

Formal Integration of Process Planning and Shop Floor Control With Petri Nets

Lee, Kyung Huy
Department of Industrial Engineering
KyungPook SanUp University

Abstract

This paper presents the formal integration of process planning and shop floor control with Petri net formalism. Formal integration means that both planning and control problems can be modeled, interfaced, and transformed with the Petri net formalism. This integrated framework provides a systematic approach for rapidly developing a formal shop floor controller from process planning with respect to shop floor configuration.

I. Introduction

최근 생산시스템의 자동화가 진전됨에 따라 생산하고자 하는 제품의 설계사양을 만족하는 생산공정을 계획 (Process Planning, 이하 PPG 로 언급)하고 생산공정계획 및 생산시스템의 특성을 가능한한 빠르게 반영하여 생산을 계획하고 통제(Shop Floor Control, 이하 SFCR 로 언급)하는 일은 컴퓨터통합생산을 연구함에 있어 이제 가장 중요한 기술 가운데 하나로 인식되고 있다. 이에 따라 지금까지는 PPG 와 SFCR 이 별도의 문제로서 순차적으로 시도되어, 생산시점의 상황을 정확히 반영하지 못한 공정계획(Process Plan, 이하 PPN 으로 언급)으로 인해 잦은 계획의 변경이나 재계획, 또는 특정설비들의 과부하 등의 문제점들이 제기되고 있다(Lenderink and Kals 1993). 이에 따라 공정을 계획하고 이를 실행하는 일을 서로 밀접한 관련을 가진 통합문제로 인식하고 이에 맞는 통합개념이나 통합구조를 제시하고자 하는 연구들이 동적공정계획(Dynamic Process Planning), 비선형공정계획(Nonlinear Process Planning), 동시공정계획(Concurrent Process Planning), 또는 분산공정계획(Distributed Process Planning) 등의 이름으로 일부 시도되고 있다.

본 연구에서는 PPG 와 SFCR 기능의 '데이터 인터페이스에 의한 통합'의 한 형태로서 페트리네트를 단일 형식론으로 사용하여 PPG 와 SFCR 을 형식적으로 통합(Formal Integration)한 모형을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시한 형식적 통합모형은 PPG, PPN, Shop Floor Configuration (이하 SFCG 로 언급), SFCR 모두를 페트리네트에 의해 모델링하고 이들 모델들간에 전환성(transformativeness)을 갖는 것을 의미한다. 이와같이 형식적으로 통합된 모형은 각 모듈에 있어서는 개발에 사용할수 있는 참조모델로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라 페트리네트의 수학적 분석능력을 바탕으로하여 시스템을 분석할 수 있다는 잇점을 가지고 있다. 또한 각 모듈간 데이터 인터페이스에 의한 결합성(compatibility)을 용이하게 하고, 통합 모형에서의

상호 전환성을 이용하여 PPN 으로부터 SFCG 를 고려한 SFCR 의 Rapid Prototype 을 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다.

II. Formal Integration of PPG & SFCR

전술한 바와 같이, 최근까지 PPG 와 SFCR 은 별개문제(stand-alone problems)로 시도되어 왔으나, 이러한 접근방법에서는 실제 작업시점에서의 현장상황이 고려되지 않고 주로 기술적인 최적화에 의해 선정된 PPN 이 실질적으로 일정계획 및 SFCR 에서 작업공정의 종류, 순서 및 자원의 효율적인 의사결정을 제한하여 결과적으로 생산시스템의 최적화에 상당히 나쁜 영향을 갖는다. 이는 효율적 생산 시스템의 구축이란 측면에서 볼때, PPG 와 SFCR 은 서로 밀접한 관련을 갖는 문제(interrelated problem)라고 할 수 있다. 하지만, PPG 는 기본적으로 계획문제로서 방대한 지식의 탐색을 필요로 하는 문제인데 반해 SFCR 은 현장에서의 동적 상황을 반영해야하는 실시간 통제(Real-time Control) 문제로서, 서로 상반된 특성을 갖고 있다. 이를 하나의 완전한 통합시스템으로 구현하는 것은 현실적인 면에서 볼때 실현가능성과는 상당한 거리가 있다. 본 연구에서는 PPG 와 SFCR 의 통합접근방법으로서 단일 형식에 의한 통합모형을 제시한다. 페트리 네트를 단일 형식으로 한 PPG 와 SFCR 의 형식적 통합은 다음과 같이 정의된다:

[정의 1 - 형식적 통합(Formal Integration)]

데이터 입출력 또는 의사결정에 서로 관련을 갖는 모델들($M_i, i=1, \dots, n, n \geq 2$)의 형식적 통합은 다음과 같이 정의한다:

- i) $(\forall i), M_i \equiv \text{FormalModel}_i$. 즉, M_i 는 의사결정을 지원하는 형식적 모델(Formal Model)을 갖는다,
- ii) $\text{UnifiedForm}(\text{FormalModel}_i, \forall i)$. 즉, M_i 의 형식은 단일 형식론에 의해 표현되어야 한다,
- iii) $\text{Transformative}(\text{FormalModel}_i \Rightarrow \text{FormalModel}_j)$. 즉, 데이터 또는 의사결정의 흐름방향($M_i \Rightarrow M_j$)으로 M_i 의 형식모델은 M_j 의 형식모델로 전환될 수 있어야 한다.
- iv) $\text{IntegratedDecision}(M_i, \forall i)$. 즉, 시스템의 Global 최적화 측면에서 각 모델의 의사결정구조는 통합된 개념에 의해 이루어져야 한다.

그림 1 은 본 연구에서 제시한 형식적 통합 개념을 그림으로 제시한 것이다.

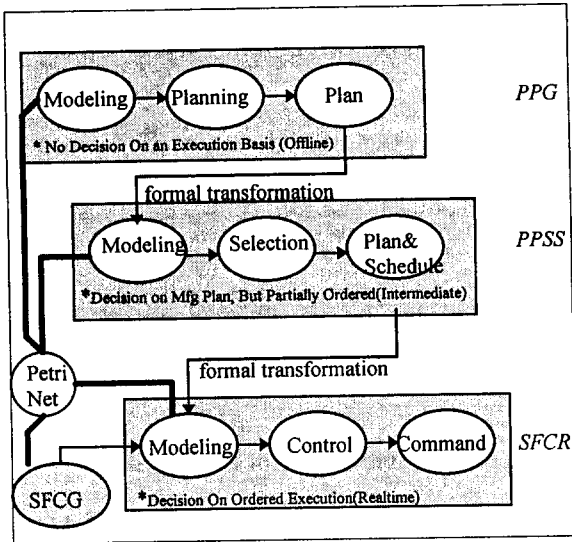


그림 1. PPG 와 SFCR 의 형식적 통합

이상에서 정의한 형식적 통합은 결국 모델형식의 통합과 이에따른 의사결정구조의 통합으로 요약할 수 있다. 이는 시스템을 구현할때 형식적 참조모델로서 활용할 수 있을 뿐만 아니라 시스템간 데이터나 의사결정의 인터페이스 측면에서 표준화, 형식화가 가능하고 이에 따른 모델의 생성이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 제시한 PPG 와 SFCR 의 형식적 통합모형은 표 1 에서와 같이 크게 3 개의 모듈로 이루어져 있는데, 각 모듈의 기능은 다음과 같다:

- 1) PPG 모듈: PPG 에서는 유연공정계획을 생성한다. 이를 위해 기술적인 제약사항을 반영한 공정순서와 기술적으로 가능한 Resources 를 결정한다.
- 2) PPSS 모듈: 여기서는 PPN 의 여러 대안들로부터 현장의 상황을 반영한 최적의 PPS 를 선정한다.
- 3) SFCR 모듈: 부분적으로 순서화된 PPS 로부터 실시간으로 기계상태를 반영하여 대상작업과 기계를 선정하는 dispatching 을 포함하여 Shop Floor 의 통제업무를 담당한다.

표 1. 형식적 통합시스템의 구조

항목 모듈	Description	BasicForm	Input	Output
PPG	Generate Alternative Process Plan w.r.t. Processes & Sequences	Ordinary PN (OpSeq & Logic Nodes)	FeatureData Knowledge Base(Net)	PPN AND/OR Net (Setup & Op Requirem't)
PPSS	Select Resources, Executable Process Plan & Schedule w.r.t System Status	Timed PN	PPN SystemDB	PPSS AND PN
SFCR	Select Real-time Jobs(Parts&Process) & Control Shop Floor w.r.t Resource Status	Colored, TimePN (SFCG & Control Logic Pattern)	PPSS ResourceDB	Control Commands

III. Petri Net Models In Formal Integration

본 연구에서 제시한 형식적 통합모형을 구현하기 위해 Petri net 형식을 사용하여 표현한 모델들은 다음과 같다:

- (i) Process Planning Model (PPG Model),
- (ii) Process Plan Model (PPN Model),
- (iii) Process Plan & Schedule Selection Model (PPSS Model),
- (iv) Process Plan & Schedule (PPS Model)
- (v) Shop Floor Configuration Model (SFCG Model),
- (vi) Shop Floor Control Model (SFCR Model).

각 모델은 페트리넷 형식을 기본형식(syntactic basis)으로 하고 여기에 각자의 의미(semantics), 예를 들어 유연성(또는 다중성), 순서논리, 포함관계(이상 PPG/PPN), 시간성, 자원공유성(resource share problem)(이상 PPSS/PPS), 물리적 다층구조, 물리적 요소들간 기능적 관계(이상 SFCG), 또는 각 물리적 요소의 제어논리(control logic pattern), 물리적 요소들간 제어관계(이상 SFCR) 등의 개념들이 가미되어 표현된 것이다.

먼저 PPG 와 PPN 모델의 정의는 다음과 같다:

[정의 2 - 공정계획(PPG/PPN Model)]

PPG Model:

형식적 통합에서의 PPG 는 기본적으로 각 class feature 에 대한 공정진행과정을 묘사한 넷모델(Net Model of Process Progress, PRM)에서의 Local Instantiation(INS)과 Global Synthesis(SYN)에 의해 정의된다. 즉, PPG 는

$$PPG := (PRM_{CF}, INS_{IF}, SYN_{FR}, RES_{PR}). \text{ 단,}$$

PRM_{CF} = Ordinary Petri net with Process State Places & Process Enabling Places, for each class feature(CF),

INS_{IF} = Instantiation of an instance feature of PRM, IF, $F_i \in CF$ (This results in Local Process Net(LPN) of F_i , $LPN \in PRM - \{Process\ Enabling\ Places\}$).

SYN_{FR} = Synthesization of LPN by means of a sequence logic of feature-to-feature relations (This generates Global Process Net(GPN) of a part, $GPN \in PRM - \{Process\ Enabling\ Places\}$),

RES_{PR} = Selection of Resources by modeling technical requirements for performing each process, PR $RES_{PR} \in GPN.place.attribute$,

을 의미한다.

PPN Model:

공정계획의 데이터모델인 PPN 은 GPN 의 각 place 노드에 setup 및 operation 에 관한 Process Resource 가 place attribute 로서 표현된 형식으로 표현된다 (즉, $PPN := GPN$ with RES_{PR} as place attributes).

PPN의 동적모델 형식이라 할 수 있는 PPSS의 Petri net 모델은 다음과 같이 정의된다:

정의 3 - 공정 및 일정계획 선정(PPSS/PPS Model)

PPSS Model:
 형식적 통합에서의 PPSS는 하나의 production order에 대응하는 작업에서 하나의 batch를 구성하는 multi-parts production의 1 사이클을 Job 단위로 모델링(Production Progress Model, PPM)한 것이다. PPSS는 다음과 같이 정의된다:

$$PPSS = (PPM_{MP}, MPSS_{MP}, PPS_{MP}). \text{ 단,}$$

PPM_{MP} = Timed Petri net with Process State Places, Resource State Places, & Process Duration Functions, for multi-parts production,

$MPSS_{MP}$ = Generation of all feasible process plans and schedules (MPSS),

PPS_{MP} = Selection of a process plan and schedule (PPS) of each part. This PPS is optimized from MPSS with respect to selection criteria dependent to resource status at that time.
 PPS is also a partially ordered PPM in which all conflicts are resolved, that is, $PPS \in PPM\text{-}\{OR\text{-}type\text{ transitions}\}$.

이상과 같이 PPSS 모델에서 선정된 PPS에서 각 공정의 작업내용은 사실상 모두 결정되었으나 작업의 최종실행 순서는 이후 SFCR 모델에서 Resource Status (주로 Resource Availability)를 고려하여 실시간으로 결정된다.

SFCG를 포함한 SFCR의 정의는 다음과 같다:

[정의 4 - SFCG/SFCR Model]

SFCR Model:
 형식적 통합에서의 SFCR은 기본적으로 Shop Floor에서 발생하는 dynamic event에 대한 모델링이다. 이는 크게 Part/Process Progress, Shop Floor에서의 Physical Entities & Their Relation, 및 이들(Process & Physical Entity)간의 Synchronization으로 구성된다. SFCR은

$$SFCR = (PPS, SFCG, CLP, \delta). \text{ 단,}$$

PPS = Process Plan & Schedule delivered in PPSS,

$SFCG_{SF}$ = Physical Composition & Relation Model of Shop Floor, SF,

CLP_{PE} = Control Logic Pattern of each physical entity, $PE \in SFCG(CLP \in OPN)$,

δ = A mapping function from class PE to class CLP, $PE \rightarrow CLP$.

SFCG Model:
 SFCG는 Shop Floor의 물리적 모델로서 물리적 요소들과 이들간의 Composition Hierarchy($V_Relation$), Functional Relation($H_Relation$)에 의해 모델링된다.

SFCG의 정의는 다음과 같다:

$$SFCG = (PE, V_REL_{PE}^{PE}, H_REL_{PE}^{PE}, REE, \rho). \text{ 단,}$$

PE = Physical Entity in ShopFloor such as Cell, WorkStation, or Machine,

$V_REL_{PE}^{PE}$ = Hierarchical Composition Relation,

$H_REL_{PE}^{PE}$ = Functional (Activity) Relation between PEs on the same level such as MoveFrom(MoveTo), Wait, Load, Unload etc.,

REE_{PE}^{PE} = Relation Entity(Constant or Variable Relation Entity),

ρ = A mapping function from REL to REE, $REL \rightarrow REE$.

IV. Generation & Transformation Process

페트리네트에 의한 형식적 통합과정에 있어 첫번째 단계는 주어진 part를 가공하기 위한 유연성을 가진 공정계획(Flexible Process Plan)을 생성하는 일이다. 여기서 유연성은 작업공정 및 순서에 있어서의 다중성을 의미하며 형식적으로 AND/OR Petri net으로 표현된다. 본 연구에서의 PPG는 공정 선정 및 순서 등에 관한 지식을 Petri net에 의한 지식모델(정의 2) 형태의 지식베이스로 구축한 상태에서 출발한다.

PPG의 개략적인 과정은 다음과 같다:

GENERATE (PPN) {
 /* Generate PPN from feature-based part data, Knowledge base (PRM), Resource DB */
 (i) Generate setup processes by grouping features;
 (ii) Instantiate Local Process Net(LPN) for each Feature, F_i from PRM of the class feature of F_i ;
 (iii) Generate GPN by synthesizing LPNs based on a sequencing logic due to feature-to-feature and setup-to-setup relations;
 (iv) Make machine, fixture, tool, and parameter requirements for performing all setups and operations;
 (v) Query ResourceDB and then specify resources by the requirements;
}

PPG로부터 생성된 PPN 델은 유연공정계획으로서 많은 작업 방법 및 작업순서에 관해 기술적으로 가능한 대안이 포함되어 있다. PPN은 PPSS의 전처리과정으로서 PPSS 모델(정의 3)로 변환하게 되는데, 변환과정은 다음과 같다:

TRANSFORM (PPN→PPSS) {

/* Transform PPN into PPSS which is a timed Petri net model for selecting an optimized process plan and schedule */

(i) Split a PR place, p , into multiple activity nodes,

$$P_{start} \rightarrow OR(t_{process}^{m1}, \dots, t_{process}^{mn}) \rightarrow P_{end}$$

(ii) Group nodes(places and transitions) in unit of setup or machine transition;

(iii) Insert resource places and then link the corresponding processing transitions into them;

}

PPSS는 PPN의 TPN Model로서 Job 단위의 동적의사결정에 적합한 구조로 변환된 것이다. PPSS에서 PPS를 선정하는 과정은 다음과 같다:

GENERATE (PPS) {

/* Generate PPS from PPSS by the criteria in which system status like machine loading is considered */

(i) Generate MPPS by means of a T-INVARIANT analysis of PPSS model;

(ii) Optimize PPS satisfying constraints, with respect to selection criteria;

}

PPSS에서 생성된 PPS는 하나의 batch production에 필요한 모든 활동을 포함하고 있다. 통합모형의 마지막 단계는 PPS의 모든 활동을 실시간으로 순서화하고 이에 따라 Shop Floor를 통제하기 위해 SFCR을 PPS와 SFCG로부터 변환하는 것이다. 이를 위한 변환과정은 다음과 같다:

TRANSFORM (PPS & SFCG→SFCR) {

/* Transform PPS and SFCG into SFCR for the real-time decision on dispatching and control */

(i) Substitute SFCG by the corresponding CLP;

(ii) Synchronize PPS and SFCG with respect to part/process status and machine status;

}

이와같이 공정계획과 Shop Floor Configuration의 Modular Fusion에 의해 생성된 SFCR은 이후 Shop Floor의 실시간 의사결정을수행하는 Software Control Platform으로서 사용된다.

V. Concluding Remarks

본 연구에서는 페트리 네트를 기본 형식으로 하여 공정 계획, 일정계획 및 Shop Floor Control 문제를 형식적으로 통합하는 방법을 제안하였다. 통합모델에서는 단일형식이라는 통합적 관점에서의 장점 이외에도 공정 계획, 일정 계획 그리고 Shop Floor Control의 각 모듈내에서 유연성을 효과적으로 표현하고 이를 생성할수 있는 방법도 아울러 제시하였다.

본 연구결과는 이후 a) 통합시스템으로서의 CASE tool의 구현 기술과, b) Shop Floor Controller의 Rapid Prototyping 기술 개발에 활용해 나갈 예정이다.

References

1. H.Cho, A.Derebail, T.Hale, and R.A.Wysk, "A Formal Approach to Integrating Computer Aided Process Planning and Shop Floor Control," *ASME Transactions: Journal of Engineering for Industry*, V.116 (1994)
2. S.B.Joshi, E.G.Mettala, and R.A.Wysk, "CIMGEN-A Computer Aided Software Engineering Tool for Development of FMS Control Software," *IIE*, V.24 N.3 (1992)
3. N.E.Larson and L.Altng, "Dynamic Planning Enriches Concurrent Process and Production Planning," *Int.J. of Production Research*, V.30 N.8 (1992)
4. S.Lee, R.A.Wysk, and J.S.Jones, "Process Planning Interface for a Shop Floor Control Architecture for Computer-Integrated Manufacturing," *Int.J. of Production Research*, V.33 N.9 (1994)
5. Lenderink and Kals, "The Integration of Process Planning and Machine Loading in Small Batch Part Manufacturing," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, V.10 N.1-2 (1993)
6. A.W.Naylor and R.A.Volz, "Design of Integrated Manufacturing System Control Software," *IEEE SMC*, V.17 N.6 (1987)
7. K.Srihari and T.J.Greene, "MACRO-CAPP: A Prototype CAPP System for FMS," *Int.J. of Advanced Manufacturing Technology*, V.5 (1990)
8. H.K.Tonshoff, U.Beckendorff, and M.Schaele, "Some Approaches to Represent the Interdependence of Process Planning and Process Control," *19th International Seminar on Manufacturing Systems* (1987)
9. H.Zhang, "IPPM: A Prototype to Integrate Process Planning and Job Shop Scheduling Functions," *Annals of the CIRP*, V.42 N.1 (1993)