

Jerzy GROBELNY*, Rafał MICHALSKI*

GENEROWANIE POCZĄTKOWYCH ROZWIĄZAŃ PRZEZ ALGORYTM SIŁ WIRTUALNYCH W PROBLEMACH LOGISTYCZNYCH: ROLA WARTOŚCI PARAMETRÓW I CHARAKTERYSTYK POWIĄZAŃ

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2017.072.05

W artykule zaprezentowano i omówiono wyniki dwóch eksperymentów symulacyjnych. Pierwszy z nich dotyczy wpływu wartości siły jednostkowej algorytmu sił wirtualnych na jakość rozwiązań wykorzystywanych następnie jako wejście do algorytmu CRAFT operującego na siatce regularnej w procesie optymalizacji rozmieszczania obiektów (*facility layout*). Analizy dokonano w odniesieniu do znanych wartości optymalnych badanych układów z wykorzystaniem dwóch różnych skal do określania połączeń między obiektami. W drugim eksperymencie analizowano wpływ gęstości powiązań między obiektami i relacji między siłą rozpraszającą i przyciągającą na skuteczność podpowiedzi generowanych przez algorytm sił wirtualnych. W przedstawionych projektach eksperymentalnych uwzględniono dwa rodzaje problemów (mały – 25 obiektów i duży 100 – obiektów) w dwóch typowych układach stosowanych w logistyce wytwarzania.

Słowa kluczowe: optymalizacja rozmieszczenia, logistyka, projektowanie ergonomiczne, elastyczne podejście, szkice rozproszone, CRAFT

1. WPROWADZENIE

Przedmiotem opisywanych badań jest analiza właściwości specyficznego podejścia do optymalizacji rozmieszczania obiektów (FLP – *facilities layout problems*). Zasadniczo problem FLP polega na poszukiwaniu takiego rozmieszczenia n obiektów w n dostępnych miejscach, aby minimalizować ogólny koszt funkcjonowania układu złożonego z tych obiektów wyrażony funkcją $Q = \mathbf{L}_{ij} \times \mathbf{D}_{ij}$.

* Wydział Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej.

W tym modelu L_{ij} – powiązania oznaczają np. liczbę operacji transportowych między obiektami i oraz j , a D_{ij} oznacza odległość między tymi obiektami w projekcie rozmieszczenia. Jak łatwo zauważyć, w praktyce taka analiza może dotyczyć zarówno układu wzajemnie powiązanych maszyn na hali produkcyjnej, jak i rozmieszczenia elementów interfejsu w układzie człowiek–maszyna. Bogaty przegląd modeli tego typu można znaleźć przykładowo w pracach (Kusiak, Heragu, 1987) oraz (Singh, Sharma, 2006).

Autorzy pracy (Grobelny et al. 2013) zaproponowali wykorzystanie algorytmu sił wirtualnych (Grobelny, 1999), tworzącego tak zwane szkice rozproszone (por. też: Drezner, 1980, 1987) do generowania wstępnych rozwiązań (podpowiedzi) dla klasycznego algorytmu CRAFT (Buffa, Armour, Vollmann, 1964). Zastosowanie podobnego podejścia w odniesieniu do rzeczywistych problemów logistycznych zostało także przedstawione w pracy (Michalski, Grobelny, 2014).

Idea algorytmu sił wirtualnych, inspirowana teorią wielkiego wybuchu, polega na symulacji zachowania się obiektów na płaszczyźnie projektowej pod wpływem wirtualnych sił: (1) działającej od środka obszaru w kierunku na zewnątrz (wybieranym losowo) i (2) działającej między każdą parą powiązanych obiektów iprzyciągającej te obiekty z siłą proporcjonalną do powiązań z macierzy L . Symulacja tego procesu polega na umieszczeniu wszystkich obiektów w środku obszaru, a następnie śledzeniu ich wędrówki wywołanej działaniem omawianych sił w czasie. Proces kończy się po uzyskaniu równowagi wszystkich sił w stosunku do wszystkich obiektów.

Uzyskiwany w tym procesie szkic rozproszony jest następnie mapowany na regularną siatkę i optymalizowany z wykorzystaniem algorytmu CRAFT. Algorytm ten jest wrażliwy na konfigurację wejściową rozmieszczanych obiektów. Ponieważ konfiguracja szkiców rozproszonych dla konkretnej macierzy L zależy od dwóch parametrów sterujących wędrówką obiektów pod wpływem sił wirtualnych, celem eksperymentów opisanych w tej pracy jest określenie wpływu tych parametrów na jakość uzyskiwanych podpowiedzi, mierzoną jakością (wartością funkcji celu) ostatecznych projektów rozmieszczeń.

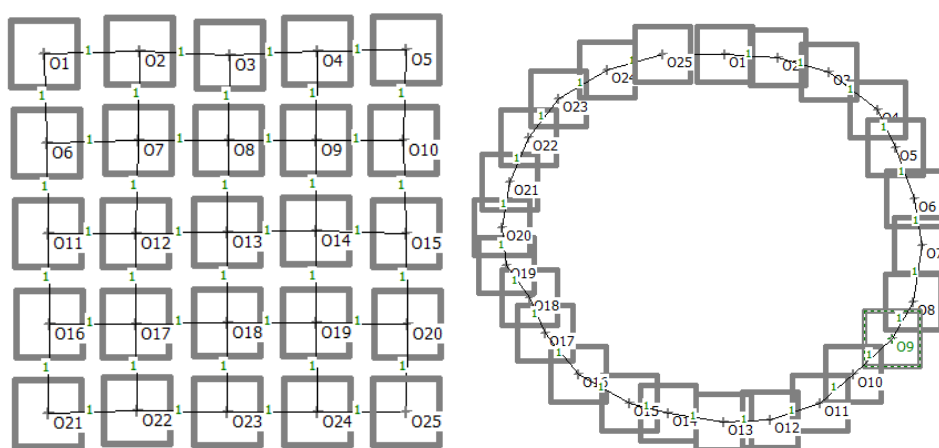
Tymi dwoma parametrami algorytmu sił wirtualnych są współczynnik siły jednostkowej oraz relacja sił rozpraszających i przyciągających. Siła jednostkowa określa procentową wartość przesunięcia się obiektu w jednym kroku algorytmu (w jednostce czasu) pod wpływem powiązania o wartości 1. Relacja sił rozpraszających i przyciągających to waga określająca procentowo stosunek siły rozpraszającej do przyciągającej.

W kolejnych punktach omówiono projekty dwóch eksperymentalnych badań symulacyjnych, omówiono wyniki i przeprowadzono ich analizę. Opracowanie kończy się podsumowaniem i sformułowaniem konkluzji.

2. WPŁYW RELACJI SIŁ I RODZAJÓW POWIĄZAŃ NA WYNIKI OPTYMALIZACJI

2.1. Projekt eksperymentu

W celu sprawdzenia, w jaki sposób wielkość wirtualnej siły jednostkowej z algorytmu sił wirtualnych wpływa na jakość podpowiedzi dla algorytmu CRAFT w różnych typach problemów, przygotowano trójczynnikowy eksperyment symulacyjny. Badane układy zostały zróżnicowane za pomocą (1) wielkości problemu, (2) rodzaju skali służącej do określania powiązań między obiektami i wreszcie (3) wartości siły jednostkowej. Każdy z tych trzech czynników był analizowany na dwóch poziomach. Wielkość problemu została zdefiniowana jako mała (25 obiektów) i duża (100 elementów). Wykorzystano dwa rodzaje skal: zero-jedynkową i odpowiadającą skali Likerta. Wariant zero-jedynkowy odzwierciedla sytuację, w której powiązane ze sobą obiekty powinny sąsiadować (wartość 1) lub w której taka konieczność nie występuje (wartość 0). Powiązania wyrażone na skali Likerta przybierały naturalne wartości od 1 do 7, przy czym wartość większa oznaczała większe powiązanie. Z sytuacją taką można mieć do czynienia wtedy, gdy relacje między obiektami są zróżnicowane i pochodzą np. z subiektywnych ankiet wypełnionych przez ekspertów i opartych na wykorzystaniu skali Likerta. Wartość siły jednostkowej, wyrażająca wielkość przemieszczenia obiektu w procentach długości przekątnej obszaru rozmieszczania w odpowiedzi na jednostkowe powiązanie, została ustalona na poziomach niskim i wysokim (odpowiednio, 5% i 10%). Wartości te wynikały ze wstępnych testowych badań symulacyjnych. Badaniu poddano układy obiektów często występujące w logistycznych rozwiązaniach produkcyjnych. Wykorzystano klasyczną aranżację kraty i okręgu, a przykładowy schemat takiego ułożenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe schematyczne układy w kształcie kraty i okręgu

Dla każdej kombinacji czynników niezależnych ($2 \times 2 \times 2 = 8$) wykonano po 30 przebiegów oddzielnie dla układów powiązań w aranżacji kraty i okręgu. Pojedyncza symulacja polegała na uruchomieniu algorytmu sił wirtualnych i wykorzystaniu uzyskanego położenia obiektów jako układu początkowego dla procedury CRAFT. Zmienną podlegającą optymalizacji była wartość funkcji celu wyznaczana jako suma iloczynów odległości typu Manhattan i powiązań pomiędzy każdą parą obiektów w układzie. W celu porównania wyników dla różnych układów i zweryfikowania istnienia potencjalnie istotnych interakcji badane układy zostały tak przygotowane, żeby można było określić optymalną wartość funkcji celu. Do analizy wariacji jako zmienną zależną przyjęto procentową odległość danego rozwiązania od wartości optymalnej. Przykładowo, dla wartości optymalnej 10 i wyniku optymalizacji 15 odległość ta będzie wynosić $(15 - 10)/10 = 50\%$.

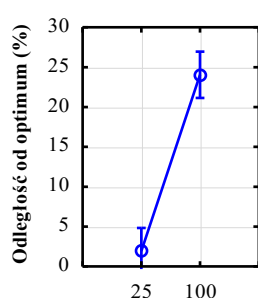
2.2. Analiza wyników i dyskusja

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych zostały poddane formalnej weryfikacji statystycznej za pomocą trójczynnikowej analizy wariacji przeprowadzonej oddzielnie dla wariantów kraty i okręgu. Rezultaty tej analizy zostały zestawione w tabeli 1. W przypadku obiektów z połączeniami w formacie kraty wyłącznie jeden główny czynnik – *wielkość problemu* – był statystycznie istotny. Dodatkowo statystycznie znacząca okazała się interakcja czynników *rodzaj skali* i *wartość siły* jednostkowej.

Tabela 1. Wyniki trójczynnikowej analizy wariacji wielkości problemu, rodzaju skali i wartości siły jednostkowej

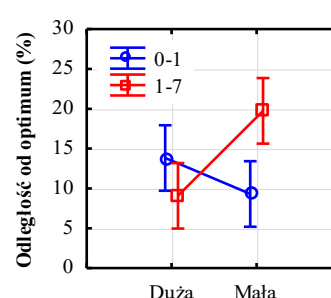
Czynnik	Kraty			Okrąg		
	F(1, 232)	p	η^2	F(1, 232)	p	η^2
Wielkość problemu (WP)	112	<0,0001*	0,33	732	<0,0001*	0,76
Rodzaj skali (RS)	1,9	0,17		283	<0,0001*	0,55
Wartość siły (WS)	2,2	0,14		6,1	0,014*	0,026
WP \times RS	0,14	0,71		121	<0,0001*	0,34
WP \times WS	0,035	0,85		12	0,0006*	0,05
RS \times WS	13	<0,0005*	0,054	3,7	0,057	
WP \times RS \times WS	3,7	0,054		0,11	0,74	
* p < 0,05						

Średnie wartości odległości od optimum dla tych wariantów zostały zilustrowane na rysunkach 2 i 3. Dane przedstawione na rysunku 2 świadczą o tym, że zastosowana procedura optymalizacji prowadzi do zdecydowanie lepszych rozwiązań w przypadku problemów stosunkowo niewielkich niż w przypadku dużych zagadnień. Wynik ten nie jest zaskoczeniem, gdyż złożoność problemów FL znacząco wzrasta wraz ze zwiększaniem się liczby obiektów i podobny wynik zapewne zostałby uzyskany z zastosowaniem innych algorytmów optymalizacyjnych.



Wielkość problemu

Rys. 2. Wpływ wielkości problemu na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla kraty



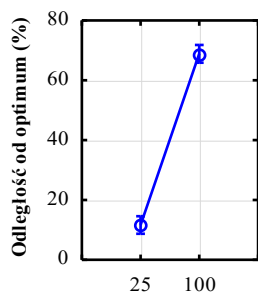
Wartość siły

Rys. 3. Wpływ interakcji wartości sił i rodzaju skali na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla kraty

Zdecydowanie ciekawsza wydaje się interakcja $RS \times WS$. Analizując rysunek 3, nietrudno zauważyć, że optymalna jednostkowa wartość siły w algorytmie sił wirtualnych jest inna dla powiązań zero-jedynkowych i dla powiązań wyrażonych na skali Likerta. W przypadku tych drugich lepsze wyniki uzyskuje się przez zastosowanie dużej jednostkowej wartości siły wirtualnej. W przypadku wariantu pokazującego wyłącznie konieczność występowania sąsiedztw sytuacja jest odwrotna: mniejsze średnie wartości odległości funkcji celu od optimum zanotowano dla małych wartości jednostkowej siły wirtualnej. Na podstawie weryfikacji różnic za pomocą LSD Fishera wykazano statystyczną istotność ($\alpha < 0,05$) między średnimi wartościami w przypadku wszystkich par analizowanych poziomów dla tej interakcji.

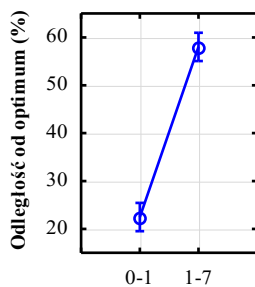
Wyniki trójczynnika analizy wariancji (*wielkość problemu* \times *rodzaj skali* \times *wartość siły*, rys. 4–6) dla badanych problemów rozmieszczania obiektów w układzie okręgu (tabela 1) świadczą o statystycznej istotności zarówno trzech głównych czynników, jak i dwóch interakcji: $WP \times RS$ (rys. 7) oraz $WP \times WS$ (rys. 8). Znaczenie wielkości problemu i rodzaju skali wykorzystanej do charakterystyki połączeń między elementami jest raczej zgodne z intuicją, gdyż w obu przypadkach mamy do czynienia ze zmianą złożoności analizowanego problemu. Należy jednak zauważyć, że ta intuicja została tylko częściowo potwierdzona dla układu kraty, gdzie czynnik użytej skali był nieistotny. Co również ciekawe, w odróżnieniu od układów w aran-

zacji kraty, interakcja pomiędzy rodzajem skali a jednostkową wartością siły w przypadku okręgów okazała się statystycznie nieważna. W tym przypadku symulacje wykazały, że niezależnie od przyjętej skali lepiej jest stosować duże wartości jednostkowej siły wirtualnej (rys. 6).



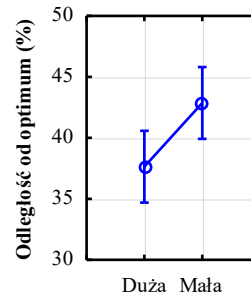
Wielkość problemu

Rys. 4. Wpływ wielkości problemu na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla okręgu



Rodzaj skali

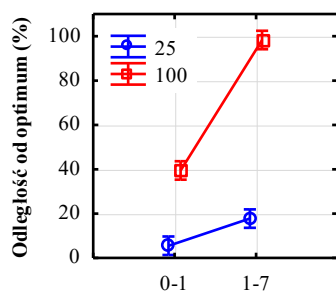
Rys. 5. Wpływ rodzaju skali na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla okręgu



Wartość siły

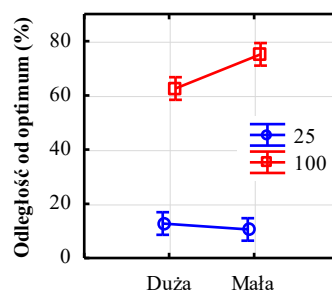
Rys. 6. Wpływ wartości siły przyciągającej na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla okręgu

Widoczne na rysunku 7 średnie odległości od wartości optymalnej dla danego rodzaju skali w zależności od wielkości problemu świadczą o tym, że pogorszenie wyników w związku z użyciem skali Likerta zamiast wariantu zero-jedynkowego jest znacznie większe w przypadku dużych problemów. Efekt ten wydaje się wynikiem nałożenia się dwóch czynników zwiększających złożoność analizowanych wariantów eksperymentalnych. Zgodnie z wynikami analiz LSD Fishera różnice między wszystkimi parami poziomów czynników są statystycznie znaczące ($\alpha < 0,05$).



Rodzaj skali

Rys. 7. Wpływ interakcji rodzaju skali i wielkości problemu na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla okręgu



Wartość siły

Rys. 8. Wpływ interakcji wartości jednostkowej siły wirtualnej i wielkości problemu na procentową odległość od optymalnej wartości funkcji celu dla okręgu

Wyniki interakcji $WP \times WS$ z (rys. 8) świadczą o tym, że ogólnie lepsze wyniki otrzymane dla dużych wartości jednostkowych sił wirtualnych prawdopodobnie mają związek z mniejszymi wartościami funkcji celu uzyskanymi dla dużych aranżacji. W przypadku prostszych wariantów wpływ wartości siły jednostkowej jest niezauważalny, co potwierdziła analiza LSD Fishera ($\alpha > 0,05$).

3. WPLYW RELACJI SIŁ I GĘSTOŚCI POWIĄZAŃ NA WYNIKI OPTYMALIZACJI

3.1. Projekt eksperymentu

Drugi eksperyment symulacyjny został zaprojektowany w celu sprawdzenia, w jaki sposób algorytm sił wirtualnych z różnymi relacjami sił rozpraszających i skupiających wpływa na optymalizację za pomocą procedury CRAFT dla różnych kombinacji wielkości problemów i gęstości powiązań. W tym badaniu skupiono się na układzie powiązań między obiektami w postaci kraty. We wszystkich warunkach eksperymentalnych relacje między elementami układu zostały wygenerowane losowo z zakresu skali Likerta od 1 do 7. Podobnie jak w pierwszym eksperymencie, również w tym przypadku badano dwie wielkości problemu (25 i 100 obiektów). Gęstość powiązań została określona na trzech poziomach: 5%, 10% i 20% wszystkich możliwych powiązań dla danej wielkości problemu. Wartości stosunku siły rozpraszającej do przyciągającej ustalono na poziomach: 50%, 70% i 90%. Wartości te wynikały ze wstępnych pojedynczych symulacji. Dla każdej kombinacji zmiennych niezależnych ($2 \times 3 \times 3 = 18$) wykonano serię 30 symulacji, a ich wyniki są przedstawione i omówione w następnym punkcie. Jako zmienną zależną przyjęto funkcję celu będącą sumą iloczynów powiązań i odległości wszystkich par elementów danego układu.

3.2. Analiza wyników i dyskusja

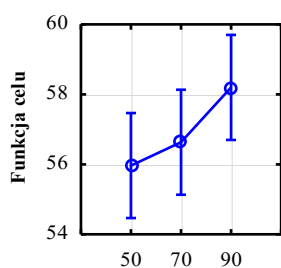
Ponieważ poziomy wartości funkcji celu różnią się znacząco w zależności od kombinacji wielkości problemu i gęstości powiązań, wykonano serię sześciu jedno-czynnikowych analiz wariancji i w każdej ze zmienną niezależną przyjęto relację między siłą rozpraszającą i przyciągającą. Rezultaty tych analiz zaprezentowano zbiorczo w tabeli 2 i zilustrowano na rysunku 9–14. Uzyskane wyniki świadczą o statystycznie istotnym ($\alpha = 0,05$) wpływie relacji między siłą rozpraszającą i przyciągającą na końcowe wartości funkcji celu w przypadku małych problemów z dużą gęstością powiązań (10% i 20%) oraz dużych problemów charakteryzujących się mniejszą gęstością powiązań między obiektami (5% i 10%).

W przypadku małych problemów z niewielką gęstością powiązań wzorzec zależności jest zbliżony do tych wariantów małych układów, w których gęstość zależności jest zdecydowanie większa. Choć czynnik jako całość jest nieistotny, to w badaniu *post hoc* LSD Fishera wykazano istotną różnicę ($\alpha < 0,05$) między relacjami sił wynoszącymi 50% i 90%.

Tabela. 2. Wyniki serii jednoczynnikowych analiz wariancji wpływu relacji sił rozpraszających i przyciągających na wartości funkcji celu dla różnych kombinacji wielkości problemu i gęstości powiązań

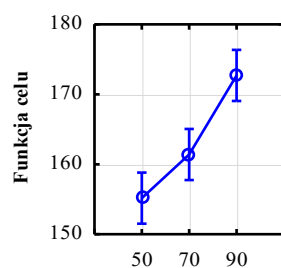
Wielkość problemu	Gęstość powiązań	F(2, 87)	p
25	5%	2,3	0,11
25	10%	23,4	< 0,0001
25	20%	11,5	< 0,0001
100	5%	25,4	< 0,0001
100	10%	21,2	< 0,0001
100	20%	1,8	0,18

Zaskakującą zależność można zaobserwować, analizując wynik uzyskany w przypadku 100 elementów i 20% gęstości powiązań. Z rysunku 14 wynika sugestia, że istnieje optymalna wartość relacji sił rozpraszających i przyciągających (70%), czego nie można zauważyć w wynikach analizy dużych problemów z mniejszą gęstością połączeń (rys. 12 i 13). Pomimo że czynnik jest statystycznie nieistotny, analizy *post hoc* (LSD Fishera) wykazały znaczącą różnicę między wartościami relacji sił dla par wariantów 70–50% oraz 70–90%.



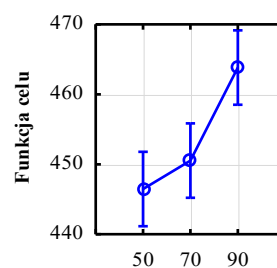
Relacja sił rozpr.
i przyciągającej

Rys. 9. Wpływ relacji sił rozpraszających i przyciągających dla 25 elementów i gęstości powiązań 5%



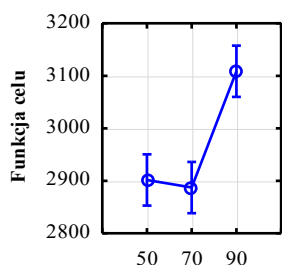
Relacja sił rozpr.
i przyciągającej

Rys. 10. Wpływ relacji sił rozpraszających i przyciągających dla 25 elementów i gęstości powiązań 10%



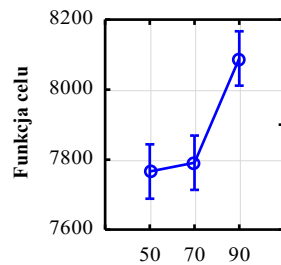
Relacja sił rozpr.
i przyciągającej

Rys. 11. Wpływ relacji sił rozpraszających i przyciągających dla 25 elementów i gęstości powiązań 20%



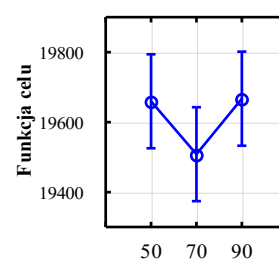
Relacja sił rozpr.
i przyciągającej

Rys. 12. Wpływ relacji sił rozpraszających i przyciągających dla 100 elementów i gęstości powiązań 5%



Relacja sił rozpr.
i przyciągającej

Rys. 13. Wpływ relacji sił rozpraszających i przyciągających dla 100 elementów i gęstości powiązań 10%



Relacja sił rozpr.
i przyciągającej

Rys. 14. Wpływ relacji sił rozpraszających i przyciągających dla 100 elementów i gęstości powiązań 20%

Średnie wartości funkcji celu dla wariantów obejmujących duże problemy z gęstością powiązań 5% i 10% wykazują niemal identyczne zależności. W obu przypadkach zdecydowanie najgorsze rezultaty uzyskano dla relacji sił 90%, a różnice między wariantami 50% i 70% okazały się statystycznie nieistotne ($\alpha > 0,05$)

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie badań wykazano istotny wpływ parametrów algorytmu sił wirtualnych na jakość projektów rozmieszczania obiektów, uzyskiwanych ostatecznie za pomocą klasycznego algorytmu CRAFT. Choć taka ogólna zależność była spodziewana, to konkretne relacje między badanymi parametrami algorytmu w określonych zadaniach nie są oczywiste. Uzyskane wyniki są zatem źródłem wiedzy niezbędnej dla potencjalnych użytkowników proponowanego podejścia. Są także inspiracją do dalszych badań eksperymentalnych mających na celu uzyskanie szerokiej wiedzy, która, zaimplementowana w wypracowanym przez autorów oprogramowaniu (na przykład w formie systemu ekspertowego), umożliwi właściwe projektowanie rozmieszczenia w różnych kontekstach praktycznych. Szczególnym obszarem badań może być zastosowanie generowania szkiców rozproszonych do podejść hybrydowych, opartych na innych (nowszych niż CRAFT) algorytmach rozmieszczania, takich jak metaheurystyki, np. algorytmy genetyczne.

PODZIĘKOWANIA

Praca została częściowo finansowo wsparta w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki numer: UMO-2011/03/B/HS4/04532.

LITERATURA

- Buffa, E.S., Armour, G.C., Vollmann, T.E. (1964). Allocating Facilities with CRAFT. *Harvard Business Review*, 42 (2), 136-158.
- Drezner, Z. (1980). DISCON: A New Method for the Layout Problem. *Operations Research*, 28 (6), 1375–1384. doi:10.1287/opre.28.6.1375.
- Drezner, Z. (1987). A Heuristic Procedure for the Layout of a Large Number of Facilities. *Management Science*, 33 (7), 907-915. doi:10.1287/mnsc.33.7.907.
- Grobelny, J. (1999). Some remarks on scatter plots generation procedures for facility layout. *International Journal of Production Research*, 37(5), 1119-1135. doi:10.1080/002075499191436.
- Grobelny, J. et al. (2013). The use of scatter plots for finding initial solutions for the CRAFT facility layout problem algorithm. In: Annual International Conference on Industrial, Systems and Design Engineering, 24-27 June 2013, Athens, Greece, *ATINER'S Conference Paper Series*. No: IND2013-0625.
- Kusiak, A., Heragu, S.S. (1987). The facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 29 (3), 229-251. doi:10.1016/0377-2217(87) 90238-4.
- Michalski, R., Grobelny, J. (2014). The role of initial solutions in craft and simulated annealing applied to real life logistics problems. *International Symposium on Marketing and Logistics (ISML 2014)*, 94-102, September 8-10, Nagoya, Japan.
- Singh, S.P., Sharma, R.R.K. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30 (5-6), 425-433. doi:10.1007/s00170-005-0087-9.

**GENERATING INITIAL SOLUTIONS BY A VIRTUAL FORCE ALGORITHM
IN LOGISTIC PROBLEMS: THE ROLE OF PARAMETERS' VALUES
AND RELATIONSHIPS' CHARACTERISTICS**

Summary

The paper presents and discusses two experimental simulation results. The first one concerns the influence of the unitary virtual force value of the virtual forces algorithm on the quality of solutions later used as inputs to the CRAFT algorithm operating on a regular grid. The analysis is conducted in relation to known optimal values of the examined layouts with two different scales used to define relationships between objects. The second experiment analyses the impact of the links' density and the dispersing to contracting force relationship on the effectiveness of prompts generated by the virtual force algorithm. The presented experimental designs take into account two sizes of problems: small – 25 and large - 100 objects in two arrangements typical in manufacturing logistics.

Keywords: logistics optimization, ergonomic design, flexible approach, scatter plots, CRAFT