

무인경운을 위한 농작업 경로계획

Path Planning for Unmanned Tillage of Tractor

김상철*	이용범*	한길수*	임동혁*	최흥기*	박우풍*	이운용**
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
S.C.Kim	Y.B.Lee	K.S.Han	D.H.Im	H.G.Choi	W.P.Park	W.Y.Lee

1. 서론

무인경운은 사람이 운전하며 작업하는 것에 비해 작업 능률이나 작업 시간의 제약 측면에서 많은 장점을 가지고 있으나 농작업의 특수성과 지리적 환경을 고려한 적절한 경로계획이 필요하다. 경로계획을 하는 데는 크게 on-line path planning과 off-line path planning의 2가지 범주로 나누어 접근하는 것이 문제 해결을 보다 쉽게 한다. on-line path planning은 센서로부터 측정된 실시간 측정 자료와 로봇 DB(Data Base)로부터 주행과 작업에 필요한 데이터를 처리하여 실시간 경로를 생성하는 방법으로 경로가 복잡하고 변화가 심한 지형이나 센서 기반의 장애물 회피에 적합하며, off-line path planning은 차량이 움직이기전 이미 확보된 지리정보와 작업 DB로부터 목표점 지정에 의한 고정경로의 설정이나 최적화, 또는 지리좌표를 기반으로 일정 구역안에서 반복되는 연속경로의 생성에 적합한 방법이다.

Carnegie Mellon대학의 Stentz('93)등은 센서로부터 작성된 디지털 맵을 통해 실시간 경로계획이 가능한 차량 로봇 NavLab II의 개발과정에서 on-line path planning의 연구를 수행하였다. 전역 경로를 작은 세그먼트 단위로 나누어 현재 지점으로부터 장애물, 주행효율 등을 고려하여 다음 목표점을 선택한 후 경로 커브를 계산한다. Rowe and Alexander ('00) 디지털 맵으로부터 구획 분할에 의한 최적경로를 찾는 Off-line path planning을 시험 하였다. 일본의 Torisu 등(1998)은 수도작 작업에서 트랙터의 최단선회모형에 대해 고찰하였으며 Matsuo 등(1998)은 포장전체에 대한 농작업 경로계획과 추종방법에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 그들이 제안한 경로생성 방법은 대부분 인접 작업열을 순차적으로 왕복하면서 작업하는 방식을 바탕으로 하고 있어 최적화된 경로계획이라 할 수 없다. 생연기구의 Youkumoto('02)등은 경로교시에 의한 포장의 입력과 이를 바탕으로한 무인경운을 위한 경로 계획 알고리즘을 개발하였다.

이 연구에서는 장변 100m, 단변40~60m크기의 비교적 작은 규모의 사각형 포장을 대상으로 했으며 우리나라 경지정리된 대부분의 농지가 이 구획크기의 범주에 포함된다 할 수

* 농촌진흥청 농업공학 연구소

** 농촌진흥청 한국농업전문학교

있다. 경지 규모가 작기 때문에 선회나 다음 작업열로 이동하기 위한 공주거리는 작업 능력에 큰 영향을 미친다. 따라서 이 연구는 선회가 많은 소규모 포장에서 지리적 좌표를 기반으로 컴퓨터가 생성할 수 있는 최적의 경로와 작업순서를 결정하는 알고리즘을 개발하고, 경험과 감각에 의해 경운작업을 수행하는 트랙터 운전자와의 작업케적 비교를 통해 알고리즘의 유용성을 평가하고자 했다.

2. 재료 및 방법

가. 경로생성을 위한 지적자료

Off-line path planning은 트랙터가 주행이나 작업을 시작하기 전에 이미 가지고 있는 데이터를 처리하여 경로를 생성하는 방식이다. 현재 경지 정리 지역에 대한 지적도 전자지도화 가능성 분석하였다. 기계화에 적합하도록 조성된 경지정리지역에 대하여 1/500 지적도가 부분적으로 제작되었으나 지도 이용의 효율성 때문에 1/1,200으로 제작되었다. 1/1,200으로 제작된 지적도는 포장과 포장의 경계가 분명하지 않는 등 무인항법을 위한 지도로의 이용하기 위해서는 정밀 DGPS(RT2등)에 의한 좌표의 재지정 등 일련의 보정과정이 필요한 것으로 나타났다.

지적도를 디지털화하여 이용하는 것은 대부분 디지털자 자체의 해상도는 50 μ m이지만 디지털자에 의해 측정된 x/y 좌표의 실질 해상도는 도면의 신축, 작업자의 측정표지 조작에 따른 오차가 발생할 수 있고 지도상의 점 및 선에 대한 수동 디지털이정 최종 정확도(RMSE) : $\pm 0.1 \sim 0.25$ mm로 축척 1/1,200 도면의 경우 0.12~0.3m, 축척 1/5,000 도면의 경우 0.5~1.25m로 지상오차 생길수 있다.

따라서 이 연구에서는 DGPS(RT2등)에 의해 직접 측정된 경위도 좌표를 바탕으로 거리를 연산해 작업경로를 생성하도록 하였다.

나. 경로탐색의 기본방향

그림 1은 일반적인 사각형 모양의 포장에서 농작업을 수행하는 트랙터의 작업케적을 나타내고 있다. 총 농작업경로(L)는 회행작업구간(L_{ro})과 왕복작업구간(L_{re})으로 크게 나눌 수 있으며 이 외에도 출입지점에서 작업시작점까지 이동경로(L₁), 왕복작업-회행작업 전환경로(L₂), 모서리 회전경로(L₃), 작업후 출입지점까지의 이동경로(L₄)가 포함된다. 농작업을 수행하는 동안에 트랙터의 작업속도는 거의 일정하므로 여러 가지의 이동경로를 합한 총 농작업경로의 길이가 가장 짧아지는 것이 경로계획의 목적함수가 된다. 회행작업구간과 왕복작업구간의 경로가 결정되면 나머지 경로의 케적과 길이는 단순계산으로 구해지므로 결국 목적함수는 식 1로 표현된다.

$$\text{Minimize}(L) = \text{Minimize}(L_{ro} + L_{re} + L_1 + L_2 + L_3 + L_4)$$

$$= \text{Minimize}(L_{ro} + L_{re}) + \text{Summation}(the\ others) \quad (\text{식 } 1)$$

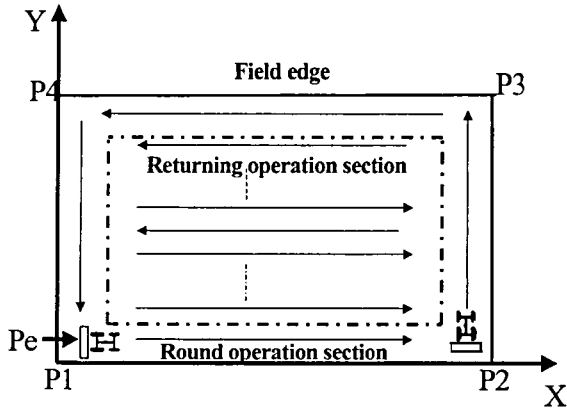


Fig. 1 Rectangle geometry of a paddy field and farm operation trajectory.

$$A = (x_0 + x_1)/2 - (x_4 + x_5)/2 - 3w + 4\Delta w \quad (1)$$

변수 A에 대하여 최소작업 중복폭 Δw 를 고려해서 왕복행정수 n과 작업피치 Δd 를 산출하면

$$n = A/(w - \Delta w) + 1 \quad (2)$$

단 n은 소수부분을 제외한 정수로 함

$$\Delta d = A/n \quad (3)$$

따라서 j행정의 y축 방향의 목표경로 rd(j)는 Δd 를 이용해서 (4)식에서 표시되어진다

$$rd(j) = (x_0 + x_1)/2 - 2w + 2\Delta w - j\Delta d \quad (0 \leq j < n) \quad (4)$$

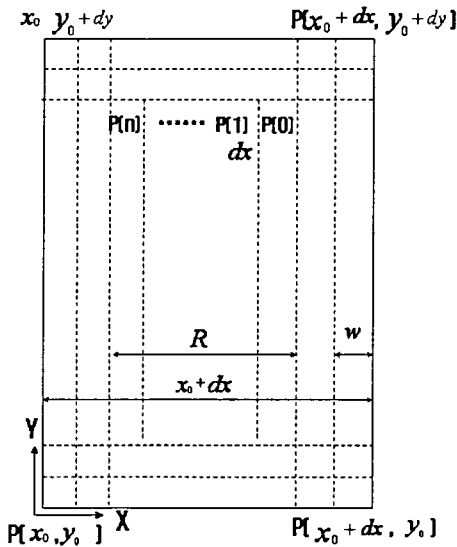


Fig.2 Creation method of the traveling paths on the switch-back operation and the transference paths without tilling

다. 경로생성

(1) 왕복경운 영역

Yukumoto('01)등이 제안한 작업계획법을 적용하였다. 왕복경운영역의 작업 계획은 그림 2에 표시한 것과 같이 왕복경운작업의 시작위치에서부터 경로를 생성한다. 회전경운시의 설정한 중복작업폭을 Δw 으로 하면 회행 경운법에 의한 작업영역을 제외한 왕복경운영역의 작업폭 A는

(1)식에 의해서 기술되어진다.

왕복경운 폭

$$R = dx - 3w + 4\Delta w$$

왕복경운의 경로수

$$n = dx/(w - \Delta w) + 1$$

왕복경운 시작 (PTO ON, 리프트 하강)

$$P_{S_i} = (x_i, y_i + 1.5w - \Delta w)$$

왕복경운 끝 (PTO OFF, 리프트 상승)

$$P_{E_i}(x_i, y_{i+1} + 1.5w - \Delta w)$$

(2) 회행경운 영역

회전경운 영역의 좌표축 방향의 주행경로 r_d 은 작업폭 w , 작업 중복폭 Δw 을 고려하여 결정하였고 직사각형 4행정의 주행경로를 2회 생성하였다.

회행작업수를 증가시키면 왕복작업의 수는 감소하지만 모서리선회의 수가 증가하여 총 경로는 길어지므로 회행작업수를 가능한 줄여야 한다. 그러나 왕복작업시 포장의 경계 내에서 농기계가 원활하게 선회를 할 수 있어야 하므로 본 연구에서는 트랙터-작업기의 유효선회반경을 확보할 수 있는 수준에서 최소회행작업수를 결정하였다.

라. 최적경로계획 알고리즘

최소회행작업수를 결정함으로써 최적경로는 왕복작업의 순서를 적절히 조절하여 왕복작업경로를 최소화함으로써 구해진다. 최단경로를 찾는 일반적인 알고리즘으로는 Dijkstra의 알고리즘, 세일즈맨 여행경로 찾기 알고리즘 등 다수가 제안되고 있으나 본 연구에서는 Dijkstra 알고리즘을 적용하였다. Dijkstra 알고리즘은 시작점과 목표점이 주어지는 경우 가장 효율적인 최적 경로탐색방법으로 알려져 있다.

<p>1단계 초기화</p>	<p>$\forall_j \in N$에 대해</p>	<p>$\bar{d}_j = 0$ $d_j = d_{1j}$, $d_{ij} < \infty$이면 $(1, j) \in R_j, \forall_j \in N$ 노드 ① $\in P$, 기타노드 ① $\in NP$라 둔다</p>
<p>2단계 최단거리 / 경로선택</p>	<p>$\bar{d}_k = \text{Min} \{d_j\}$인 마디 ②를 찾는다. 그리고 ② $\in P$라 둔다. $NP = \emptyset$이면 4단계로 이동</p>	
<p>3단계 거리와 라인 수정</p>	<p>(1) 잠정적인 거리수정 가장 최근에 최단거리가 발견된 노드가 ②이면 마디 ①까지의 거리 d_j를 다음과 같이 수정 : $d'_j = \bar{d}_k + d_{kj}, \forall_j \in NP$ (2) 거리와 라인 수정 $d_j < d'_j$이면 d_j는 그대로 $= d'_j$이면 $d_j = d'_j$라 두고, $(k, j) \in R_j$라 둔다. $> d'_j$이면 $d_j = d'_j$라 두고, R_j의 라인 (k, j)로 대체 그리고 2단계로 이동</p>	
<p>4단계 최적경로 선택</p>	<p>R_j에 있는 라인</p>	

마. 경로계획 성능평가

알고리즘의 성능은 직사각형 포장의 단변의 길이를 변화시키면서 탐색속도, 탐색된 경로의 길이로 평가하였다. 경로계획 알고리즘의 속도는 brute-force 알고리즘의 계산횟수에 대한 개발된 알고리즘의 계산횟수비로 평가하였으며 탐색된 경로의 길이는 인접열의 왕복 경운과 회행법을 조합한 기존의 관행경운방법과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 경로계획 알고리즘의 성능

경로계획 알고리즘의 유용성은 작업을 하지 않고 주행하는 공주거리를 단축할 수 있느냐에 달려있다. 직선구간 경로를 주행할 때에는 주행방법이나 알고리즘에 따라 큰 차이가 있을 수 없지만 새머리(Head land) 선회는 선회반경과 선회 방법에 따라 경로의 길이가 크게 달라진다. 이 연구에서는 선회시 선회반경은 최소선회반경을 적용하고, 선회방법만 달리 함으로 얻을 수 있는 선회거리의 단축효과를 기존 경운방법과 개발한 알고리즘을 비교하여 평가하고자 했다.

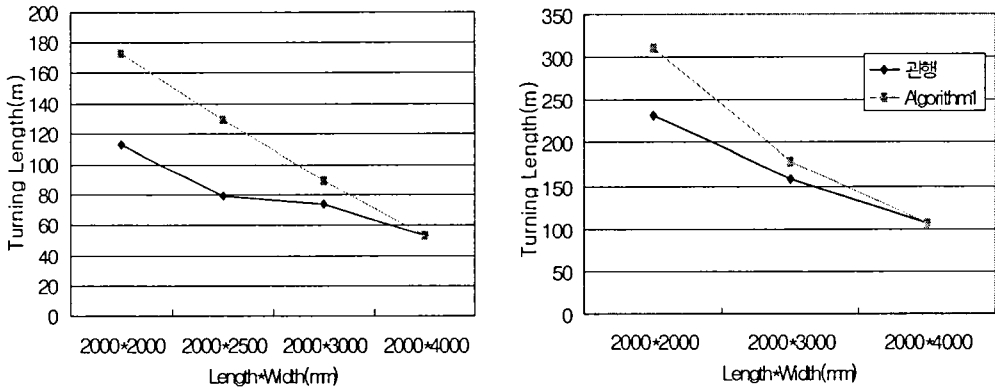
관행의 작업 방법(인접열 작업방식)과 개발한 알고리즘을 100m×40m, 100m×60m 포장에 적용하고, 트랙터의 선회반경에 영향을 미치는 트랙터와 작업기의 길이, 작업폭을 각각 달리하여 왕복작업구간에서 선회경로길이를 비교하였다. 선회구간대 직선구간의 비가 약 관행 작업에서는 25~30%정도였으나 개발한 알고리즘을 적용할 경우 16~21%정도로 작게 되어 표1에 나타낸 바와 같이 작업폭이 2m일 경우 관행 작업에 비해 약 35%의 선회경로가 단축됨을 알 수 있다. 그러나 트랙터와 작업기의 길이에 비해 작업폭이 매우 넓은 경우 즉 작업기의 폭이 선회반경과 유사한 경우는 알고리즘에 의한 선회경로 단축효과가 거의 나타나지 않았음을 알 수 있었다

Table 1. The comparison with turning length of conventional tillage and that of algorithm

Field size	Length×Width(mm)	Turning Length	
		Conventional	Algorithm
100m× 40m	2000*2000	173	113
	2000*2500	129	79
	2000*3000	89	74
	2000*4000	53	53
100m× 60m	2000*2000	310	231
	2000*2500	261	201
	2000*3000	179	158
	2000*4000	107	107

나. 작업폭과 길이가 알고리즘에 미치는 영향

그림 3은 포장 구획의 크기가 100m×40m와 100m×60m인 포장에서 트랙터와 작업기의 길이를 2m로 일정하게 하고 작업폭을 2m에서 4m 범위로 바꾸어 작업했을 때 선회거리를 나타내었다. 선회반경에 영향을 미치는 작업기의 길이가 작업폭과 비슷하거나 작은 경우 즉 작업폭과 길이가 2000*2000mm 또는 2000*2500mm 인 경우 알고리즘에 의한 경로 단축은 약 60m정도로 알고리즘의 효과는 컸으며, 작업폭이 선회반경과 유사한 3500mm이상인 경우는 알고리즘에 의한 선회경로 단축효과가 거의 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 그림에 보이는 바와 같이 포장의 크기 중 장변의 길이가 일정하면 알고리즘의 효율은 큰 변화가 없고 단변의 길이에 비례하여 선회거리는 단축이 가능하다.



(a) Field Size 100m×40m

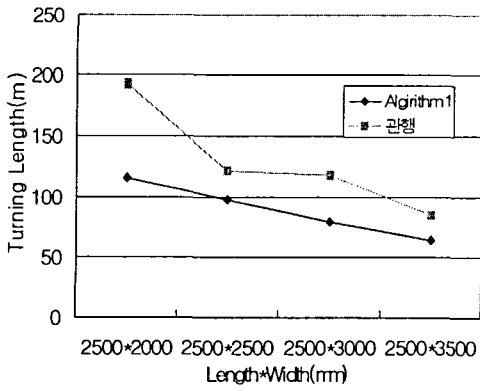
(b) Field Size 100m×60m

Fig.3 The comparison with turning length of conventional tillage and that of algorithm in 100m×40m and 100m×60m as field size

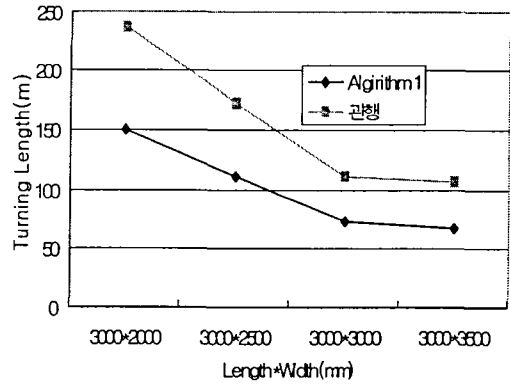
그림 4는 작업기의 길이가 일정할 때 작업폭에 따른 알고리즘의 영향을 알아보기 위하여 작업기의 길이가 2500mm, 3000mm 일때, 작업폭이 바뀌는데 따른 선회거리의 변화를 나타내었다. 작업폭이 증가하면서 알고리즘의 효율이 감소하는 경향을 나타내고 있으나 작업기의 길이가 길어져 선회반경이 커질 경우는 알고리즘의 효율은 증대되지만 전체적인 포장효율의 감소로 실용성은 떨어질 것으로 보인다.

그림 5는 작업폭이 일정하고 작업기의 길이가 각기 다른 작업기를 부착했을 때 작업기의 길이가 선회효율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 작업기의 길이가 2500mm과 3000mm인 작업기 각각에 대하여 작업폭의 변화와 선회거리의 관계를 표시했다. 작업기의 길이가 길어질수록 선회거리는 크게 증가하며 그 정도는 관행작업 방법에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

우리나라에서 이용하고 있는 대부분의 경운작업기는 작업기까지의 거리와 작업폭은 대체로 2~3m내외이며 포장의 장변은 100m로 직선 작업구간에 비해 선회길이가 길고, 선회횟수가 많아 개발한 알고리즘이 유용하게 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

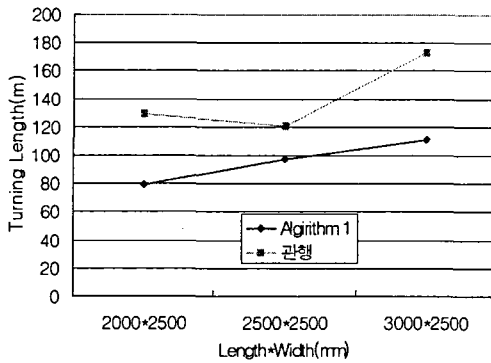


(a) Implement Length 2500mm

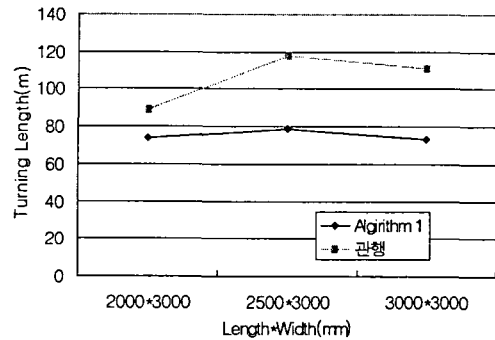


(b) Implement Length 3000mm

Fig.4 The comparison with turning length of conventional tillage and that of algorithm at constant implement length and variable operation width



(a) Operation Width 2500mm



(a) Operation Width 3000mm

Fig.5 The comparison with turning length of conventional tillage and that of algorithm at constant operation width and variable implement length

4. 요약 및 결론

이 연구는 선회가 많은 소규모 포장에서 지리적 좌표를 기반으로 컴퓨터가 생성할 수 있는 최적의 경로와 작업순서를 결정하는 알고리즘을 개발하고, 경험과 감각에 의해 경운작업을 수행하는 트랙터 운전자와의 작업계적 비교를 통해 알고리즘의 유용성을 평가하고자 했다.

1. 회행작업구간과 왕복작업구간으로 나누어 경로를 계획하고 선회구간의 궤적과 길이의 총합으로 작업효율을 계산하였고 왕복경운영역의 폭과 선회횟수의 계산은 Yukumoto('01)등이 제안한 작업계획법을 적용한 알고리즘을 개발하였다
2. 관행의 작업 방법(인접열 작업방식)과 개발한 알고리즘을 100m×40m, 100m×60m 포장에 적용하고, 트랙터의 선회반경에 영향을 미치는 트랙터와 작업기의 길이, 작업폭을 각각 달리하여 왕복작업구간에서 선회경로길이를 비교하였다. 선회구간대 직선구간의 비가 약 관행 작업에서는 25~30%정도였으나 개발한 알고리즘을 적용할 경우 16~21%정도로 작게 되어 작업폭이 2m일 경우 관행 작업에 비해 약 35%의 선회경로가 단축되었다
3. 선회반경에 영향을 미치는 작업기의 길이가 작업폭과 비슷하거나 작은 경우 즉 작업폭과 길이가 2000*2000mm 또는 2000*2500mm 인 경우 알고리즘에 의한 경로단축은 약 60m정도로 알고리즘의 효과는 컸으며, 작업폭이 선회반경과 유사한 3500mm이상인 경우는 알고리즘에 의한 선회경로 단축효과가 거의 나타나지 않았다.
4. 우리나라에서 이용하고 있는 대부분의 경운작업기는 작업기까지의 거리와 작업폭은 대체로 2~3m내외이며 포장의 장변은 100m로 직선 작업구간에 비해 선회길이가 길고, 선회횟수가 많아 개발한 알고리즘이 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이상훈. 1998. 이동로봇의 실시간 경로계획. 한양대학교 석사학위논문.
2. Thomas Bell. 1999. Precision Robotic Control of Agricultural Vehicles on Realistic Fram Trajectories. Stanford University
3. Yosike Matsuo, Osamu Yukumoto, Noboru Noguchi. 1998. Navigation systems and work performance of tillage robot. ASAE Paper No. 983192.
4. Ryo Torisu, Kenichi Tanaka, Joe Imae. Optimal path of headland for tractors by optimal control theory(Part I). The journal of Japanese society of agricultural machinery 59(4):3-10.