

무인트랙터의 농작업 경로계획

Path Planning for Farm Operation of an Unmanned Tractor

정선옥*	김상철*	장영창**	정인규*	박우풍*	여운영***
정희원	정희원	정희원		정희원	
S.O.Chung	S.C.Kim	Y.C.Chang	I.G.Jung	W.P.Park	W.Y.Yeo

1. 서론

농기계의 무인자동화 연구가 점차 늘어남에 따라 포장 내에서 효율적인 농작업 경로를 찾는 것은 중요한 요인으로 간주되고 있다. 효율적인 농작업 경로의 탐색은 정밀농업의 구현에 직접적으로 응용될 수 있다는 관점에서 매우 중요한 과제이다. 그러나 우리나라에서는 농작업의 효율적 경로를 찾고자 연구는 거의 없었으며 설정된 작업경로를 추종하며 농기계를 운용하는 자율주행 방식은 다수 제안되고 있다.

최근에는 작업할 경로를 전자지도에 구축하여 전역경로를 계획하고, 계획된 경로와 작업지점의 GPS 측위 결과를 비교하는 방식으로 농기계 자율주행을 수행하고 있다. 또한 국부경로 탐색 및 장애물 검출에는 초음파, 레이저, 기계시각 시스템 등이 보조적으로 이용되고 있다. 우리 나라에서는 조성인 등(1997)이 작업경로가 일정하게 정해진 과수원용 스피드스프레어의 자율주행을 위하여 직진구간과 회전구간의 각 목표점을 GPS 경위도 좌표로 입력하고 이를 추종하는 방식을 사용하였다. 농작업의 경로탐색과 관련하여 일본의 Torisu 등(1998)은 수도작 작업에서 트랙터의 최단산회모형을 고찰하였으며 Matsuo 등은(1998) 농작업 경로계획을 수행하였다. 그러나 이러한 작업계획은 작업열을 순차적으로 왕복하면서 작업하는 것을 바탕으로 하여 포장전체에 대한 작업계획이 최적화 되었다고 보기 어렵다.

본 연구에서는 직사각형 포장에서 작업하는 트랙터-작업기의 최적 작업경로를 계획하고자 최소확장트리를 응용한 2가지 경로탐색 알고리즘을 제안하였고 알고리즘의 성능과 안정성을 평가하였으며 임의의 크기의 포장에 대하여 제안된 경로와 기존 농작업경로를 비교, 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 최적경로탐색의 기본방향

농작업을 수행할 때는 작업시간은 줄이고 정밀도와 작업효과는 높이는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 수도작 농기계의 작업능률을 높이고 기계사용시간과 사용연료, 트랙터에

* 농촌진흥청 농업기계화 연구소

** 서울대학교 농업생명과학대학 농업개발연구소

*** 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 농업기계전공

의한 토양다짐을 줄이기 위하여 미작업 부분이 발생하지 않으면서 최단시간에 작업할 수 있는 경로를 구하는 것으로 경로계획의 기본방향을 설정하였다.

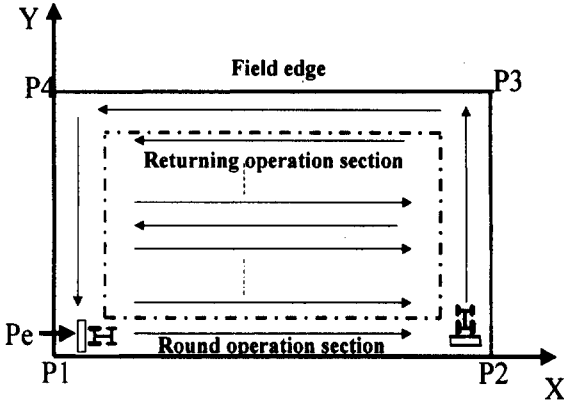


Fig. 1 Rectangle geometry of a paddy field and farm operation trajectory.

그림 1은 일반적인 사각형 모양의 포장과 농작업을 수행하는 트랙터의 궤적을 보여주고 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 궤적과 길이는 단순계산으로 구해지므로 결국 목적함수는 식 1로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize}(L) &= \text{Minimize}(L_{ro} + L_{re} + L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \\ &= \text{Minimize}(L_{ro} + L_{re}) + \text{Summation}(\text{the others}) \quad (\text{식 1}) \end{aligned}$$

나. 최단시간 선회모형

본 연구에서는 트랙터-작업기의 최단시간 선회모형으로 Torisu 등(1997)이 직사각형 포장에서 트랙터의 최단시간 선회를 위하여 최적화한 작업모형을 사용하였다.

다. 회행횟수 결정

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.

그림 2는 기하학적으로 최소회행작업수를 결정하는 방법을 보여주고 있다. 왕복작업구간에서 작업열을 변경할 때 트랙터-작업기가 선회할 공간을 확보해야 하므로 최소회행작업수(N_{ro})는 식 2로 결정된다.

$$N_{ro} = \text{Gaussian} \left[\frac{R(1 + \sin \angle OAB)}{We} \right] \quad (\text{식 2})$$

식 2에서 Gaussian[]는 가우스 함수를 의미하며 $\angle OAB$ 는 $\arccos\left(\frac{We}{2R}\right)$ 으로 구해진다.

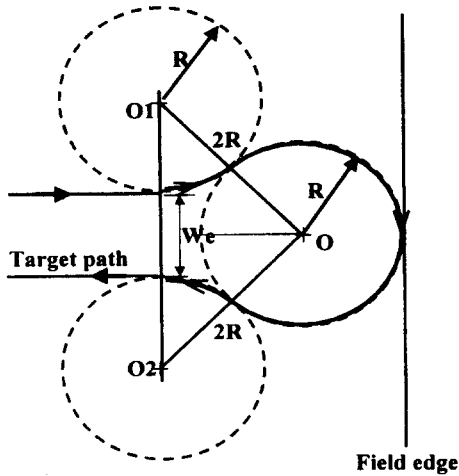


Fig. 2 Determination of the number of round operation based on an effective turning radius of tractor.

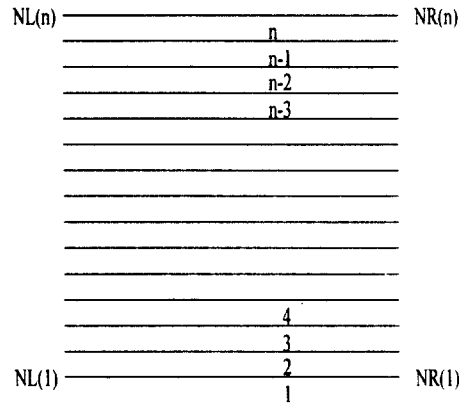


Fig. 3 Operation starting and ending nodes and operation line notation.

마. 최적경로계획 알고리즘

최소회행작업수를 결정함으로써 최적경로는 왕복작업의 순서를 적절히 조절하여 왕복작업경로를 최소화함으로써 구해진다. 그림 3에 왕복작업구간의 각 작업열에 대한 번호와 좌우의 작업 시작점·종료점을 나타내었다. 왕복작업은 포장의 장변방향으로 수행하고 왕복작업 최초 시작점은 포장 진입점에서 가까운 점으로 설정하는 것으로 가정하였다. 선회모형에서 보는 바와 같이 각 작업열 끝에서 다음 작업열을 어떻게 선택하느냐에 따라서 작업열 변경에 필요한 경로의 길이가 달라지므로 순차적으로 왕복작업을 수행하는 것은 최단경로를 보장하지 않는다.

경로의 합이 최소가 되는 작업열의 순서를 결정하는 기본적인 접근법은 모든 경우의 작업순서에 대하여 경로의 총 길이를 구하고 각 경우의 값을 비교하는 방법(brute-force algorithm)으로, 이 때 비교되어야할 총 경우의 수는 왕복작업 횟수에 대한 순열값, $n!$ 이 된다. 그러나 이 방법은 왕복작업열의 수가 증가하면 경우의 수는 지수함수 형태로 늘어나 비교를 위한 계산횟수가 너무 많다는 문제점을 갖는다. 최단경로를 찾는 일반적인 알고리즘으로는 Dijkstra의 알고리즘, 세일즈맨 여행경로 찾기 알고리즘 등 다수가 제안되고 있으나 본 연구에서는 최소확장트리(shortest spanning tree)알고리즘의 하나인 Prim 알고리즘을 응용한 두 가지 알고리즘을 개발하였다.

Prim 알고리즘은 경로 상에 있는 정점에 대한 전체집합에서 임의의 정점을 선택하고 그 정점에서 가장 가까운 거리에 있는 정점을 추가해 나가는 알고리즘이다. 본 연구에서 개발한 첫 번째 알고리즘(알고리즘I)은 n 개의 작업열 좌우 작업점을 $NL(k)$, $NR(k)$ 로 나누고 선회모형을 기반으로 각 작업점에서 선택할 수 있는 점들에 대한 가중치값을 부여한 후, 시

작업점부터 가중치가 가장 짧은 작업점으로 이동하고 지나온 노드점의 가중치를 제거하여 이러한 과정을 작업점이 하나 남을 때까지 반복하는 것이다. 작업점에 부여되는 가중치는 식 3으로 구하였다. 특히 $i=k$ 일 경우에는 가중치가 0이 되며 이 때 좌우 상대편 작업점으로 이동하도록 하였다.

$$NL(k) = \text{Gaussian} [LW_{k1}, LW_{k2}, \dots, LW_{ki}, \dots, LW_{kn}] \quad (\text{식 3})$$

$$RL(k) = \text{Gaussian} [RW_{k1}, RW_{k2}, \dots, RW_{ki}, \dots, RW_{kn}]$$

여기서, $k : 1 \sim n$
 $NL(k) : k$ 번째 왼쪽 노드
 $RL(k) : k$ 번째 오른쪽 노드
 $LW_{ki}, RW_{ki} : k$ 번째 노드에서 i 번째 노드로 이동하는 경로의 가중치

두 번째 알고리즘(알고리즘II)은 알고리즘I에 기본으로 “작업열 선택하는 과정에서 단변 이동방향을 변경하기 전에 가중치가 크더라도 최상 또는 최하 작업열을 우선적으로 선택한다”는 조건을 추가한 알고리즘이다. 이는 알고리즘I이 포장 단변방향으로 오르내리면서 최단경로에 근사한 왕복작업 순서를 얻을 수 있었으나 왕복작업 횟수가 변화되면 경로계획의 중반부로 갈수록 작업종료점에서 멀리 떨어진 작업열을 선택하는 경우가 발생하는 가능성을 제거하기 위하여 개발되었다.

라. 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 Matsuo(1998)가 개발한 경운로봇의 왕복작업 순서결정을 위한 작업계획법의 결과와 비교하였다. 포장의 크기는 농림부와 농어촌진흥공사에서 제시한 경지의 표준크기를 기준하여 경지정리에서 가장 많이 제시되고 있는 $100\text{m} \times 40\text{m}$ 포장과 김학규(1995)가 대형 일관 기계화를 위한 적정 포장 규모로 제시한 $200\text{m} \times 100\text{m}$ 포장을 성능평가포장으로 설정하였다. 경로계획 알고리즘의 안정성은 $40\text{m} \times 100\text{m}$ 포장에서 $80\text{m} \times 100\text{m}$ 포장까지 단변의 크기를 2m씩 증가시켜 왕복작업열의 수를 20회에서 40회까지 1회씩 증가시키면서 왕복작업경로의 길이변화의 추이로 검증하였다. 트랙터-작업기의 유효선회반경과 유효작업폭은 농가에서 많이 사용하고 있는 트랙터를 기준으로 3m와 2m로 각각 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 경로계획 알고리즘의 성능

본 연구에서 개발한 알고리즘I, II는 작업점을 지날 때마다 그 점을 제외시키므로 다음 작업점을 찾는 계산횟수가 1번씩 줄어들고 시작작업점을 정해주기 때문에 총 계산횟수는

n^2 이 되어 Brute-force 알고리즘에 대한 개발된 알고리즘의 계산횟수비는 $n/(n-1)!$ 로 구해진다.

Matsuo의 방법(인접열 작업방식)과 알고리즘I, II를 $100m \times 40m$, $200m \times 100m$ 포장에 적용하고 각 방법에 대한 왕복작업구간 경로길이가와 그 비율을 표1에 나타내었다. Matsuo는 모서리 선화와 포장 진출입 방법은 언급하지 않았으므로 다른 구간은 비교대상에서 제외하였다.

Table 1. The comparison of total path length, turning length and related ratios for line to line path and the paths by algorithm I and II.

Classification		Line to line	Algorithm I	Algorithm II
40m ×	Path length(m)	819.23	742.93	752.56
	Turning length(m)	188.99	112.69	122.32
100m	Length ratio	1.0	0.91	0.92
(Field size)	Length ratio for turning	1.0	0.60	0.65
100m ×	Path length(m)	7,672.58	7,190.83	7,179.14
	Turning length(m)	998.94	517.19	505.50
200m	Length ratio	1.0	0.94	0.94
(Field size)	Length ratio for turning	1.0	0.52	0.51

표에서 보는 바와 같이 두 개의 포장에 대해 알고리즘I, II의 총 경로길이가와 선화 경로길이가 모두 관행방법보다 작게 나타났다. 또한, 단변이 길어져 왕복작업 횟수가 증가하면 회전에 필요한 경로길이가 더욱 감소하는 바람직한 결과를 보였다. 알고리즘I은 $40 \times 100m$ 포장에서, 알고리즘II는 $100 \times 400m$ 포장에서 최단길이를 제시하였지만 그 차이는 크지 않다.

나. 경로계획 알고리즘의 안정성

알고리즘I과 II의 경로탐색 안정성은 단변크기 변화에 영향을 받았다. 알고리즘의 안정성을 비교하기 위하여 왕복작업 횟수 증가에 따른 이전 길이변화에 대한 해당 길이변화의 비율을 왕복경로 길이변화율(r_v)로 나타내고 식 4와 같이 구하였으며 길이변화율의 RMS(root mean square)를 비교하였다. 왕복작업 횟수가 증가하는것에 직선적인 비례관계로 경로의 길이가 길어지는 경향이 있다면 왕복경로 길이변화율은 1에 가깝게 된다.

$$r_v = \frac{L_{i+2} - L_{i+1}}{L_{i+1} - L_i} \quad (\text{식 4})$$

식 4에서 L_i 는 왕복작업열의 수가 i 일 때 왕복작업 경로길이 ($20 < i < 38$)를 나타낸다.

그림 4는 $40m \times 100m$ 포장에서 $80m \times 100m$ 포장까지 단변의 크기를 2m씩 증가시켜 왕복작업열의 수가 20회에서 40회로 증가될 때 알고리즘I과 II의 왕복경로 길이변화율의 변동

추세를 보여주고 있다. 알고리즘I의 왕복경로 길이변화율은 특정 왕복작업횟수에서 갑자기 크게 변하는 경우가 생기지만 알고리즘II의 경우에는 일정한 값이 반복되는 것을 알 수 있다. 특히 변화율의 RMS값도 알고리즘I과 II에 대해 각각 1.35, 0.40로 나타나 알고리즘II가 왕복작업 횟수변화(포장의 크기변화)에 대하여 안정적인 경로탐색을 수행하는 것으로 판단되었다. 그러나 표 1에서 나타난 바와 같이 경로의 길이는 왕복작업횟수가 작을 때는 알고리즘I의 결과가, 왕복작업횟수가 일정숫자 이상으로 커지면 알고리즘II의 결과가 짧게 나타났다.

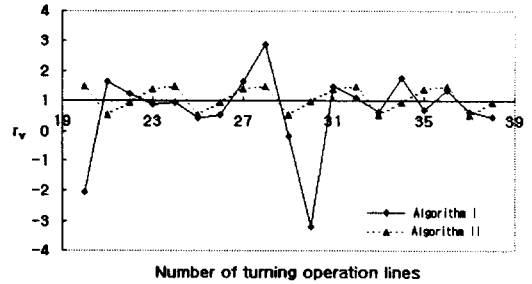


Fig. 4 The ratio of the length change of turning path with respect to the number of turning operation.

다. 농작업 전역경로 계획

그림 5는 40m×100m포장에 대하여 알고리즘I을 이용하여 포장의 진입점에서부터 작업 후 출구지점까지 트랙터가 추종해야할 최적경로의 탐색결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 관행의 방법과는 달리 작업은 인접열 순서로 수행되지 않고 임의의 열을 따르나 관행방법에 비교하여 대략 78m의 경로가 단축되는 것으로 나타났다. 이러한 경로는 무인트랙터가 추종해야할 좌표로 저장되며 무인트랙터의 농작업 자율주행에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

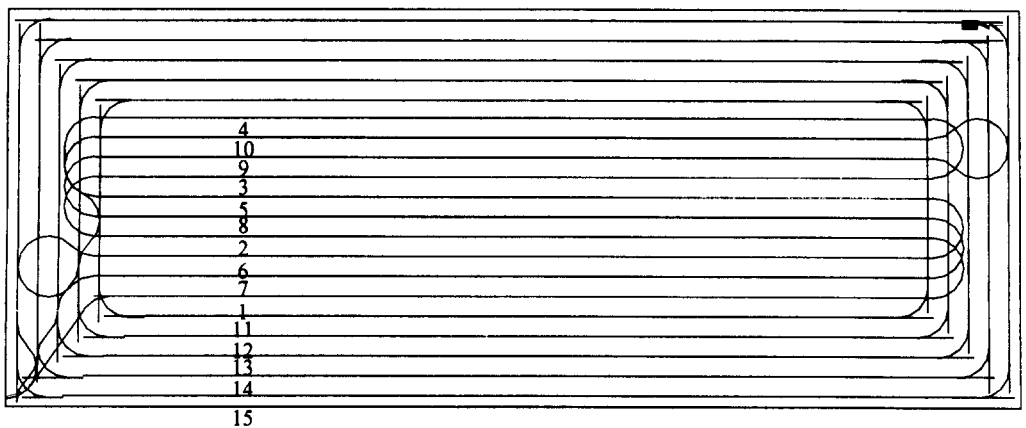


Fig. 5 An optimal path planning of an autonomous tractor generated by algorithm II for 40x100m paddy field.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 직사각형 포장에서 작업하는 트랙터-작업기의 최적 작업경로를 계획하고자 두 가지 경로탐색 알고리즘을 제안하였고 알고리즘의 성능과 안정성을 평가하였으며

임의의 크기의 포장에 대하여 제안된 경로와 기존 농작업경로를 비교, 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 트랙터-작업기의 최적작업경로를 계획하기 위해 Prim 알고리즘의 최소확장트리법을 기본으로 두 가지 경로탐색 알고리즘(알고리즘 I, II)을 개발하였다.
2. 최적 작업경로에서 회행작업수는 왕복작업구간에서 작업열을 변경할 때 트랙터-작업기의 유효선회반경을 확보할 수 있는 수준에서 결정하였다.
3. 알고리즘 I과 II의 경로탐색 안정성은 단변크기 변화에 영향을 받았으나 알고리즘 II가 보다 안정적인 경로탐색을 수행하는 것으로 판단되었다.
4. 왕복작업횟수가 작을 때는 알고리즘 I이 최단경로를 탐색했으나 왕복작업횟수가 일정숫자 이상으로 커지면 알고리즘 II가 보다 최단경로를 계획하였다.
5. 관행 방법에 의한 경로와 비교하여 개발된 알고리즘은 총 경로와 선회경로를 감소시켰으며 40m×100m 크기의 포장에 대하여 관행방법에 비교하여 약 78m의 경로를 단축시키는 것으로 나타났다. 또한 이러한 경로는 무인트랙터가 추종해야할 좌표로 저장되어 무인트랙터의 농작업 주행기준으로 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 서울대학교 농업개발연구소. 1994. 경지정리의 최적설계에 관한 연구. 농림수산부.
2. 김학규. 1995. 대구획 포장의 벼농사 일관기계화 체계에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사 학위논문.
3. 박정호. 1997. 컴퓨터 알고리즘. 상조사.
4. 조성인, 이재훈, 정선옥. 1997. DGPS와 퍼지제어를 이용한 스피드스프레이어의 자율주행 (I)-그래픽 시뮬레이션-. 한국농업기계학회지 Vol. 22(4):487-496.
5. Yosike Matsuo, Osamu Yukumoto, Noboru Noguchi. 1998. Navigation systems and work performance of tillage robot. ASAE Paper No. 983192.
6. 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.