

자동화 컨테이너 터미널의 AGV 교통흐름 동적 최적화

(Dynamic Optimization of the Traffic Flow of AGVs in an Automated Container Terminal)

김 후 립[†] 최 이[†]
(Hoolim Kim) (Ri Choe)

박 태 진[†] 류 광 렬^{**}
(Taejin Park) (Kwang Ryel Ryu)

요 약 본 논문에서는 자동화 컨테이너 터미널에서 컨테이너를 운반하는데 사용되는 무인 운반 차량(AGV)의 교통흐름을 동적으로 최적화하는 방안을 제안한다. 터미널 환경은 다수의 차량이 한정된 영역 내에서 주행하므로 높은 생산성을 위해서는 차량 사이의 간섭 및 병목현상을 최소화하도록 교통흐름을 제어해야 한다. 제안 알고리즘은 터미널 환경의 동적 변화에 대응하여 유전알고리즘을 이용하여 AGV의 교통흐름을 최적화한다. 알고리즘의 속도향상을 위해 이전에 수행한 최적화 결과를 활용하는 방안이 시도되었다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안 알고리즘의 성능을 확인하였다.

키워드 : AGV, 자동화 컨테이너 터미널, 교통흐름 조정, 동적 최적화

Abstract In this paper, a method that dynamically

· 이 논문은 2009년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임(지역 거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)
· 이 논문은 제36회 추계학술발표회에서 '자동화 컨테이너 터미널의 AGV 교통흐름 동적 최적화'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 학생회원 : 부산대학교 컴퓨터공학과
limysarang@pusan.ac.kr
choilee@pusan.ac.kr
parktj@pusan.ac.kr

^{**} 종신회원 : 부산대학교 컴퓨터공학과 교수
krryu@pusan.ac.kr

논문접수 : 2009년 12월 17일
심사완료 : 2010년 2월 11일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨터의 실제 및 테더 제16권 제5호(2010.5)

adapts the traffic flow of automated guided vehicles (AGVs) used in automated container terminals to the changing operational condition is presented. In a container terminal, the AGVs are vulnerable to traffic congestion because a large number of AGVs operate in a limited area. In addition, dynamically changing operational condition requires the traffic flow of AGVs to be continuously adjusted to keep up with the change. The proposed method utilizes a genetic algorithm to optimize the traffic flow. Exploiting the dynamic nature of the problem an approach that reuses the results of the previous search is tried to speed up the convergence of the genetic algorithm. The results of simulation experiments show the efficiency of the proposed method.

Key words : AGV, Automated Container Terminal, Traffic Flow Control, Dynamic Optimization

1. 서 론

무인운반차량(Automated Guided Vehicle: AGV)은 공장, 컨테이너 터미널 등 다양한 분야에서 물자의 운반을 위해 사용되고 있다. AGV의 효율적인 운영을 위해 다양한 연구가 진행되었는데[1], 특히, AGV의 효율적인 주행을 위한 연구로 효율적인 유도경로(guide path)를 설계하는 방안[2-6], 유도경로망(guide path network) 상에서 목적지까지 최적 경로를 찾는 방안에 대한 연구가 있다[7-10]. 그러나 전통적으로 이와 같은 연구는 공장에서 사용되는 AGV를 대상으로 주로 수행되어 왔다.

컨테이너 터미널 환경은 다수(70대 가량) 차량이 한정된 영역 내에서 주행하기 때문에 차량 사이의 간섭이 빈번하여 교통정체가 발생하기 쉽다. 게다가, 선박의 하역 작업이 진행됨에 따라 선박에 컨테이너를 실는 안벽 크레인(Quay Crane: QC)이 이동하는데, 그 때문에 AGV의 주행 환경 조건이 변한다. 이처럼 동적으로 변화하는 환경에 대한 연구로 공장 환경에서 작업 물량과 운반 패턴(flow pattern) 변화에 대응하여 새로운 경로망을 짧은 시간에 설계하는 방안이 연구되었다[6]. 그러나 컨테이너 터미널에서는 컨테이너 운반 물량과 패턴의 변화뿐 아니라 유도경로망의 형태도 변한다는 차이점이 있다.

본 논문에서는 컨테이너 터미널에서 사용하는 AGV를 대상으로 주행 환경 조건 변화에 대응하여 AGV의 교통 흐름을 동적으로 최적화하는 방안을 제안한다. 제안 방안은 AGV의 주행 경로를 설정할 때 선택할 수 있는 유도경로의 범위를 제한함으로써 AGV의 교통흐름을 제어한다. 환경 조건에 변화가 생길 때 마다 유전 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 이용해 새로운 유도경로 조합을 찾는다.

다음 장에서는 자동화 컨테이너 터미널을 소개한다. 3 장에서는 AGV의 주행경로 설정 및 교통흐름 조정 문제를 설명한다. 4장과 5장은 교통흐름 동적 조정 알고리즘과 탐색 속도 향상을 위해 이전 탐색정보를 활용하는 방법을 각각 소개한다. 제안 방안의 효율 검증을 위한 실험 및 결과는 6장에서 다루며, 7장에서 결론을 맺는다.

2. 자동화 컨테이너 터미널

자동화 컨테이너 터미널의 해측 영역은 크게 안벽(quay)과 장치장(stacking yard)으로 구분한다(그림 1). 안벽에는 QC가 위치하여 선박으로부터 컨테이너를 내리고 실는다. 장치장은 수입 또는 수출 컨테이너를 보관하는 장소이다. 장치장은 여러 개의 블록으로 구성되며, 각 블록에는 자동화 장치장 크레인(Automated Stacking Crane: ASC)이 배치된다. 안벽과 장치장 사이의 컨테이너 이동은 AGV를 이용하는데, 자가 적재 기능 여부에 따라 두 종류로 구분된다. 자가 적재능력이 있는 종류를 ALV(automated lifting vehicle)로 칭하기도 하는데[10], 본 논문은 특히 ALV를 대상으로 한다. QC의 아래와 장치장 블록의 해측 끝에는 컨테이너 교환을 위한 TP(transfer point)가 위치한다.

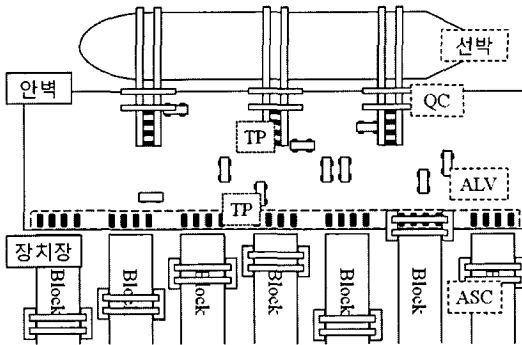


그림 1 자동화 컨테이너 터미널

3. AGV의 교통흐름 통제

AGV는 주어진 유도경로망에서 목적지까지의 주행 경로(route)를 선택하고 그 위를 따라 주행한다. 그림 2는 본 논문에서 대상으로 하는 크로스레인 경로망(cross-lane path network)를 보여준다. 크로스레인 경로망은 QC레인, 블록레인, 크로스레인, TP레인으로 구성된다. 차량의 주행경로는 이들의 조합으로 결정되는데, QC레인과 TP레인은 차량의 출발지점과 목적지에 의해 이미 결정되므로 주행경로의 형태는 크로스레인과 블록레인의 선택에 좌우된다. 특히, 크로스레인은 블록레인에 비해 선택의 폭이 넓기 때문에 크로스레인의 선택에 따라

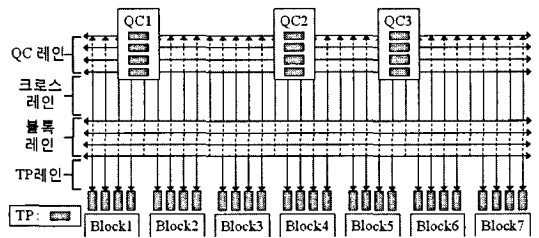


그림 2 크로스레인(cross-lane) 유도경로망

주행경로의 전체 형태가 크게 달라진다.

컨테이너 선적 시, QC는 한 위치에서 작업을 완료하면 다음 작업 위치로 이동한다. AGV가 QC TP로 진입하거나 TP로부터 나오기 위해서는 최소한의 회전반경이 필요하며, 따라서 이 회전반경 내에 있는 크로스레인은 해당 QC로 진입하거나 빠져 나오기 위해 사용할 수 없다. 이 때문에 QC의 이동은 사용 가능한 크로스레인의 변화를 초래한다. 또한, QC가 이동하면 새로운 컨테이너를 대상으로 작업을 수행하며 AGV에 컨테이너 운반 요청을 한다. 이는 AGV의 교통량을 변화시켜 AGV의 교통흐름에 변화를 일으킨다. AGV의 생산성을 최대화하기 위해서는 이와 같은 변화에 대응하여 차량의 주행거리를 줄이고 병목 현상이 생기지 않도록 차량의 교통흐름을 최적화해야 한다.

4. 교통흐름 동적 조정 알고리즘

본 논문에서 제안하는 교통흐름 동적 조정 알고리즘은 QC가 이동할 때마다 QC의 TP로 진입할 때 선택 가능한 크로스레인(Entering Lane: EL)과 QC TP에서 나올 때 선택 가능한 크로스레인(Exiting Lane: XL)의 할당을 조정함으로써 교통흐름을 제어한다. 표 1에 정의된 표기를 이용하여 표현하면, 모든 QC $q(\in Q)$ 에 대해, EL의 집합 E_q 와 XL의 집합 X_q 를 결정하는 문제로 정의할 수 있다. 집합 E_q 와 X_q 를 길이가 $|L|$ 인 이진변수(binary variable) $e_{i,q}$ 의 배열과 $x_{i,q}$ 의 배열로 각각 표현한다면 해 하나는 그림 3과 같이 길이가 $2 \times m \times n$ 인 ($|Q|=m, |L|=n$ 일 때) 이진 문자열로 나타낼 수 있다.

크로스레인의 할당 조합은 유전알고리즘(Genetic Algo-

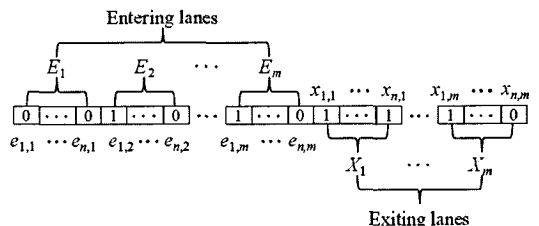


그림 3 대상문제의 해의 예

rithm: GA)를 이용하여 탐색한다[11]. 탐색 중 해의 평가는 네 가지 평가 지표(evaluation criteria)를 이용한다. 네 평가 지표는 각각 0과 1사이 값으로 정규화되며, 식 (1)과 같이 가중합을 통해 취합된다. GA는 $f(s)$ 의 값을 최소화하는 할당 조합을 탐색한다.

$$f(s) = w_1 \cdot (1 - N(m_1)) + w_2 \cdot N(m_2) + w_3 \cdot N(m_3) + w_4 \cdot N(m_4) \quad (1)$$

평가 지표 m_1 은 주행경로 설정 시 크로스레인 선택의 폭을 나타내며, 식 (2)를 사용하여 계산한다.

$$m_1 = \sum_{l \in L, q \in Q} (e_{l,q} + x_{l,q}) \quad (2)$$

두 번째 평가 지표 m_2 는 교통흐름의 집중도를 나타낸다. AGV의 교통흐름이 고르게 분산되도록 크로스레인을 할당하기 위한 것으로, 식 (3)과 같이 각 크로스레인의 사용률(usage rate)(식 (4))의 표준편차로 계산한다. 교통흐름이 고르게 분포할수록 m_2 의 값이 작아진다.

$$m_2 = \sqrt{\frac{1}{|L|} \sum_{l \in L} (u_l - \bar{u})^2} \quad (3)$$

$$u_l = \sum_{q \in Q} \left(\frac{e_{l,q}}{|E_q|} + \frac{x_{l,q}}{|X_q|} \right) \quad (4)$$

세 번째로 m_3 는 AGV의 기대 주행 거리를 나타내며 식 (5)를 이용하여 계산한다.

$$m_3 = \sum_{j \in J, l \in E_{q_j}} \frac{D(q_j, l) + D(b_j, l)}{|E_{q_j}|} + \sum_{j \in J, l \in X_{q_j}} \frac{D(q_j, l) + D(b_j, l)}{|X_{q_j}|} \quad (5)$$

마지막으로 m_4 는 AGV가 목적 QC가 아닌 다른 QC 아래를 지나가는 빈도의 기대치를 나타내며 식 (6)을 이용하여 계산한다. AGV가 대상 QC가 아닌 QC 아래를 지나면 그 QC의 작업을 방해할 수 있으므로 m_4 를 최소화해야 한다.

$$m_4 = \sum_{j \in J, l \in E_{q_j}} \frac{P(q_j, l)}{|E_{q_j}|} + \sum_{j \in J, l \in X_{q_j}} \frac{P(q_j, l)}{|X_{q_j}|} \quad (6)$$

5. 이전 탐색정보 활용을 통한 탐색 속도 향상

대상 문제와 같이 동적으로 변화하는 환경에서 반복적으로 탐색을 수행하는 경우, 탐색속도를 향상시키는 대안 중 하나로 이전에 수행한 탐색에서 얻은 정보를 활용하는 방법이 있다. QC가 이동하면 사용 가능한 크로스레인과 작업 대상 컨테이너는 변하지만, 이러한 변화는 이동한 QC에 대해서만 국지적으로 발생한다. 따라서 이전 탐색에서 좋았던 해는 현재에도 비교적 좋은 해일 가능성이 높으며 이 해들을 이용하여 현재 탐색의

표 1 기호 표기

표기	설명
Q	QC의 집합
L	사용 가능한 크로스레인의 집합
E_q	QC $_q$ 에 할당된 EL의 집합
X_q	QC $_q$ 에 할당된 XL의 집합
$e_{l,q}$	크로스레인 l 이 QC q 의 EL로 할당되었는지 나타내는 결정변수. 할당되면 1, 아니면 0
$x_{l,q}$	크로스레인 l 이 QC q 의 XL로 할당되었는지 나타내는 결정변수. 할당되면 1, 아니면 0
$f(s)$	주어진 해 s 의 평가함수
$ X $	주어진 집합 X 의 크기
$N(x)$	변수 x 에 대한 정규화 함수(0과 1사이의 값으로 정규화)
u_l	경로 할당 시 크로스레인 l 의 사용빈도
\bar{u}	모든 $l (\in Q)$ 에 대한 u_l 의 평균값
J_L	아직 처리되지 않은 적하 작업의 집합
J_D	아직 처리되지 양하 작업의 집합
q_j	작업 $j (\in J_L \cup J_D)$ 를 위해 할당된 QC
b_j	작업 $j (\in J_L \cup J_D)$ 를 위해 할당된 블록
$D(x, y)$	두 위치 x, y 사이의 맨해튼(Manhattan) 거리
$P(x, y)$	두 위치 x, y 사이에 존재하는 QC의 수

초기 개체군(population)을 구성한다면 GA의 수렴속도를 가속할 수 있을 것이다.

이전 탐색의 해를 이용하여 초기 개체군을 구성하는 방법은 다음과 같다. GA의 개체군의 크기가 n 일 때, 이전 탐색의 마지막 세대의 개체군에서 평가치 $f(s)$ 가 낮은 순으로 k 개의 해를 선택하고 $n-k$ 개의 무작위로 생성한 해와 함께 초기 개체군을 구성한다. 단, QC 이동으로 인해 사용 가능한 크로스레인이 변경되므로 이를 이전 탐색 해에 반영해야 한다. QC 이동에 의해 사용 불가능해진 크로스레인들의 집합을 L_U , 새롭게 사용 가능해진 크로스레인들의 집합을 L_A 라 가정할 때, 모든 QC $q (\in Q)$ 에 대해, 모든 $e_{u,q}, x_{u,q} (u \in L_U)$ 를 해에서 제거하고, 모든 $e_{a,q}, x_{a,q} (a \in L_A)$ 를 해에 추가한다. 이 때, $e_{a,q}, x_{a,q}$ 의 값은 0과 1중에서 무작위로 정한다.

6. 실험 및 결과 분석

제안방안의 효과는 시뮬레이션 실험을 통해 검증하였다. 대상 컨테이너 터미널에는 한 선석, QC 3기, 7개 블록, ASC 14기가 있으며 ALV를 사용하는 것으로 가정하였다. 유도경로망에는 크로스레인이 총 49개가 있다. 주행경로 설정 및 주행 중 충돌 및 교착(deadlock) 방지는 기존연구[10]에서 제안된 방안을 사용하였다. 기존연구[10]의 방안은 주행경로 설정 시 차량 사이의 간섭을 고려하여 추정된 주행시간이 가장 짧은 경로를 선택한다. 총 450개(적하:150개, 양하:300개)의 컨테이너 운반 작업을 시뮬레이션 하여 QC의 총 작업 소요시간

(makespan)을 측정하였다. 비교 방안 별로 시뮬레이션을 50회 반복 수행하여 결과를 평균하였다.

제안방안에서 GA는 다음과 같이 설정하였다. 개체군 크기는 100, 부모선택(parent selection)은 토너먼트 선택(tournament selection), 교차(crossover)방안은 일점 교차(one-point crossover) 방법을 사용하였다. 돌연변이(mutation)는 각 유전자(gene)마다 1/(해의 길이)의 확률로 비트플립(bit flip)하여 발생시킨다. 해의 평가는 식 (1)을 이용하였으며 각 평가지표의 가중치는 모두 1로 설정하였다.

첫 번째 실험은 QC의 이동에 대응하여 동적으로 교통흐름을 조정하는 방안의 효과를 검증하기 위한 것이다. 제안 알고리즘 외에 두 가지 비교방안과 성능을 비교하였다. 비교방안 1은 각 QC 별로 QC에서 가까운 순으로 정해진 수의 크로스레인을 할당하는 방안이다. 각 QC의 오른쪽으로 K_E 개 크로스레인들이 EL에 할당하고, QC의 왼쪽으로 K_X 개 크로스레인들은 XL에 할당한다. 실험에서는 K_E 와 K_X 의 값을 각각 9로 설정하였다. 비교방안 2는 각 QC의 EL과 XL에 사용 가능한 모든 크로스레인을 할당하는 방안이다. 비교방안 2에서는 교통흐름은 주행경로 설정 알고리즘에 의해 결정되며 이는 경로 설정 알고리즘만으로 교통흐름의 효율적인 통제가 가능한지 확인하기 위함이다.

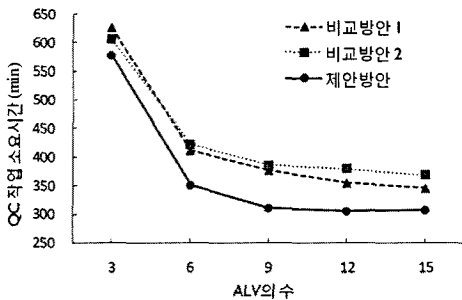


그림 4 교통흐름 조정 방안에 따른 QC 작업 소요시간 비교

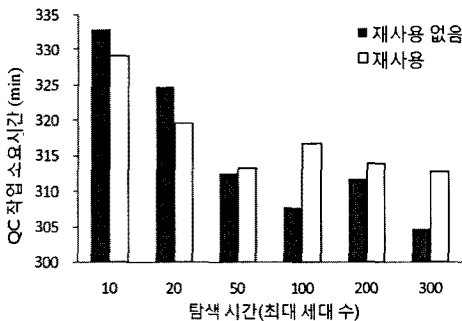


그림 5 이전 탐색 정보의 재활용 여부에 따른 QC 작업 소요시간 비교

그림 4는 ALV 수를 3, 6, 9, 12, 15대로 바꾸어가면서 QC의 작업 소요시간을 측정한 결과를 보여준다. 제안 방안이 가장 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다. 비교방안 2가 가장 나쁜 성능을 보이는데, 이를 통해 개별 차량에 최단 시간 경로를 설정하는 것만으로 교통흐름을 효율적으로 제어할 수 없음을 알 수 있다.

두 번째 실험은 5장에서 설명한 이전 탐색 정보 활용을 통한 GA의 탐색 성능 개선 효과를 검증하기 위한 것이다. 이전 탐색 정보를 활용하는 방안(재사용)과 그렇지 않은 방안(재사용 없음)의 QC 작업 소요시간을 비교하였다. 재사용 방안은 이전 탐색의 해 중에서 평가치(식 (1))가 낮은 순으로 100개를 선택하여 초기 개체군 설정에 이용하였다. 두 방안 모두 차량의 수는 12대로 설정하였으며 탐색에 허용되는 최대 세대 수를 변경해가며 실험하였다. 그림 5는 QC 작업 소요시간을 측정한 결과를 보여준다. 최대 세대 수가 10, 20으로 작을 때에는(즉, 탐색에 주어진 시간이 짧을 때) 재사용 방안의 성능이 더 좋은 것으로 보아 이전 탐색 정보가 알고리즘의 수렴속도를 가속하는 효과가 있음을 알 수 있다. 하지만 최대 세대 수가 50세대 이상일 때에는 오히려 성능이 나빠지는데, 이는 이전 탐색의 해는 이전 탐색에서 이미 수렴된 상태이므로 이들을 이용하여 초기화한 개체군은 무작위로 생성한 개체군에 비해 다양성이 떨어지는 경향이 있기 때문이다. 이러한 다양성 감소는 탐색 알고리즘이 지역 최적해(local optimum)에서 탈출하기 어렵게 만들어 때문에 탐색 시간이 길 때 탐색 효율이 감소하는 원인으로 추측된다.

7. 결론

본 논문에서는 자동화 컨테이너 터미널에서 컨테이너 운반 차량의 교통흐름을 동적으로 조정 하는 방안을 제안 하였다. 시뮬레이션을 이용한 비교 실험을 통해 교통흐름을 능동적으로 조정하는 방안이 더 좋은 성능을 보임을 확인하였다. 또한 이전에 수행한 탐색 정보를 재활용하여 GA의 수렴속도를 높이는 방안을 시도하였다. 실험 결과, 탐색에 주어진 시간이 짧은 경우에는 성능 개선을 보였으나 탐색 시간이 길 때는 오히려 성능이 떨어지는 현상을 보였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 이전 탐색 정보를 활용하여 초기화한 개체군의 다양성(diversity) 유지를 위한 추가 연구가 필요하다.

또 다른 주요 연구 주제로는 탐색 중 해 평가를 위한 평가 지표의 가중치 설정 문제가 있다. 실험에서는 가중치를 모두 1로 설정하였으나 이들 가중치의 값은 알고리즘 성능에 중대한 영향을 미치므로 최적 가중치를 설정하는 방안에 대한 연구가 향후 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] I. F. A. Vis, "Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 170, pp.677-709, 2004.
- [2] P. J. Egbelu, and J. M. A. Tanchoco, "Potentials for bi-directional guide-path for automated guided vehicle based systems," *International Journal of Production Research*, vol.24, no.5, pp.1075-1097, 1986.
- [3] R. J. Gaskins, and J. M. A. Tanchoco, "Flow path design for automated guided vehicle systems," *International Journal of Production Research*, vol.25, no.5, pp.667-676, 1987.
- [4] S. Rajotia, K. Shanker, and J. L. Batra, "An heuristic for configuring a mixed uni/bidirectional flow path for an AGV system," *International Journal of Production Research*, vol.36, no.7, pp.1779-1799, 1998.
- [5] J. M. A. Tanchoco, and D. Sinriech, "OSL-optimal single-loop guide paths for AGVS," *International Journal of Production Research*, vol.30, no.3, pp.665-681, 1992.
- [6] K. C. Ko, and P. J. Egbelu, "Unidirectional AGV guidepath network design: A heuristic algorithm," *International journal of Production Research*, vol. 41, pp.2325-2343, 2003.
- [7] R. H. Möhring, E. Köhler, E. Gawrilow, and B. Stenzel, "Conflict-free real-time AGV routing," *Operation Research Proceedings: part 1*, pp.18-24, 2004.
- [8] C. W. Kim, and J. M. A. Tanchoco, "Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routing," *International Journal of Production Research*, vol.29, no.12, pp.2377-2393, 1991.
- [9] S. Rajotia, K. Shanker, and J. L. Batra, "A Semi-dynamic Time Window Constrained Routing Strategy in an AGV System," *International Journal of Production Research*, vol.36, no.1, pp.33-50, 1998.
- [10] H. Y. Bae, R. Choe, T. J. Park, and K. R. Ryu, "Comparison of Operations of AGVs and ALVs in an Automated Container Terminal," *International Journal of Intelligent Manufacturing*, in press.
- [11] M. Mitchell, "An Introduction to Genetic Algorithms," *MIT Press*, Cambridge: MIT, 1996.