

교착 상태 예측에 의한 AGV의 충돌 회피 알고리즘 개발

김중선*, 이호재**, 배기선*, 주영훈*, 박진배***
 군산대학교 전자정보공학부*, 인하대학교 전자공학과**, 연세대학교 전기전자공학과***

Collision and Avoidance Algorithm for AGV Using Prediction of Deadlock

Jong Seon Kim*, Ho Jae Lee**, Kee Sun Bae*, Young Hoon Joo*, Jin Bae Park***
 School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University*
 Department of Electronic Engineering, Inha University**
 Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University***

Abstract - 본 논문에서는 다수의 AGV를 운용하는 물류자동화창고에서 최단경로가 배정된 AGV의 주행중 발생하는 충돌 및 교착 상태를 예측하고 이를 회피하는 알고리즘을 개발하고자 한다. 충돌 및 교착 상태는 최단 경로와 경로 점유시간을 비교함으로써 예측하고 이를 경로 선입에 따른 우선권 및 지연시간에 따른 우선권에 따라 회피할 AGV를 선정함으로써 충돌 회피에 따른 AGV의 총 운행시간을 최소화 한다.

1. 서 론

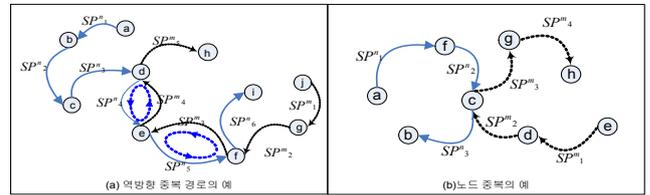
기존의 연구에서 AGV의 경로 배정 방법은 다수의 AGV들에 대한 경로 충돌을 고려하지 않은 최단 경로를 생성하여 AGV를 유도하는 도중 발생하는 교착 및 충돌의 상태를 Zone-Control 방식으로 관리한다[1]. Zone-Control은 작업 공간에서 서로 인접한 경로 및 교착 예상 구역으로 나눈 다음 이들에 대한 점유권을 오직 1개의 AGV로 제한함으로써 경로상의 충돌 문제를 해결한다. 그러나 이러한 방법은 다수의 경로를 갖는 대규모 시스템에서 동일 경로를 동시에 다른 방향에서 진입할 때 그 해결 방안이 매우 난해하다. 이를 최소화하고자 Rajotia는 강제적 경로 배정계획을 통해 예지 및 노드가 갖는 Time-Window에서 AGV의 교착을 예측하는 알고리즘을 제안하였다[2]. 또한, Moorthy는 장애물의 위치 및 교착을 예측하는 "Deadlock prediction algorithm"을 제안하였으며 이를 이용해 한 개의 zone에서 발생하는 교착 상태를 Occupied, Not occupied, Equal 3가지로 분류하고 교착 상태에 대한 해결 방안을 제시하였다[3]. 본 논문에서는 이전 연구 결과에서 보여준 AGV의 최단 경로 생성 알고리즘, 경로별 소요 시간 알고리즘을 이용하여 AGV의 최단 경로가 갖는 충돌 및 교착 상태를 예측한다.[4] 충돌 및 교착 상태의 예측은 최단 경로 및 경로 점유 진입 시간 및 경로 탈출 시간을 이용하여 중복된 경로를 찾고 역방향 여부를 확인한 뒤 역방향일 경우 AGV의 경로 점유 시간을 비교함으로써 충돌 및 교착 상태를 결정한다. 예측된 AGV들의 충돌 및 교착 상태는 회피를 위해 경로 점유 우선권을 할당하며 여기에 역방향 중복 경로에 선입하는 AGV에 할당하는 방법과 지연 시간을 고려한 할당 방법을 제안하여 AGV의 충돌 및 회피에 따른 지연 시간을 최소화한다.

2. 충돌 및 교착 상태 예측

최단 경로 탐색 알고리즘은 운행 중인 다 AGV의 경로 점유를 고려하지 않는다. 운행 중인 다 AGV의 경로를 포함한다는 것은 운행 중인 AGV 및 경로의 수 만큼 고려해야할 요소가 증가할 뿐만 아니라 그 계산 과정 역시 매우 복잡하기 때문이다. 따라서 탐색된 최단 경로는 다 AGV와의 충돌 및 교착 상태를 예측하고 이를 회피하는 알고리즘이 반드시 필요하다. Moorthy는 충돌 및 교착 상태의 구분을 Occupying, Equal 및 Not occupying 3가지로 나누었으며 Not occupying은 충돌 및 교착이 없는 안정된 최단경로로 분류하였다[3]. 본 연구에서도 이를 바탕으로 경로 충돌 및 교착을 구분하되 Not occupying은 제외한다. 경로 충돌 및 교착의 첫 번째로 아래 그림 1의 (a)와 같이 같은 경로는 역방향으로 점유하는 경우이다. ID가 m인 AGV는 최단 경로 SP^m를 갖으며 경로 간 노드(통제구역)는 a→b→c→d→e→f→i(실선 화살표 방향)와 같다. ID n인 AGV는 최단 경로 SPⁿ를 갖으며 경로 간 노드(통제구역)는 j→g→f→e→d→h(점선 화살표 방향)으로 m인 AGV와 d→e, e→f에서 각각 루프 관계를 갖고 있으며 AGV의 경로 중복을 의미한다.

그러나 역방향 관계만을 갖고 있다고 해서 이들 m, n AGV의 충돌을 단정 지을 수 없다. 즉, 이들 루프 관계에 있는 중복 경로의 진입 및 탈출 시간을 비교함으로써 같은 시간에 경로를 점유하는지를 반드시 알아야 한다. 중복된 경로의 진입 시간 및 탈출 시간은 AGV의 각 경로별 소요시간을 누적시킨 시간으로 ID n인 AGV의 중복 경로 진입 시간은

SP₁ⁿ부터 SP₃ⁿ까지 각 경로 소요시간을 더한 시간 $\sum_{i=1}^3 SP_i^n$ 이고, 탈출 시간은 SP₁ⁿ에서 SP₅ⁿ까지의 경로 소요시간을 더한 $\sum_{i=1}^5 SP_i^n$ 이다



<그림 1> 최단 경로가 갖는 노드 중복 및 역방향 중복 경로의 예

같은 방법으로 ID m인 AGV의 중복 경로 진입 및 탈출 시간은 각각 $\sum_{i=1}^2 SP_i^m$, $\sum_{i=1}^4 SP_i^m$ 이다. 이들 중복 경로의 진입 및 탈출 시간을 비교하였을 때 어느 하나의 시간이라도 진입 및 탈출 시간에 포함이 된다면 AGV의 충돌 및 교착 상태는 자명하다.

두 번째 충돌 및 교착은 노드를 동시에 점유할 경우이다. 여러 경로를 통해 목적지에 도착하는 AGV는 항상 노드에서 경로 변경을 하게 된다. 이때 AGV는 경로 변경 시 점유하는 노드에서 직진, 또는 회전을 하게 되는데 만약, 다른 AGV가 이 구간에서 경로 변경을 하고 있다면 해당 AGV와 충돌을 일으킬 수 있다. 그림 1의 (b)는 이러한 충돌 위험이 있는 노드를 나타낸 것으로 ID가 m인 AGV와 n인 AGV가 서로 다른 경로를 주행하지만 경로 변경 중인 노드 c에서 충돌을 일으킬 위험이 있다. 역방향 중복 경로에서 언급한 바와 마찬가지로 같은 시간에 AGV가 노드를 점유할 때에만 이러한 충돌 위험이 발생한다. 따라서 점유 시간을 그림 1의 (b) 예를 통해 찾아보면, ID가 n인 AGV의 c노드 진입 시간은 경로 SP₂ⁿ의 탈출 시간에서 통제구역의 거리 평균 주행 시간 $d/\gamma(t)$ 를 제외하면 되고 탈출 시간은 SP₂ⁿ에서 $d/\gamma(t)$ 를 더하면 된다.

c노드 진입 시간은 $\sum_{i=1}^2 (SP_i^n) - d/\gamma(t)$ 이고 탈출시간은 $\sum_{i=1}^2 (SP_i^n) + d/\gamma(t)$ 이다. 마찬가지로 ID가 m인 AGV의 c노드 진입 시간은 $\sum_{i=1}^3 (SP_i^m) - d/\gamma(t)$ 이며 탈출시간은 $\sum_{i=1}^3 (SP_i^m) + d/\gamma(t)$ 이다. 충돌 위험은 이들 ID m, n인 AGV가 진입 시간 및 탈출시간을 동시에 가질 때 발생한다.

이와 같이 상기에 분류한 두 가지 경우를 AGV의 최단 경로로부터 추출함으로써 AGV 상호간의 충돌 및 교착 상태를 예측한다.

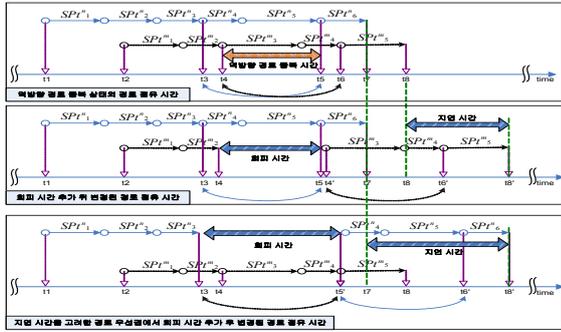
3. 충돌 및 교착 상태 해결 방안

3.1 역방향 중복 경로

역방향 중복 경로의 해결방안은 중복 경로를 먼저 진입한 AGV에게 경로 점유 우선권(FO : First Occupation)을 주고 진입 시간이 늦은 AGV에게 회피시간을 줌으로써 역방향 중복 경로를 주행 중인 AGV가 경로를 벗어 날 때까지 대기하는 것이다. 회피시간은 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\text{회피시간} : At_j^k \tag{1}$$

(여기서, k 는 해당 AGV의 ID, j 는 회피 횟수) 그림 2의 (b)는 그림 1의 (a)에서 보여준 역방향 중복 경로에 대해서 경로 선입에 따른 우선권 부여 후의 회피 시간을 나타낸 것이다. ID가 n 인 AGV의 작업 할당 시각이 t_1 일 때 역방향 중복 경로 진입 시각이 $t_3(= \sum_{i=1}^3 SPt_i^n)$ 이고 탈출 시각은 $t_5(= \sum_{i=1}^5 SPt_i^n)$ 이며, ID가 m 인 AGV는 작업 할당 시각이 t_2 일 때 역방향 중복 경로 진입 시각이 $t_4(= \sum_{i=1}^2 SPt_i^m)$, 탈출시각이 $t_6(= \sum_{i=1}^4 SPt_i^m)$ 이다. 선입에 따른 경로 점유 우선권은 At_j^m 가 작은 값이다.



〈그림 2〉 역방향 중복 경로의 충돌 및 교착 상태 및 해결방안

그림 2의 (a)에서 보듯이 $t_3 < t_4$ 이므로 FO 는 ID가 n 인 AGV가 할당 받으며 m AGV는 회피시간을 할당 받게 된다. 이때 회피 시간은 ID n 인 AGV가 중복경로를 탈출하는데 걸린 시간이며 ID m 인 AGV의 역방향 중복 경로 회피 시간은 다음과 계산된다. 또한, 그림 2의 (b)에서 보여주는 회피 횟수는 한 개이므로 $k=1$ 이다.

$$At_1^m = \left(\sum_{i=1}^5 SPt_i^n - \sum_{i=1}^3 SPt_i^n \right) \quad (2)$$

그러나 회피 시간 및 횟수에 따라 늘어나는 AGV의 지연시간은 운송 시스템의 성능에 많은 영향을 미친다. 이를테면, 1개의 AGV가 상기와 같은 회피시간을 수개만 갖더라도 해당 물류를 운송하는데 매우 많은 시간이 걸릴 것이다. 더욱이 조립 생산 시스템의 경우 늦어진 운송 물류 때문에 다른 물품을 생산 및 조립하지 못하는 연쇄효과가 나타나게 될 것이다. 따라서 역방향 중복 경로와 같은 문제의 해결은 단순히 경로의 선입여부 뿐만 아니라 회피 시간을 선택 받은 AGV가 지연시간을 포함한 물류의 총 운송 시간이 과도하게 지연되지 않도록 해야 한다. 즉, 한 개의 AGV에만 회피가 집중되는 것과 짧은 물류 운송 시간에 비해 너무 긴 회피 시간을 갖지 않도록 방지해야 한다. 따라서 경로 점유 우선권을 할당함에 있어서 본래 AGV의 총 운송 시간과 변경된 AGV의 총 운송 시간(지연 시간 포함)과의 관계를 고려해야 한다.

먼저, 지연시간 Dt 는 식 (3)과 같이 해당 AGV의 ID(k)와 회피 횟수(n) 및 시간의 총 합으로 표현하고 지연시간을 포함한 총 운송시간 SPT 는 식 (4)과 같이 표현한다.

$$Dt^k = \sum_{j=1}^n At_j^k \quad (3)$$

$$SPT^k = \sum_{j=1}^i SPt_j^k + Dt^k \quad (4)$$

(여기서, i 는 최단 경로의 경로 수)

그러나 지연 시간을 고려한 경로 점유 우선권은 회피 시간을 변화시킨다. 역방향 중복 경로에 선입한 AGV 할당하지 않을 경우 그림 2의 (c)와 같이 ID가 m 인 AGV가 중복 경로를 점유하는 시각 t_4 이지만 중복 경로에 선입하는 n AGV는 t_3 로 m AGV보다 빠르다. 때문에 n AGV는 m AGV가 역방향 중복 경로를 탈출하는 시각 t_6 까지 대기하여야 한다. n AGV의 회피 시간은 기존 회피 시간에 $t_3 \leftrightarrow t_4$ 와 $t_5 \leftrightarrow t_6$ 를 추가한 $t_3 \leftrightarrow t_6$ 이고, 이는 n AGV의 진입 시각부터 m AGV의 탈출 시각까지의 시간으로 식 (5)와 같이 다시 계산되어야 한다.

$$At_1^n = \left(\sum_{i=1}^4 SPt_i^m - \sum_{i=1}^3 SPt_i^m \right) \quad (5)$$

중복 경로 진입이 늦은 AGV에게 경로 점유 우선권을 할당했을 때 선입 AGV가 갖게 되는 회피 시간의 영향, 선입 AGV에게 경로 점유 우선권을 할당했을 때 진입이 늦은 AGV가 갖게 되는 회피 시간의 영향을 각 AGV가 갖고 있는 지연 시간과 총 운송 시간의 관계로 경로 점

유 우선권 할당을 재 표현 하면 식 (6)과 같다. 이를 이용하여 특정 AGV에 과도하게 할당 될 수 있는 회피시간을 방지 할 수 있다.

$$FO = \frac{Dt^k + At_j^k}{SPT^k} \quad (6)$$

(여기서, j 는 해당 회피 번호, k 는 해당 AGV의 ID)

3.2 노드 중복 경로

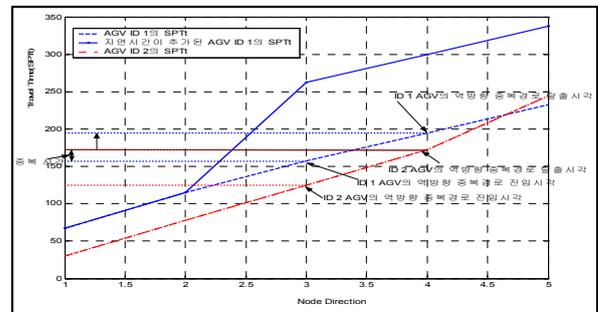
노드 중복 경로의 해결 방안은 역방향 중복 경로에서 선입 경로 점유 우선권을 적용하여 노드 점유를 할당되 지연 시간을 고려한 경로 점유 우선권은 적용하지 않는다. 왜냐하면 지연 시간을 고려한 경로 점유 우선권은 지연 시간 및 회피 시간이 많은 경우를 고려한 것이며 중복 노드의 경우 주행 속도 및 주행 거리에 비하여 매우 짧기 때문이다. 따라서 중복 노드의 경우 우선권은 항상 선입한 AGV에게 노드 점유 우선권이 할당되며 그렇지 않은 AGV에게는 회피 시간을 할당한다. 중복 노드에서 회피 시간 및 노드 우선권의 표현은 역방향 중복 경로의 표현을 따르며 회피 시간에 따른 해당 AGV의 지연 시간 및 총 운송 시간 역시 같은 표현을 따른다. 회피를 위해 대기해야 하는 AGV는 노드 진입 시각에서 통제구역을 주행하는 시간을 뺀 시각에서 선입 AGV가 중복 노드를 탈출하는 시각에 통제구역 주행 시간을 더한 시각까지 대기해야 한다.

3. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안한 충돌 및 교착 상태 예측 및 회피를 위해 표 1과 같은 최단 경로 및 경로 소요시간을 실험에 사용하며 경로 주행 시작 시각은 같다. 표1에서 ID가 1인 AGV와 ID가 2인 AGV는 17,16번 노드를 역방향으로 점유하고 있다. 그림 3은 상기의 AGV가 갖는 역방향 점유 노드를 나타내고 이러한 AGV의 역방향 중복 경로 입출 시각을 경로 소요 시간을 이용하여 예측 가능함을 보여주고 있다. 또한 그림 3에서 본 논문에서 제안한 AGV의 선입에 따른 FO 를 역방향 중복 경로 진입 시각이 느린 ID 1 AGV에게 할당함으로써 역방향 중복 경로로의 진입 시각이 지연된 것을 확인 할 수 있고 총 운행 시간이 증가한 것을 확인할 수 있다.

〈표 1〉역방향 중복경로를 포함하는 최단경로와 경로 소요시간

	최단 경로 SP	경로 소요시간(SPT)
ID 1	{11, 15, 16, 17, 18}	{67.5, 115.0, 157.5, 195.0, 232.50}
ID 2	{13, 12, 17, 16, 25}	{30.0, 77.5, 125.0, 172.5, 245.0}



〈그림 3〉 회피에 따른 경로 소요 시간 변화

이와 같이 본 논문에서 제안한 방법으로 최단 경로가 갖고 있는 AGV 간의 충돌 및 교착 상태를 예측할 수 있었으며 예측된 충돌 및 교착 상태 역시 본 논문에서 제안한 선입 및 지연 시간에 따른 FO 를 할당하여 AGV의 총 운행 시간을 최소화 할 수 있음을 증명하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Le-Anh T, Koster MBMD. "A review of design and control of automated guided vehicle system". Eur J Oper Res 2006;171:1 - 23.
 [2] Rajotia S, Shanker K, Batra JL. "A semi-dynamic time window constrained routing strategy in an AGV system". Int J Prod Res 1998;36(1):35 - 50.
 [3] Moorthy RL, Guan WH, Cheong NW, Piau TC. "Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system". Int J Prod Econ 2003;83:309 - 24.
 [4] 김중선, 주영훈. "작업환경 모델 기반 AGV의 최단 경로 탐색 알고리즘". 퍼지 및 지능시스템 학회 논문지 2007, Vol. 17, No. 5. pp.654-659