

Streszczenie rozprawy doktorskiej
pt. *Zastosowanie sieci Petriego, technik agentowych oraz metod inteligencji obliczeniowej w planowaniu i sterowaniu produkcją*
mgr inż. Andrzej Bożek

Celem pracy było przygotowanie rozwiązań informatycznych, w szczególności wybór metod i narzędzi oraz opracowanie i przetestowanie algorytmów, przeznaczonych do wspomagania planowania i sterowania produkcją dla wybranego środowiska produkcyjnego, które ma postać systemu gniazdowego z maszynami równoległymi rozszerzonego o dodatkowe cechy: podział operacji na partie produkcyjne o zmiennym rozmiarze, indywidualne kalendarze dostępności maszyn, czasy przezbrojeń zależne od kolejności operacji oraz czasy transportu zależne od kolejności maszyn.

Opracowano opis formalny rozważanego problemu, nazwanego LSR-FJS (*Flexible Job Shop with Lot Streaming and Repacking*), i utworzono dla niego cztery modele: (a) grafowy, (b) w postaci sieci HTCPN (*Hierarchical Timed Coloured Petri Net*), (c) oparty na dedykowanym formalizmie MFM (*Material Flow Model*) i (d) zdefiniowany jako problem optymalnego spełnienia ograniczeń z użyciem zmiennych decyzyjnych przedziałowych i sekwencyjnych. Wykorzystując wprowadzone modele, opracowano algorytmy harmonogramowania off-line oraz harmonogramowania dynamicznego.

Do harmonogramowania off-line zastosowano metody inteligencji obliczeniowej. Dla modeli (a) i (c) przygotowano algorytmy typu TS (*Tabu Search*), przy czym, w przypadku rozwiązania opartego na modelu (c), wykorzystano dodatkowe mechanizmy usprawniające optymalizację: eliminację blokową i dedykowane procedury SILS (*Search Intensification Level Switching*) oraz FFD (*Fast Feasibility Detection*). W przypadku modelu (d), do optymalizacji użyto oprogramowania ILOG wspierającego technikę CLP (*Constraint Logic Programming*). Optymalizacja oparta na modelu (a) i algorytmie TS prowadziła w zadany czasie obliczeń do najmniejszych wartości funkcji celu, którą w pracy była długość harmonogramu. Zaletą rozwiązania bazującego na modelu (c) jest możliwość jego zastosowania do szerszej klasy problemów, w których przetwarzanie odbywa się w sposób ciągły. Technika CLP wyróżnia się natomiast brakiem konieczności implementowania dedykowanego algorytmu optymalizacyjnego i prostotą tworzenia oraz modyfikowania modelu.

Rozważono dwa warianty harmonogramowania dynamicznego, w pełni reakcyjny oraz reakcyjno-predykcyjny. W oparciu o model (b), wykorzystując formalizm HTCPN i oprogramowanie CPN Tools, utworzono kompletny model symulacyjny sterowania produkcją o organizacji LSR-FJS z użyciem reguł priorytetowych. W celu zbadania trybu harmonogramowania predykcyjno-reakcyjnego opracowano system prototypowy, w którym działanie środowiska produkcyjnego jest symulowane w czasie rzeczywistym za pomocą modelu (b), natomiast sterowanie realizuje system agentowy, oparty na platformie JADE. Optymalizacja w tym systemie odbywa się w sposób rozporoszony przez interakcje trzech rodzajów agentów (*machine, coordinator i connector*), przebiegające zgodnie z dedykowanym protokołem ECP (*Evaluation of Change Proposition*). Harmonogram nadzędny, utworzony wcześniej w trybie off-line, jest na bieżąco korygowany przez decyzje agentów inicjowane zmianami zewnętrznymi, takimi jak np. dodanie nowych zadań lub zmiany parametrów czasowych operacji. Dla trybu predykcyjno-reakcyjnego stwierdzono mniejszą efektywność optymalizacji, określoną przez wartości funkcji celu, niż w przypadku harmonogramowania off-line, ale większą w porównaniu do reguł priorytetowych. Eksperymenty symulacyjne wykazały również, że rozważany algorytm jest w stanie poprawić harmonogram zaburzony przez nioczekiwane awarie maszyn.

W ramach badań opracowano modele problemu produkcyjnego oraz algorytmy i systemy harmonogramujące, a także przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe, których wyniki pozwalają na ocenę zaproponowanych rozwiązań. Otrzymane rezultaty mogą być przydatne w tworzeniu praktycznych aplikacji wspomagających planowanie i sterowanie produkcją.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów i czterech dodatków. Rozdziały zawierają kolejno: (1) wprowadzenie, w którym przedstawiono problem badawczy, aktualny stan wiedzy na jego temat, cel, tezę i zakres pracy, (2) opis formalny problemu i jego modeli, (3) omówienie algorytmów harmonogramowania off-line i (4) systemów harmonogramowania dynamicznego, w pełni reakcyjnego i predykcyjno-reakcyjnego, (5) podsumowanie, w którym usystematyzowano najważniejsze rezultaty i wskazano ich wartość praktyczną oraz podano możliwe kierunki dalszych badań.

Andrzej Bożek

Summary of the doctoral dissertation
titled *Using Petri nets, multi-agent techniques and computational intelligence methods in production planning and control*
(in Polish: *Zastosowanie sieci Petriego, technik agentowych oraz metod inteligencji obliczeniowej w planowaniu i sterowaniu produkcji*)
Andrzej Bożek, MSc

The aim of the dissertation is to develop computer science solutions, especially selection of methods and tools, as well as implementation and verification of algorithms, for supporting production planning and control in a chosen manufacturing environment. The environment has the form of the flexible job shop system extended by additional features, such as: lot streaming with variable size sub-lots, individual machine availability calendars, sequence-dependent setup times and route-dependent transport times.

The considered problem, named as *Flexible Job Shop with Lot Streaming and Repacking* (LSR-FJS), and its formal description have been introduced. Four models have been developed for the problem: (a) graph model, (b) representation in the form of *Hierarchical Timed Coloured Petri Net* (HTCPN), (c) model based on a dedicated *Material Flow Model* formalism (MFM), and (d) optimal constraint satisfaction representation with interval and sequence decision variables. On the basis of the introduced models, off-line scheduling and dynamic scheduling have been considered.

Computational intelligence methods have been used for off-line scheduling. Algorithms based on *Tabu Search* (TS) metaheuristics have been implemented for the models (a) and (c). In the case of the model (c), additional mechanisms improving optimisation have also been applied, namely: block elimination property, *Search Intensification Level Switching* (SILS), and *Fast Feasibility Detection* (FFD). *Constraint Logic Programming* (CLP) and ILOG software have been used for optimisation based on the model (d). The solution obtained with the model (a) leads to the smallest values of the makespan criterion in a given amount of computational time. The main advantage of the method based on the model (c) is its usability for a broad class of manufacturing systems with continuous processing. It is distinctive of CLP method that there is no need for development of a dedicated optimisation algorithm, and a model of a problem can be relatively easily created and modified.

Dynamic scheduling algorithms, completely reactive and predictive-reactive, have also been developed. On the basis of the model (b), using HTCPN formalism and CPN Tools software, a simulation model of LSR-FJS system controlled by dispatching rules has been implemented. For research on the predictive-reactive scheduling, a prototypical system has been developed in which the model (b) is used for simulation of the manufacturing environment in real time and control is performed by *Multi-Agent System* (MAS) implemented using JADE software. The optimisation process is distributed and it is based on interactions of three types of agents (*machine*, *coordinator* and *connector*). The interaction rules have been defined by a dedicated *Evaluation of Change Proposition* (ECP) protocol. A master schedule, created previously by off-line scheduling, is constantly adjusted by decisions of agents, initiated by external changes, such as release of new jobs or changes of time-related parameters. The predictive-reactive scheduling has been observed to have worse efficiency, expressed by the value of makespan, than the off-line scheduling, but better than the completely reactive mode. It has also been demonstrated by simulation experiments that the algorithm can improve a schedule disturbed by unforeseen breakdowns of machines.

The models of LSR-FJS production problem, as well as the scheduling algorithms and systems dedicated for them have been developed in the dissertation. The results of conducted computational experiments make it possible to verify and evaluate the solutions. The proposed solutions can be useful for development of practical applications supporting production planning and control.

The dissertation consists of five chapters and four appendixes. The chapters include: (1) introduction, in which the research problem is presented, the state-of-the-art is described, as well as the goal, thesis and scope of the dissertation are set out, (2) formal description of the problem and its models, (3) description of the off-line scheduling and (4) dynamic scheduling algorithms, a completely reactive and predictive-reactive, and (5) conclusion, in which main results of the dissertation are summarised, their practical usefulness is described and future work is proposed.

Andrzej Bożek