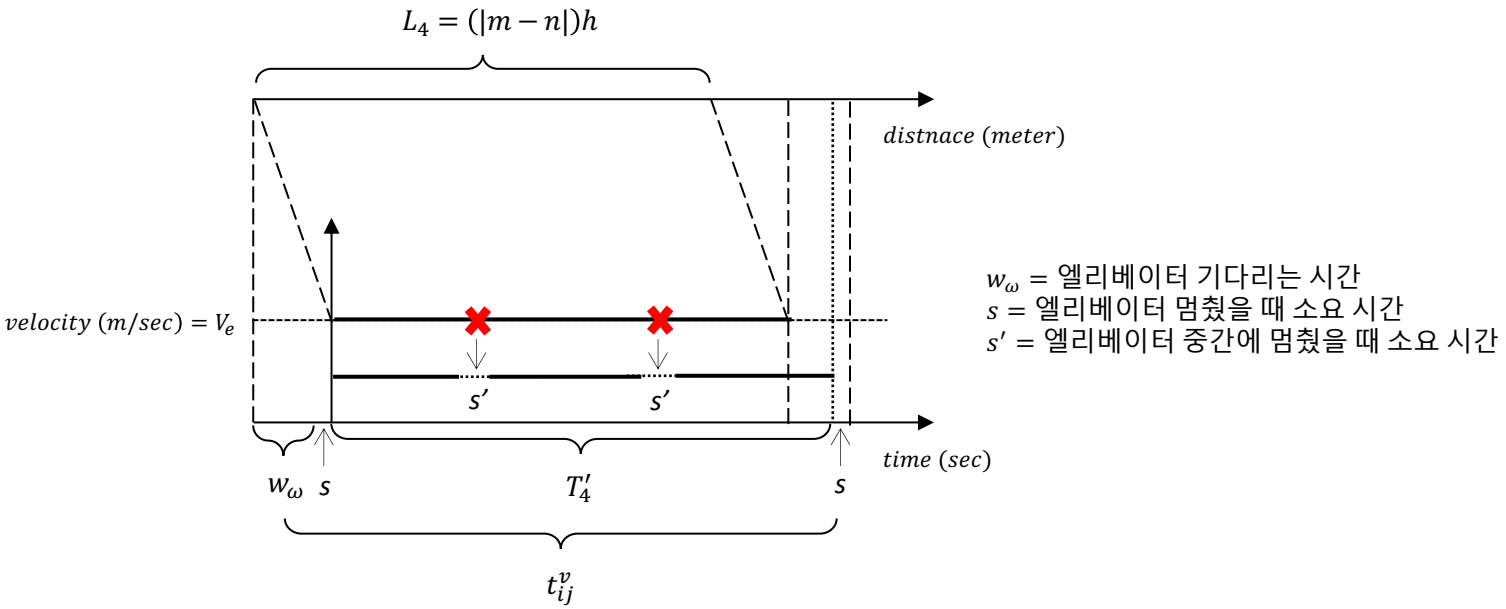


Figure 4. 이동 중간에 두 번의 멈춤이 일어난 상황 묘사

04 수리 모델 (로봇 이동 시간 추정)

- **두 노드 사이 로봇의 최종 수직 이동 시간 추정식 (t_{ij}^{h})**
  - n 층에서 m 층으로 이동함에 있어 중간 멈춤이 발생할 확률은 이항 분포를 따른다고 가정
  - 중간 멈춤 횟수 ~$B(r, p_{\omega})$
  - 최대 멈춤 가능 횟수 $\mathrm{r} = |m - n| - 1$
  - 시나리오 ω 에서 멈춤 가능성 확률은 $p_{\omega}=\begin{cases} 0.5, if\,\omega = peak \\ 0.3, if\,\omega = normal \\ 0.1, if\,\omega = off - peak \end{cases}$
  - $L_4 = (|m - n|)h$
  - $t_{ij}^{v} = w_{\omega} + 2s + (r \cdot p_{\omega} \cdot s') + \frac{L_4}{V_e}$ → 수직 이동은 엘리베이터 기다리는 시간 + 엘리베이터 멈췄을 때 소요 시간 * 2 + 중간에서 멈췄을 때 소요 시간 + (층간 높이 나누기 엘리베이터 속력)

- **두 노드 사이 로봇의 최종 이동 시간 (t_{ij}) 은 수평 이동 시간 (t_{ij}^{h}) 과 수직 이동 시간 (t_{ij}^{v}) 의 합**

04 수리 모델 (로봇 라우팅 최적화)

- Vehicle Routing Problem with Multiple Trips (VRPMT)

집합과 인덱스

$V = \{0, 1, \dots, n\}$	디포와 고객의 집합 $(i, j \in V)$;
$C = \{1, \dots, n\}$	고객의 집합 $C \subset V$;
$K = \{1, 2, \dots, K\}$	로봇의 집합 $(k \in K)$;
i, j	노드의 인덱스
k	로봇의 인덱스

파라미터

t_{ij}	노드 i와 노드 j 사이의 이동 시간
q_i	노드 i에서의 수요량
Q	로봇의 적재 가능 용량 (# of boxes)

의사결정변수

x_{ij}^k	1, 만약 로봇 k 가 아크 (i, j) 를 이동하면
	0, 안하면
u_i^k	로봇 k 가 노드 i 에 도착했을 때 적재 용량

04 수리 모델 (로봇 라우팅 최적화)

- Vehicle Routing Problem with Multiple Trips (VRPMT)

수리 모델링

$$Minimize \ \sum_{(i,j)\in A} \sum_{k\in K} t_{ij} \cdot x_{ij}^{k} \qquad (1)$$

subject to:

$$\sum_{\substack{i\in V \\ i\neq j}} \sum_{k\in K} x_{ij}^{k} = 1 \qquad \forall j \in C \qquad (2)$$

$$\sum_{\substack{j\in V \\ j\neq i}} \sum_{k\in K} x_{ij}^{k} = 1 \qquad \forall i \in C \qquad (3)$$

$$\sum_{\substack{i\in V \\ i\neq j}} x_{ij}^{k} = \sum_{\substack{i\in V \\ j\neq i}} x_{ji}^{k} \qquad \forall j \in C, \forall k \in K \qquad (4)$$

$$u_i^k - q_i \leq u_j^k + Q(1 - x_{ij}^k) \qquad \forall i,j \in A : i \neq 0, \forall k \in K \qquad (5)$$

$$q_i \leq u_i^k \leq Q \qquad \forall i \in N, \forall k \in K \qquad (6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in A, \forall k \in K \qquad (7)$$

$$u_i^k \geq 0 \qquad \forall i \in N, \forall k \in K \qquad (8)$$

**실내 로봇 라우팅 최적화 모델은 Cattaruzza et al. (2016) 의 연구에 나온 VRPMT 모델을 참고*

05 실험 디자인 및 결과

- **실험 디자인**
  - 6층 짜리 건물로 시뮬레이션
  - 로봇 2대 운영, 고객 12명, 수요 20박스, 엘리베이터 1대

Table 2. 실험을 위한 고객 정보 데이터

Floor	Customer ID	Delivery demand
1	1	2
	2	2
2	3	1
	4	1
3	5	2
	6	2
	7	2
4	8	2
	9	2
5	10	1
	11	1
6	12	2
Sum		20

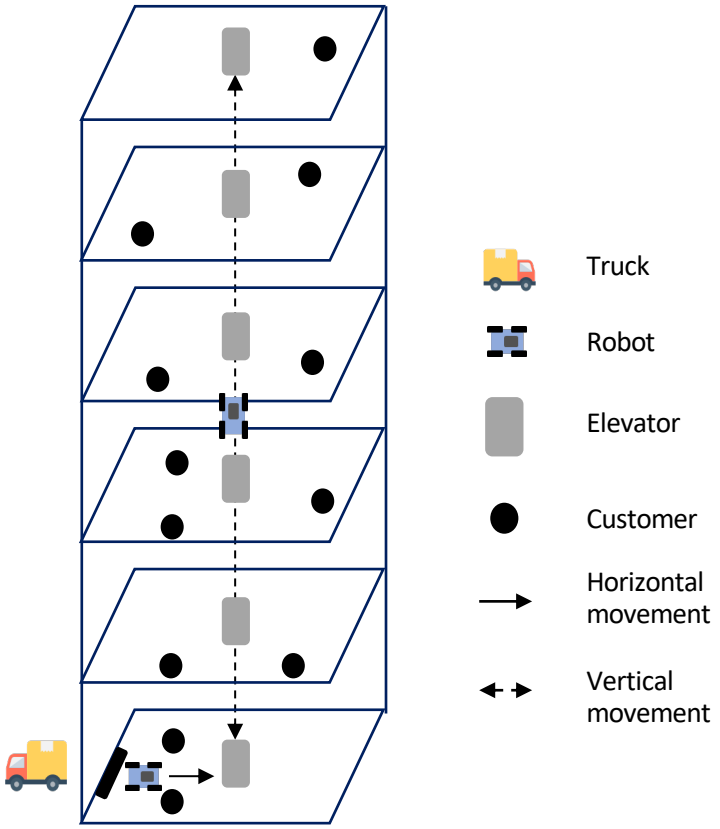


Figure 5. 실험을 위한 6층 건물 배송 네트워크

05 실험 디자인 및 결과

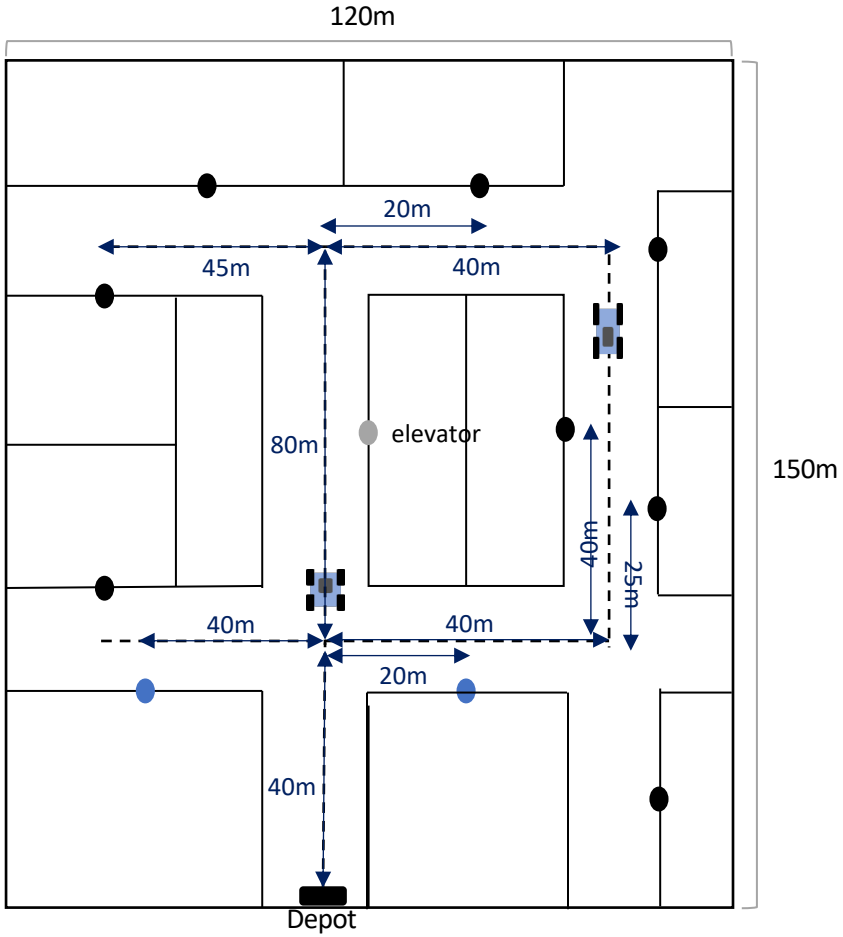


Figure 6. 건물 실내 레이아웃

05 실험 디자인 및 결과

- **실험 컴퓨터 사양 및 환경**
  - GUROBI Optimizer 9.0 (http://www.gurobi.com) with Python 3.7.1 on Intel® Core™ i5 3.10 GHz CPU and 8.00 GB RAM laptop

Table 3. 실험 결과

Robot #	# of Trips	Route of Each Trip
1	1	0 - 1 - 0
	2	0 - 2 - 0
	3	0 - 3 - 8 - 0
	4	0 - 6 - 0
	5	0 - 7 - 4 - 0
2	1	0 - 5 - 0
	2	0 - 9 - 10 - 0
	3	0 - 12 - 11 - 0
Objective value (unit: sec)		Realistic: 4561.4 (Ideal: 3180, 32% gap)
Computation time (unit: sec)		0.85

- 이상적인 상황을 가정하고 단순히 거리/속력으로 할 경우보다 1381.4 초 더 소요되지만 오히려 더 현실적이라고 기대
- 배송 도착 시간은 예상보다 빨리 도착하는 것보다 늦게 도착하는 경우가 더 큰 문제가 되므로 보수적으로 접근하는 것이 필요

06 결론 및 향후 연구방향

- **결론**
  - 다가오는 로봇 기반 라스트마일 딜리버리 시대를 위해 선제적인 연구 필요
  - 최종 목적지가 고층 건물의 실내인 경우 현실적인 로봇 이동 시간 추정과, 로봇 라우팅 최적화가 필요
  - 엘리베이터 이용과 같은 실내 공간의 특성과 가감속, 코너링과 같은 로봇의 이동 특성을 반영한 로봇 이동 시간 추정식을 개발하고 Vehicle Routing Problem with Multiple Trips 수리 모델 제안
  - 단순히 거리 나누기 속력으로 이동 시간을 추정했을 때 생길 수 있는 로봇 배터리 방전 문제와 배송 약속 시간 초과를 방지하는 로버스트한 추정이라 판단

- **향후 연구방향**
  - 현실적인 문제 상황 (더 많은 로봇, 더 많은 고객, 더 높은 층) 에서도 빠르게 해를 도출하는 휴리스틱 개발 후 검증 중
  - ROS/gazebo 와 같은 로봇 운영 시뮬레이터를 활용해서 제안된 로봇 이동 시간 추정식의 타당성 검증
  - 혼잡 (congestion)과 교착 (deadlock)을 고려한 라우팅 최적화 모델로 발전

참고문헌

1. Alshamaa, D., Chkeir, A., Mourad-Chehade, F., & Honeine, P. (2019, March). *Hidden markov model for indoor trajectory tracking of elderly people*. 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 1-6, Sophia Antipolis, France.
2. Azizi, M.R., Rastegarpanah, A., & Stolkin, R. (2021). Motion Planning and Control of an Omnidirectional Mobile Robot in Dynamic Environments. *Robotics,* 10(1):48.
3. Bishop, C. (2016). *Swiss Post trials robot parcel deliveries in Bern.* Retrieved from https://www.thelocal.ch/20160823/swiss-post-trials-robot-parcel-deliveries-in-bern/.
4. Boysen, N., Schwerdfeger, S., & Weidinger, F. (2018). Scheduling last mile deliveries with truck-based autonomous robots. *European Journal of Operational Research,* 271(3), 1085-1099.
5. Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2016). Vehicle routing problems with multiple trips. 4OR, 14 (3), 223–259. https://doi.org/10.1007/s10288-016-0306-2.
6. Chen, C., Demir, E., Huang, Y., & Qiu R. (2020). The adoption of self-driving delivery robots in last mile logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 146, 102214.
7. Chen, C., Demir, E., & Huang. Y. (2021). An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and delivery robots. *European Journal of Operational Research,* 294, 3, 1164-1180.
8. Daimler. (2017). *Vans & Robots. Small delivery robots out of the Sprinter.* Retrieved from https://www.mercedes-benz.com/en/vehicles/transporter/vans-robots-small-delivery-robots-out-of-the-sprinter/
9. Emeran, R. (2019). *Continental Unveils Robot Delivery Dog.* Retrieved from https://www.alphr.com/cars-0/1010379/continental-unveils-robot-delivery-dog/.
10. Figliozzi, M., Jennings, D. (2020). Autonomous delivery robots and their potential impacts on urban freight energy consumption and emissions. Transportation Research Procedia, 46, 21-28.
11. Lee, W., Kwag, S., & Ko, Y.D. (2020). Optimal capacity and operation design of a robot logistics system for the hotel industry. *Tourism Management,* 76,103971.
12. Mantha, B., Menassa, C., & Kamat, V. (2017). Task allocation and route planning for robotic service networks in indoor building environments. *Journal of Computing in Civil Engineering,* 31 (5) 04017038.
13. Mantha, B., Jung, M.K., B.G. de Soto, Menassa, C., & Kamat, V. (2020). Generalized task allocation and route planning for robots with multiple depots in indoor building environments. *Automation in Construction,* 119, 103359.
14. Savelsbergh, M., Woensel. T.V. (2016). 50th anniversary invited article city logistics: Challenges and opportunities. Transportation Science, 50(2), 579–590.
15. Simoni, M. D., Kutanoglu, E., & Claudel, C. G. (2020). Optimization and Analysis of a Robot-Assisted Last Mile Delivery System. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 142, 102049.
16. Shen, Y., Guo, D., Long, F., Mateos, L. A., Ding, H., Xiu, Z., Hellman, R. B., King, A., Chen, S., Zhang, C., & Tan, H. (2020). Robots under COVID-19 pandemic: A comprehensive survey. IEEE Access, 9, 1590-1615.
17. Yu, S., Puchinger, J., & Sun, S. (2020). Two-echelon urban deliveries using autonomous vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 141, 10218.

감사합니다.