Paweł SITEK, Jarosław WIKAREK
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, ZAKŁAD SYSTEMÓW STEROWANIA I ZARZĄDZANIA
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Optymalizacja rozdziału palet w centrum dystrybucyjnym

Dr inż. Paweł SITEK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Świętokrzyskiej w 1991 r. W 2000 roku uzyskał stopień doktora na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Główne kierunki badań obejmują optymalizację oraz wspomaganie decyzji dla procesów produkcji, logistyki i dystrybucji przy wykorzystaniu klasycznych MIP (Mixed Integer Programming) oraz deklaratywnych CLP (Constraint Logic Programming) środowisk programowania.

e-mail: sitek@tu.kielce.pl

Dr inż. Jarosław WIKAREK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Świętokrzyskiej w 1994 r. W 2002 roku uzyskał stopień doktora na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Główne kierunki badań obejmują optymalizację oraz wspomaganie decyzji dla procesów produkcji, logistyki i dystrybucji przy wykorzystaniu klasycznych MIP (Mixed Integer Programming) oraz deklaratywnych CLP (Constraint Logic Programming) środowisk programowania.

e-mail: j.wikarek@tu.kielce.pl

Streszczenie

Problem optymalizacji rozdziału palet jest jednym z wielu problemów optymalizacyjnych pojawiających się we współcześnie funkcjonujących centrach dystrybucyjnych. Jest jednak jednym z kluczowych problemów poza optymalizacją tras, optymalizacją rozmieszczenia zapasów w magazynach wysokiego składowania itp. Dodatkowo należy podkreślić, że problem optymalizacji rozdziału palet obejmuje horyzont krótkookresowy np. dobę. W artykule przedstawiony został model matematyczny optymalizacji rozdziału palet oraz jego implementacja. Przedstawiono również przykłady liczbowe optymalizacji. Jako środowisko implementacji i rozwiązania modelu zaproponowano deklaratywne środowisko programowania w logice z ograniczeniami CLP (Constraint Logic Programming).

Słowa kluczowe: optymalizacja dyskretna, centrum dystrybucyjne, CLP rounded to 4 significant places.

Optimizing the allocation of pallets in a distribution center

Abstract

Problem of optimizing the allocation of pallets is one of many problems in modern distribution centers. It is one of very important problems, except for e.g. routing optimization, space optimization etc. Additionally, it should be noted that the problem of optimizing the allocation of pallets for routes and trucks is a short-run horizon, e.g. every day, process. The optimization and implementation model of that problem is presented in this paper. A solution of this model for numerical examples is also described. As a solution the environment constraint logic programming (CLP) environment has been used. CLP combines the declarative logic based programming with specialized constraint solving methods from artificial intelligence, Operations Research (OR) and mathematics. It allows the clear and concise expression of a wide class of combinatorial problems together with their efficient solution. In parallel with ongoing research in this field, CLP is now increasingly used to tackle real world decision making problems.

Keywords: discrete optimization, distribution center, CLP.

1. Wstęp

Współczesne przedsiębiorstwa przemysłowo-usługowe działają w szybko zmieniającym się otoczeniu w ramach dużej globalnej konkurencji. Dlatego muszą posiadać zdolność do zarządzania na nieprzewidywalnych rynkach, do nadzoru nad geograficznie rozproszonymi zakładami produkcyjnymi oraz dążyć do zapewnienia odpowiednich produktów i wysokiej jakości obsługi klienta [1]. W ostatnich latach wiele firm o zasięgu globalnym jak również małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP), zdaje sobie sprawę, że skuteczność ich działań jest w dużym stopniu zależna od odpowiedniej współpracy i koordynacji z ich dostawcami, jak również z odbiorcami czy bezpośrednio klientami końcowymi [2]. Jednym z elementów ułatwiających taką współpracę jest uczestniczenie w łańcuchu dostaw centrów dystrybucyjnych.

2. Centralizacja dystrybucji

Centralizacja dystrybucji redukuje liczbę transakcji w porównaniu z liczbą transakcji w przypadku braku dystrybucji centralnej. Dostawca nie musi wysyłać przesyłek do wielu odbiorców, lecz wysyła jedną do wydzielonego centrum dystrybucji. Podobnie odbiorca nie musi przyjmować wielu przesyłek od wielu nadawców, lecz odbiera przesyłkę zbiorczą z centrum dystrybucji. Dzięki redukcji liczby transakcji pomiędzy dostawcami i odbiorcami uzyskuje się przede wszystkim bardzo istotne skrócenie przeciętnego czasu dostawy, ale także redukcję kosztów tych transakcji. Wprowadzenie centralizacji dystrybucji - centrów dystrybucyjnych –ułatwia nieporównywalnie większe możliwości optymalizacji zasobów, procesów, kosztów itp.

Potencjalne obszary wspomagania decyzji i optymalizacji dla przykładowego centrum dystrybucyjnego obejmują:

Poziom strategiczny (liczba oraz lokalizacja magazynów związanych z centrum dystrybucyjnym, wybór grup produktowych, granice terytorialne obszaru obsługiwanego przez centrum dystrybucyjne, itp.).

Poziom taktyczny (struktura i wielkość floty pojazdów, okresowa zmiana planu tras, itp.)

Poziom operacyjny (kompletacja zamówień, optymalizacja załadunku, dynamiczne planowanie tras, zarządzanie magazynem wysokiego składowania itp.).

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że wspomniane efekty uzyskuje się "kosztem" tego, co dzieje się wewnątrz centrum dystrybucyjnego. Tam mianowicie trzeba zwieziony towar rozładować (np. z ciężarówek), czasem także rozpaletować, a następnie skompletować partie do wywozu (paletyzacja) i załadować je na środki transportu rozwożące towar do klientów. Dlatego nie przy każdej wielkości partii i dowolnej różnorodności towarów zagadnienie optymalizacji kosztów jest oczywiste.

Jednym z kilku problemów, który musi być rozwiązywany codziennie i występuje w centrach dystrybucyjnych (np. hurtowniach spożywczych, alkoholi itp.) jest problem rozdziału palet, polegający m.in. na odpowiednim przydziale palet do wybranych samochodów oraz sposobie ich dostarczenia (wybór tras) do odbiorców.

3. Model matematyczny

Model metamatematyczny problemu rozdziału palet został sformułowany w postaci zadania programowania liniowego całkowitoliczbowego[3, 4]. Jako funkcje celu przyjęto koszt transportu, który w wyniku optymalizacji jest minimalizowany.

Zmiennymi decyzyjnymi modelu (X_{jil}) są zmienne określające liczbę palet, które mają być dostarczone do danego punktu j poprzez rozwiezienie trasą i przez samochód l oraz ($Y_{i,l}$) liczba kursów samochodu l na trasie i. Funkcja celu posiada dwie składowe. Pierwsza określa koszt kursu na trasie i samochodu l i jest niezależna od liczby przewożonych palet. Druga zależy od liczby dostarczanych palet do danego punktu j trasą i przez samochód l. Ograniczenia modelu matematycznego (1) .. (6) można interpretować następująco. Ograniczenie (1) zapewnia, że każde zapotrzebowanie zostanie pokryte, tzn. każde miasto/punkt otrzyma tyle palet towaru ile zamawiało. Ograniczenie (2) zapewnia realizowalność danego przewozu bowiem ogranicza ilościowo załadunek na dany samochód do jego możliwości (pojemności/ładowności) oraz liczby kursów. Kolejne ograniczenie (3) zapewnia nie przekraczanie liczby kursów dla danego typu samochodu. Ograniczenie (4) wymusza przydział samochodów do tych tras gdzie został już przydzielony ładunek w postaci określonej liczby palet, tzn. wartość zmiennej decyzyjnej X_{jil} jest różna od zera. Ograniczenie (6) zapewnia czasową realizowalność dostaw. Ograniczenie (5) określa całkowitoliczbowość zmiennych decyzyjnych. Zaproponowany model uwzględnia również optymalizację tras, która jest uzyskiwana w sposób dynamiczny. W tym celu wprowadzono miasta/punkty, które należą do poszczególnych tras oraz uzależniono zmienną decyzyjną określającej wielkość zapotrzebowania X_{jil} również od konkretnych punktów dostaw.

W tabeli 1 przedstawiono wszystkie parametry modelu optymalizacyjnego oraz zmienne decyzyjne.

Tab. 1. Parametry oraz zmienne decyzyjne modelu matematycznego
Tab. 1. Parameters and decision variables for the mathematical model

Symbol	Opis
Indeksy używane w modelu	
j	indeks punktów dostaw
i	indeks tras
l	indeks typów samochodów
N	liczba miast
M	liczba tras doręczeń
O	liczba typów samochodów
Parametry modelu	
Z_j	zapotrzebowanie miasta *j* na palety (j=1..N).
D_{ji}	$\begin{cases} 1 \text{ jeśli miasto } j \text{ nalezy do trasy } i \\ 0 \text{ w przeciwnym wypadku} \end{cases}$ dla (j=1..N), (i=1..M)
K_l	pojemność samochodu typu *l* (w paletach) (l=1..O)
U_l	dopuszczalna liczba kursów samochodów typu *l* (l=1..O).
W_l	dopuszczalny czas kursów samochodów typu *l* (l=1..O).
C_{li}	koszt wysłania samochodu typu *l* (l=1..O) na trasę *i* (i=1..M)
E_{li}	czas kursu samochodu typu *l* (l=1..O) na trasie *i* (i=1..M)
B_{jil}	koszt obsługi miasta *j* (j = 1 .. N) na trasie *i* (i = 1..M) przez samochód typu *l* (l=1..O). (zmienny zależny od liczby palet).
Zmienne decyzyjne	
X_{jil}	część zapotrzebowania na palety miasta *j* (j=1..N)realizowana na trasie *i* (i=1..M) obsługiwana przez ciężarówkę typu *l* (l=1..O)
Y_{il}	liczba kursów ciężarówki typu *l* (l=1..O) na trasie *i* (i=1..M)

Funkcja celu – minimalizacja kosztów transportu

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{l=1}^{O} Y_{i,l} * C_{i,l} + \sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{l=1}^{O} X_{j,i,l} * B_{j,i,l}$$

przy ograniczeniach

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{l=1}^{O} X_{j,i,l} * D_{j,i} = Z_j \text{ dla } j = 1..N \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M} X_{j,i,l} \le U_l * K_l \text{ dla } l = 1..O \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{M} Y_{i,l} \le U_l \text{ dla } l = 1..O \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{N} X_{i,j,l} \le K_l * Y_{i,l} \text{ dla } i = 1..M, l = 1..O, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_{i,j,l} &\in C \text{ dla } j = 1..N, i = 1..M, l = 1..O, \\ Y_{i,l} &\in C \text{ dla } i = 1..M, l = 1..O, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{M} E_{i,l} Y_{l,l} \le W_l \text{ dla } l = 1..O \quad (6)$$

4. Przykłady liczbowe

Do implementacji modelu wykorzystano środowisko programowania w logice z ograniczeniami CLP (Constraint Logic Programming) - $ECL^iPS^{e.}$ [5]. Systemy klasy CLP są szczególną odmianą mechanizmów programowania w logice opartą również o paradygmat programowania z ograniczeniami. Środowisko CLP jest połączeniem dwóch paradygmatów programowania: programowania logicznego (Logic Programming) oraz programowania z ograniczeniami (Constraint Programming). W odróżnieniu od imperatywnych języków programowania, w których określona jest sekwencja poleceń do wykonania na podstawie algorytmu, w językach programowania opartego na logice specyfikuje się zestaw zależności, na podstawie których system dedukcyjny próbuje udowodnić zadane twierdzenie. Programowanie w logice z ograniczeniami CLP (Constraint Logic Programming) to dziedzina nauki, którą można ulokować pomiędzy sztuczną inteligencją, badaniami operacyjnymi oraz językami programowania. Model optymalizacji rozdziału palet został zaimplementowany w systemie $ECL^iPS^{e.}$ Uruchomiono go dla kilku serii danych. Dane do przykładów umieszczono w tab. 2 (informacje o zamówieniach klientów, trasach dostaw oraz kosztach realizacji dostaw) i tab. 3 (typy samochodów). Po dokonaniu implementacji modelu (1) .. (6) przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe tzn. rozwiązywano problem dla wielu zbiorów danych liczbowych. Eksperymenty przeprowadzono dla różnych typów samochodów (pojemności 6, 12 i 24 palet). Wyniki umieszczono w tab. 4. Poszczególne przykłady od P1 do P3 różnią się wartościami parametrów W i U. Parametr W określa dopuszczalny czas w którym muszą być zrealizowane kursy dla danego typu samochodu. Z jednej strony parametr ten związany jest z warunkami eksploatacji samochodów a z drugiej nieprzekraczalnymi terminami realizacji dostaw. Natomiast parametr U określa liczbę kursów dla danego typu samochodu co związane jest z liczbą samochodów, kierowców itp. Przeprowadzone eksperymenty umożliwiają odpowiedź między innymi na następujące pytania:

- Jaki jest optymalny koszt realizacji zamówień?
- Czy jest możliwa realizacja dostaw przy posiadanych zasobach w zadanym czasie?
- Jak wyglądają trasy dostaw odpowiadające optymalnym kosztom?
- Jakie trasy są przydzielone danego typu samochodu w celu realizacji dostaw przy optymalnym koszcie?
- Jakie jest zapotrzebowanie na samochody i kierowców?

Tab. 2. Dane liczbowe
Tab. 2. Numeric data

Zamówienia	
j	Z
1	20
2	8
3	18
4	6
5	5
6	8
7	14
8	6

Trasy			
j	i	j	i
1	1	5	3
1	2	5	4
1	3	5	5
2	1	6	1
2	2	6	3
2	4	6	5
3	1	7	2
3	2	7	3
3	4	7	4
4	3	8	1
4	4	8	2
4	5	8	3

Koszty stałe			
i	l	C	E
1	1	10	5
1	2	8	5
2	1	12	6
2	2	10	6
3	1	14	8
3	2	12	8
4	1	10	6
4	2	8	6
5	1	6	6
5	2	5	6

Koszty zmienne											
j	i	l	B	j	i	l	B	j	i	l	B
1	1	1	10	3	2	1	6	6	3	1	6
1	1	1	10	3	4	2	5	6	3	1	6
1	2	1	10	4	3	2	5	6	3	1	6
1	2	1	10	4	3	2	5	6	5	2	4
1	2	1	10	4	4	1	6	7	2	1	8
1	3	2	6	4	4	1	6	7	2	1	8
2	1	2	5	4	4	1	6	7	3	1	8
2	1	2	5	4	5	2	5	7	3	1	8
2	2	1	8	5	3	1	6	7	3	1	8
2	2	1	8	5	3	1	6	7	4	2	6
2	2	1	8	5	4	1	6	8	1	2	8
2	4	2	5	5	4	1	6	8	1	2	8
3	1	1	6	5	4	1	6	8	2	1	10
3	1	1	6	5	5	2	4	8	2	1	10
3	2	1	6	6	1	2	4	8	2	1	10
3	2	1	6	6	1	2	4	8	3	2	8

Tab. 3. Typy samochodów
Tab. 3. Vehicle types

Typy samochodów			
L	K	U	W
Przykład1 (P1)			
1	24	4	60
2	12	4	60
Przykład2 (P2)			
1	12	6	40
2	6	6	40
Przykład3 (P3)			
1	24	4	60
2	6	4	60

Tab. 4. Wyniki
Tab. 4. Results

j	i	l	X	j	i	l	X	j	i	l	X
P1 fc= 543				P2 fc= 608				P3 fc= 593			
1	3	2	20	1	1	1	2	1	1	1	2
2	1	1	8	1	3	2	18	1	3	2	18
3	4	1	18	2	1	1	8	2	1	1	8
4	3	2	2	3	4	1	18	3	1	1	18
4	5	2	4	4	5	1	6	4	3	1	5
5	5	2	5	5	4	1	4	4	5	2	1
6	1	1	5	5	5	1	1	5	5	2	5
6	5	2	3	6	1	1	8	6	1	1	8
7	3	2	2	7	4	1	2	7	3	1	14
7	4	2	12	7	4	2	12	8	1	1	6
8	1	1	6	8	1	1	6				

i	l	Y	i	l	Y	i	l	Y
P1			P2			P3		
1	1	1	1	1	2	1	1	2
3	2	2	3	2	3	3	1	1
4	1	1	4	1	2	3	2	3
4	2	1	4	2	2	5	2	1
5	2	1	5	1	1			

Najtaniej (fc=543) i przy użyciu najmniejszej liczby kursów (6) może być zrealizowana dostawa dla sytuacji z przykładu P1. Przykłady P2 i P3 wymagają większej liczby kursów oraz charakteryzują się większymi kosztami.

5. Wnioski

Zaproponowany model optymalizacyjny rozdziału palet jest kompletny i wpisuje sie w problematykę zagadnień optymalizacji w centrum dystrybucyjnym. Zaproponowany model dotyczy jedynie pewnego szczegółowego problemu dotyczącego spedycji. W analizowanym centrum dystrybucyjnym występuje wiele problemów, które można optymalizować. Jednak codzienna konieczność podejmowania decyzji dotyczących rozdziału palet i ich transportu do klienta wysuwa optymalizację kosztów podejmowania tych decyzji na pierwszy plan. Przedstawiony model może posłużyć również to symulacji kosztów przy założeniu różnych strategii spedycji, np. użycia większej bądź mniejszej liczby samochodów, zwiększenia różnorodności typów samochodów itp. W toku dalszych prac model zostanie rozszerzony m.in. optymalizacje tras wewnątrz centrum dystrybucyjnego, optymalizacje samego procesu załadunku itp.

6. Literatura

[1] Terzi S., Cavalieri S.: Simulation in the Supply Chain, Context: A Survery, Computers in Industry, vol. 53, no. 1, pp. 3–16, January 2004.

[2] Hieber R.: Supply Chain Management, A Collaborative Performance Measurement Approach, Zurich, VDF, 2002.

[3] Bradley S.P., Hax A.C., Magnanti T. L.: Applied Mathematical Programming Addison-Wesley Pub. Co. (Reading, Mass.), 1977.

[4] Sysło M.M., Deo M., Kowalik J.S.: Algorytmy optymalizacji dyskretnej z programami w języku PASCAL, PWN, 1993.

[5] Apt K., Wallace M.: Constraint Logic Programming using ECLiPSe. Cambridge,2007.

otrzymano / received: 26.10.2010
przyjęto do druku / accepted: 01.12.2010 *artykuł recenzowany*