
Global Report

소규모 농지에서 효과적인 밀의 수확과 운송을 위한 최적화 프레임워크

1. 개요
2. 자료 및 방법론
3. 결과 검토
4. 결론

1. 개요

최근 몇 년 동안 교통산업 분야에서 차량 라우팅(Vehicle routing) 문제를 성공적으로 적용하여 운영비용을 줄이고 있는 것으로 나타났다[1][2][3][4][5]. 특히 농업분야에서는 수확한 작물을 농지(농장)로부터 제3의 장소(보관창고 등)로 운송해야 한다. 이 때문에 차량 라우팅 문제는 농업분야에서도 관심이 집중되고 있다. 그러나 이처럼 교통산업이나 농업분야에서 몇 가지 실질적인 문제해결을 위한 최적화 프레임워크로는 거의 사용되지 못하고 있는 실정이다. 중국의 경우, 겨울에 조각 농지에 심은 밀을 여름에 수확한다. 수확기에는 수확기를 먼저 정하고 밀을 수확한 다음 곡물은 수송차량을 통해 보관창고로 운송된다. 곡물을 수확 후 농지에서 수송차량으로 운송하는 과정에서 동기화 문제가 발생한다. 즉, 수송차량에 적재될 수확기는 수송차량 운전자가 제 시간에 농지에 도착하지 못하게 되면 곡물들은 제때 운송되지 못하고 이를 하역 할 때까지 중지하고 기다리게 된다. 반대로, 수송차량들이 수확을 완료하기도 전에 너무 일찍 농지에 도착하면, 수송차량은 농지에서 곡물의 적재를 기다려야 하는 동기화 문제가 발생하는 것이다.

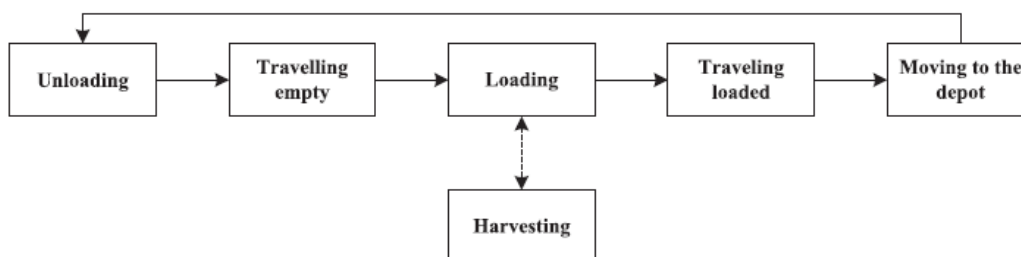
조사에 따르면, 중국에서는 곡물 수확기와 수송차량 간 불균형한 비동기화로 인한 어려움이 많은 것으로 나타났다. 이에 콤바인(Combine-harvester)과 수송차량의 운송 일정은 시스템적인 관점에서 고려해야 할 필요가 있다. 이 연구에서는 농지와 곡물의 적재(운송) 간 동기화 문제 해결방안을 제시한다. 이를 위해 며칠 동안 지속되는 곡물수확 과정에 VRPMT(Vehicle Routing Problem with Multiple Trips : 다중 운송 차량 라우팅 문제) 기법을 적용하며, 이 문제는 곡물수송자가 농지에서 다음 콤바인을 방문하기 전에 곡물을 하역하기 위해 곡물저장소로 다시 돌아가야 하므로 다중차량에 대한 다중경로 문제이며, 경로 지정 문제로 요약할 수 있다. 일반적으로 수송기의 용량은 콤바인의 호퍼와 같기 때문에 VRPMT 및 운송 차량 할당방법 등 공동 최적화 프레임워크를 통해 밀(곡물) 수확 및 운송공정을 이용한다. 특히 이 연구에서는 지리적으로 흩어져있는 소규모 조각농지(fragmental farmlands)에서 수확된 곡물의 효과적인 운송방법을 제시한다. 이를 위해 각 소규모 조각농지마다 단일 수확기에 한 번만 수확하는 것으로 가정한다. 특히 밀 수확기간은 일반적으로 며칠 동안 지속되기 때문에 여러 번의 운송 차량 라우팅 문제가 중요하다.

정리하면, 소규모 조각농지별로 밀을 결합 수확하여 수송자에 의해 로딩 위치(농지)에서 보관창고 등으로 운송된다. 곡물 운송 수송차량은 하루 동안 조각농지에서 반복적으로 곡물을 운반한다. 각 운송수단별 콤바인 호퍼의 용량과 동일하기 때문에 곡물운송을 위한 최적의 콤바인을 제공할 수 있다. 따라서 곡물을 운반하는 것은 차량 라우팅(경로할당) 문제로 간주 될 수 있는 전체 트럭의 운송문제이다. 곡물의 운송시간 및 적재위치는 콤바인의 경로에 의해 영향을 받는 수확 순서에 의해 결정된다. 따라서 밀 수확 및 운송문제는 동기화 문제로 간주 될 수 있기 때문에 콤바인은 모든 지리적으로 흩어져있는 소규모 조각농지의 시간영역에서 수송차량과 동기화 되어야 한다.

2. 자료 및 방법론

2.1. 자료 : 문제정의 및 수학적 모델

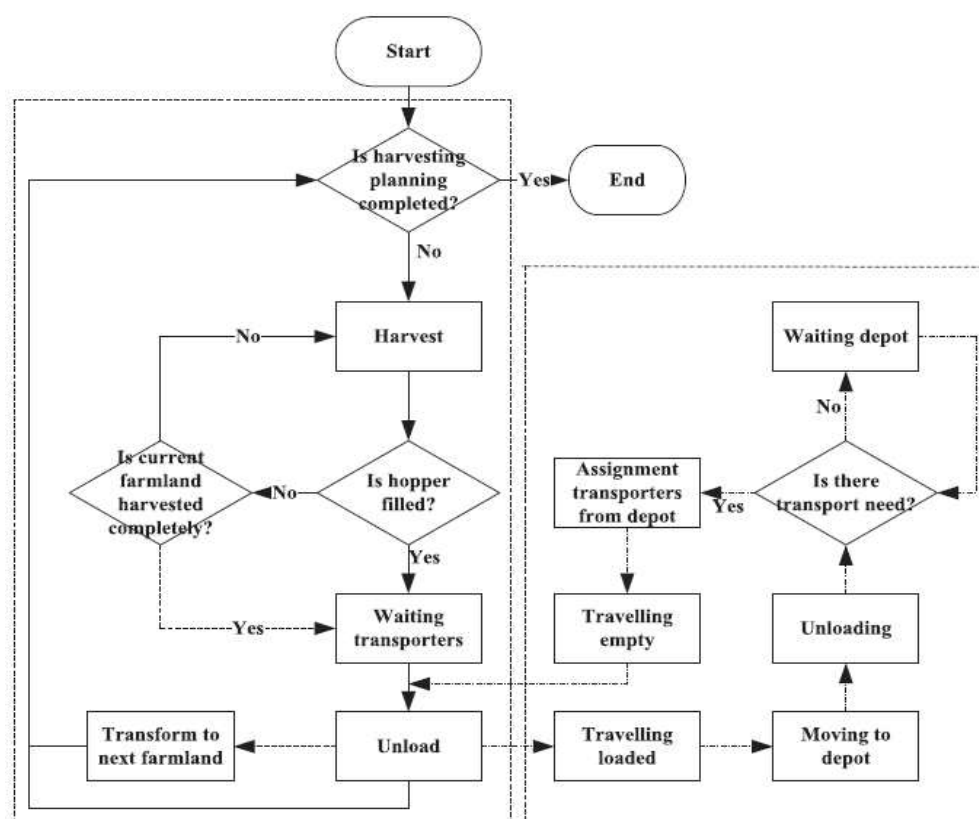
이 연구에서 제시한 곡물 운송시스템의 활동주기를 [그림 1]에 나타낸다. 이 모델은 콤바인과 수송차량의 작업 프로세스를 동기화하기 위한 것이다.



* 자료 : P. He, J. Li, "A joint optimization framework for wheat harvesting and transportation considering fragmental farmlands", INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE xxx (xxxx) xxx, p.4.

[그림 1] 곡물운송 시스템의 활동주기

곡물 수확기와 수송차량 간 불균형으로 인한 비동기화 문제를 해결하기 위한 공동 최적화 프레임워크의 가장 좋은 결과는 콤바인의 호퍼가 가득 차거나 현재 농지에서 수확이 완료 될 때 수송기가 농지에 적시에 도착한다는 것이다. 이 경우 콤바인과 운송업자 간 대기시간이 적을수록 수송차량의 수는 최소화 될 수 있다. 콤바인은 수송차량이 농지에 도착하기 전에 호퍼가 채워지면 수송차량을 기다려야만 한다. 이때 대기시간은 밀 수확 및 운송문제의 핵심 요소이다.



* 자료 : P. He, J. Li, "A joint optimization framework for wheat harvesting and transportation considering fragmental farmlands", INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE xxx (xxxx) xxx, p.4.

[그림 2] 곡물의 수확 및 운송 프로세스 문제 사례

소규모 조각농지에서 곡물의 수확 및 운송 프로세스에서 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위한 의사결정 과정의 흐름 다이어그램을 [그림 2]에 나타낸다. 왼쪽부분은 콤바인에 대한 흐름으로 직선은 현재 농지가 수확이 완료되지 않고 호퍼만 가득찬 상태를 나타낸다. 점선은 현재 농지의 모듈 하역에서 완전

히 수확이 끝나고 다음 농지로 변환하는 것을 의미한다. 실제로 수확기의 곡물을 하역하는 데는 두 가지 선택방법이 있다:

- 첫 번째는, 호퍼가 채워진 상태에서 수확기가 다른 농지로 이동하려면 너무 무겁고 고지대(능선 등) 농지 사이의 장애물을 통과하는 데 어려움이 있기 때문에 모든 곡물을 한 번에 하역 하는 방법
- 두 번째는, 콤바인의 대기시간은 곧 콤바인 및 수송차량 작업시간에 영향을 주기 때문에 현재 농지에서 완전히 수확을 끝내고 수확기가 다른 농지로 이동하는 방법

두 번째 방법은 예를 들어, 콤바인은 수확이 중단되고 호퍼가 가득 차면 수송차량을 기다리는 상태가 되어 효율이 다소 낮아질 수도 있다. [그림 2]의 오른쪽 부분에서 운송수요가 없는 경우, 곡물 수송량은 보관창고에서 기다려야 하기 때문에 수송에 대한 대기시간이 발생할 수 있다. 이 연구에서는 특히 수확기간이 며칠 동안 지속되어 여러 번의 운송 차량 라우팅 문제가 대두될 수 있는 밀의 수확 문제는 노드집합($A=\{(i, j): 0 \leq i, j \leq s, i \neq j\}$)인 그래프 $G(V, A)$ 를 $V=\{0, 1, 2, \dots, i\}$ 와 같이 정의할 수 있다. 곡물보관창고는 노드 0으로 표시되며, 소규모 조각농지는 $N=\{1, \dots, i\}$ ($N \subseteq V$)로 표시된다. 이 연구에서는 농지가 흩어져 있기 때문에 조각화된 농지가 여러 노드로 분산된 것으로 추상화한다. 아크 세트 A 는 노드 간의 연결로 구성되며, 다른 노드의 거리는 c_{ij} 로 표시된다. 농지의 수확기간 I 는 s_i 로 표시되며, 콤바인의 운송속도는 v_m 이다. 콤바인은 $k \in K$ 로, 수송차량은 $l \in L$ 로 인덱싱된다. 모든 파라미터 및 결정변수는 통합 밀 수확 및 운송을 위한 수학적 모델로서 식(1)과 같이 공식화할 수 있다:

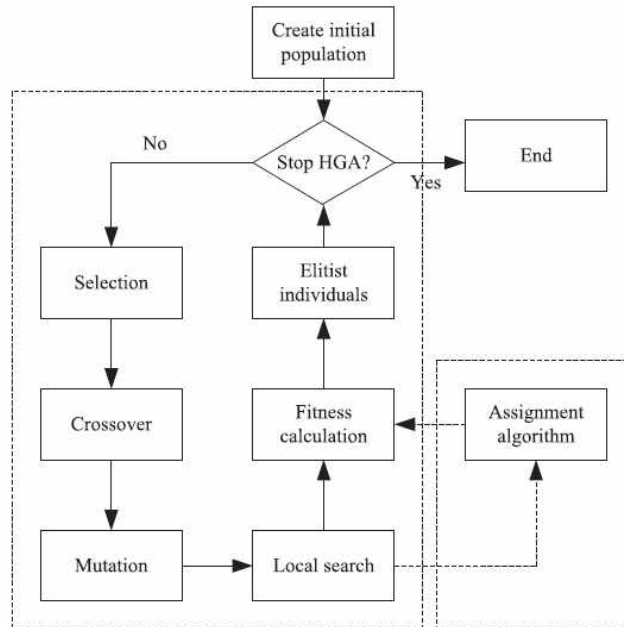
$$\begin{aligned} & \max \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \\ & \times \sum_{p \in P} \left(\left(\frac{c_{ij}}{U_m} + s_i + It \right) x_{ijkp} + \max \left(s_{ikp}^1 - \sum_{l \in L} y_{ijlp} s_{ilp}^2, 0 \right) \right) \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} y_{ijlp} \end{aligned} \dots\dots\dots (1)$$

2.2. 방법론

대규모 결합 최적화 문제를 메타 휴리스틱(meta heuristic) 또는 하이브리드 알고리즘(hybrid algorithm)을 이용하여 최적화되어야 한다[6]. 이에 이 연구에서는 중국 Nanjing시 Lishui지구의 농기계협동조합의 곡물수확 지역에 대한 조사결과를 기반으로 하이브리드 알고리즘이 적용하여 곡물 수확 및 운송 문제 해결방법론을 제시한다. 중국 Nanjing시 Lishui지구의 농기계협동조합은 모두 20개로 곡물수확 면적은 1173ha, 평균 수확면적은 58.7ha, 평균 농지 수는 260개이다. 정확한 하이브리드 알고리즘을 통해 콤바인과 수송차량의 운송경로를 직접 얻을 수 있으며, 이 문제는 공동 최적화에 적용된다. 그러나 정확한 알고리즘은 소규모 농장 조건에서만 충족할 수 있다. 이에 비해 메타 휴리스틱 알고리즘은 문제를 두 부분으로 나누어 해결방안을 제시할 수 있다.

- 첫 번째는 멀티 트립(multi-trips)에 대한 차량 라우팅 문제이다. 다중 운송에서 차량 라우팅 문제는 GA(Genetic Algorithm : 유전자 알고리즘) 및 로컬 검색으로 구성된 HGA(Hybrid Genetic Algorithm : 하이브리드 유전자 알고리즘)에 의해 최적화될 수 있다.
- 두 번째는 이 연구의 기본적인 과제인 교통 문제이다. 휴리스틱 알고리즘에서 수확기와 수송차량의 경로는 순차적으로 주어질 수 있어 운송문제는 할당 알고리즘에 의해 최적화될 수 있다.

통합 알고리즘(멀티 트립에 대한 차량 라우팅 문제, 교통 문제)에 대한 전체 구조를 [그림 3]에 나타낸다.



* 자료 : P. He, J. Li, “A joint optimization framework for wheat harvesting and transportation considering fragmental farmlands”, INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE xxx (xxxx) xxx, p.7.

[그림 3] 통합 알고리즘의 전체 구조

HGA 및 GA 절차는 생물학적 진화행태로부터의 시뮬레이션 결과이다. GA는 생물 제거규칙(spirit of creature eliminationrule)을 채택하였다. 코딩, 디코딩 및 지속적인 작동(재생, 크로스오버 및 돌연변이) 프로세스를 수행하였다. 이후 유전자 표현, 인구규모 및 기준, 초기 인구규모(인구밀도 등), 선택 및 교차 탐색, 유전자의 변화에 따른 현지 재탐색 및 피트니스 계산 등의 과정을 거쳐 최적의 솔루션을 탐색하였다.

3. 결과 검토

전술한 대규모 결합 최적화 문제를 메타 휴리스틱 또는 하이브리드 알고리즘을 이용하여 최적화하는 방법론으로 GA와 로컬 검색기법을 통합하는 등 하이브리드 메타 휴리스틱 기법이 최근 주목받고 있다. 특히 유전자의 변화에 따른 현지 재탐색의 경우, 삽입/스왑/2opt/2opt/교환 연산자와 같은 로컬검색 시 VRP 문제를 해결하는 데 사용되는 많은 연산자가 있다. 이 논문에서 곡물수확 과정은 다중운송의 경우에서의 VRP 문제를 다루었다. (알고리즘 1 참조 : 로컬 검색을 위한 파라미터 구성표)

<알고리즘 1. 로컬 검색을 위한 파라미터 구성표>

1: Input: An offspring individual $\{\pi\}$, and the probability Ls1; Ls2and Ls3. 2: Output: An offspring individual 3: While (exchange(u, v) such that ($c+\delta(\pi, u, v)<c$) do/* c is the current fitness of individual p , and $\delta(\pi, u, v)$ is the neighborhood matrix of individual p based on exchange operator*/ 4: $\pi \leftarrow \pi \oplus \text{exchange}(u, v)p$ /* perform the best-improving move*/ 5: $c \leftarrow c + \delta(u, v)p$ /* update the fitness*/ 6: Update matrix d /* update the neighborhood matrix*/ 7: End while

이 논문에서는 소규모 조각농지에서의 밀 수확을 고려하였다. 곡물을 수확하는 속도는 밀 수확 공정에서 조절 가능한 변수이다. 이에 0.05시간 도메인을 채택하여 수확속도가 밀 수확 및 운송문제에 주는 민감도를 분석하였다. 이를 위해 수확속도는 $\pm 25\%$ 및 $\pm 50\%$ 로 조정한 계산결과를 <표 1>에 나타낸다.

<표 1> 소규모 조각농지에서의 곡물수확속도 계산결과

$N \times K \times P$	곡물수확속도 (ha h ⁻¹)	곡물수확시간 (h)	운송차 대기시간 (h)	사용차량 수	총 시간(h)	피트니스 (적합도)
50×3×3	0.067	63.04	1.10	4	64.14	144.14
	0.100	53.15	0.47	4	53.62	133.62
	0.134	43.26	0.72	4	43.98	123.98
	0.167	34.75	2.87	4	37.62	117.62
	0.200	24.07	1.69	6	25.76	145.76
100×4×4	0.067	145.09	4.61	6	149.70	269.70
	0.100	120.45	3.45	7	123.90	263.90
	0.134	96.39	2.38	7	98.77	238.77
	0.167	75.53	2.31	7	77.84	217.84
	0.200	55.26	2.78	10	58.04	258.04
150×4×5	0.067	306.13	7.19	11	313.32	533.32
	0.100	206.64	6.31	12	212.95	452.95
	0.134	157.24	5.01	12	162.25	402.25
	0.167	120.79	4.68	12	125.47	365.47
	0.200	98.31	4.98	14	103.29	383.29
200×5×6	0.067	346.12	7.10	15	353.22	653.22
	0.100	259.34	7.51	15	266.85	566.85
	0.134	203.59	6.03	15	209.62	509.62
	0.167	164.56	4.12	16	168.68	488.68
	0.200	134.98	8.49	16	143.47	463.47

※ 굵은 숫자는 각각 다른 인스턴스에서 최상의 결과임을 의미함

* 자료 : P. He, J. Li, "A joint optimization framework for wheat harvesting and transportation considering fragmental farmlands", INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE xxx (xxxx) xxx, p.12.

최적의 프레임워크는 $\pm 25\%$ 및 $\pm 50\%$ 로 곡물수확속도를 증하시킴으로써 얻어진다. 이 실험에서, 수확속도를 높이는 것은 수확기간은 분명히 감소하나, 사용되는 수송기의 수는 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 적정성 검토를 위해 수송횟수(N), 콤바인 수송용량(K), 수송루트(p)에 따른 5가지의 경우를 상정하여 분석하였다. 분석 결과, $N \times K \times P$ 의 크기가 200 미만일 때 최대 효율을 올릴 수 있는 수확속도 증가량은 25%로 나타났다. 반면, $N \times K \times P$ 의 크기가 200×5×6보다 크거나 같을 때 최대 효율을 올릴 수 있는 수확속도 증가량은 50%로 나타났다. 이를 토대로 관리자는 소규모 조각농지의 콤바인의 수확속도를 계산할 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 밀의 수확 및 운송공정을 최적화하기 위해 차량 라우팅 및 할당에 대한 최적화 문제를 제안하였다. 이를 통해 각 수송기의 수송용량이 호퍼의 용량(각 콤바인)보다 크면 운송에 더 많은 어려움이 있다는 것을 확인하였다. VRPMT 및 할당 문제는 각각 곡물수확 공정 및 운송프로세스를 설명하는데 매우 유용하게 이용 될 수 있다. 향후에는 곡물 수확 및 운송 과정에서 보다 더 다양한 대규모의 동기화 관계를 분석할 것이다. 아울러 동기화 문제를 최적화하기 위해 더 나은 알고리즘을 개발하는 데 주력할 필요가 있다.

농작물의 수확 및 운송 산업에서 운영비용을 절감하기 위한 목표로 최적의 통합시스템 구축이 확산되고 있다. 이 연구에서는 특히 소규모 농지에서 농작물의 수확 및 운송 차량의 라우팅을 최적화하여 관련 운영비용을 절감할 수 있는 방안을 제시한다. 이 연구결과는 국내 농산물 운송 및 물류산업 관련 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Rix G, Rousseau LM, Pesant G. A column generation algorithm for tactical timber transportation planning. J Oper Res Soc 2015;66(2):278-87.
- [2] He PF, Li J, Wang X. Wheat harvest schedule model for agricultural machinery cooperatives considering fragmental farmlands. Comput Electron Agric 2018;145:226-34.
- [3] Bochtis DD, Sørensen CG, Green O, Bartzanas T, Fountas S. Feasibility of a modelling suite for the optimised biomass harvest scheduling. Biosyst Eng 2010;107(4):283-93.
- [4] Choi J, Lee C, Park S. Dantzig-Wolfe decomposition approach to the vehicle assignment problem with demand uncertainty in a hybrid hub-and-spoke network. Ann Oper Res 2018;264 (1-2):57-87.
- [5] Guerra-Olivares R, Smith NR, González-Ramírez RG, García-Mendoza E, Cardenas-Barro LE. A heuristic procedure for the outbound container space assignment problem for small and midsize maritime terminals. Int J Mach Learn Cyb. 2018;9:1719-32.
- [6] Yu J, Dong Y. Maximizing profit for vehicle routing under time and weight constraints. Int J Prod Econ 2013;145:573-83.

<원문제목> A joint optimization framework for wheat harvesting and transportation considering fragmental farmlands

<원문출처> INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE xxx (xxxx) xxx