タスクの到達度とタスク間の整合度の多目的最適化による 設計プロジェクト計画法に関する研究

Design Process Planning by Multi-Objective Optimization of Technical Performance and Product Integrity

○堀之内 貴大 (大阪大) 正 松安 亮典 (大阪大)
正 野間口 大 (大阪大) 正 藤田 喜久雄 (大阪大)

Takahiro HORINOCHI, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, JAPAN

Ryosuke MATSUYASU, Osaka University

Yutaka NOMAGUCHI, Osaka University

Kikuo FUJITA, Osaka University

The importance of flexible and optimal planning of engineering design process is increasingly recognized in today's competitive environment. Because a product consists of a lot of subsystems, an engineering design process consists of two different activities, i.e., an activity to enhance the technical performance level of each subsystem, and an activity to enhance the integrity among the subsystems. When considering the limitation of resources, there is a trade-off between the achievement probabilities of those activities. This paper proposes a new optimization method of design process planning that aims at a Pareto-optimal achievement of individual technical performances and total product integrity. A planning of design process is a complicated optimization problem including a number of various design variables and various evaluation indices. In order to solve this problem with a reasonable computation cost, this research separates the optimization problem into two sub problems, i.e., (i) defining of process architecture and organization structure and (ii) scheduling of resource allocation into activities. A growth curve model with a fuzzy number is used to evaluate the achievement probability of technical performance and its total integrity. This paper demonstrates its application to a student design project. A proposed optimization method facilitates a project manager to explore various process plans, to assess their risks, and decide a temporary plan.

Key Words : design process planning, product development, project management, design process modeling, optimization, design structure matrix

1 緒言

設計開発プロジェクトは少なくとも何らかの面において新たな製品を開発する試みである。したがって、プロジェクトの目標を達成するためには、その計画段階において目標に合わせて新たに組織を編成したり、リソースの配分を調整することも必要となる。今日、市場の競争力を高めるためにはそのように柔軟で最適なプロジェクト計画を行うことがますます重要となっている。

本報ではプロジェクトマネージャーの意思決定を支援するために、製品を構成する個々のサブシステムの設計の到達度とそれらの整合度の2つの目的関数の下でのパレート最適解を得ることを目的とした設計プロジェクト計画の新たな最適化法を提案する。設計プロセスは知識創造のプロセスであり、そのモデルを構築することが一つの課題である。本研究では先行研究⁽¹⁾で提案したファジィ数を用いた成長曲線による設計到達度モデルを用いて問題の定式化を行う。設計プロセス計画は多くの設計変数を含んだ非常に複雑な最適設計問題となっている。このような複雑な問題を適切な計算コストで解くために、本研究では設計組織の決定とリソース配分の決定の2つの部分問題に分解して計算を行う。また多目的最適化問題を解くために近傍培養型遺伝的アルゴリズム (NCGA)⁽²⁾を用いる。

提案手法を学生フォーミュラプロジェクト⁽³⁾の計画問題に適用し検証を行う。

2 研究背景とアプローチ

2.1 設計プロセスの構造 製品は複数のサブシステムから構成され、サブシステムの設計にはそれに関する各種の工学知識が求められる。こうした複雑な製品を効率良く設計するには、複数の設計者による協調作業を行うことが必要である。本研究では個々の設計者が担当する設計プロセスの作業の一部をタスクと呼ぶ。一般にタスクは製品のサブシステムに対応して定義することができる。タスク間には情報の流れや、実行手順などにより表記される相互関係が存在する⁽⁴⁾。このようなタスク間の相互関係の構造をプロセス構造と呼び⁽⁵⁾、図1のようなネットワークにより表すことができる。多くの研究者がプロセス構造のモデルを提案している。たとえば、IDEF0⁽⁶⁾やDSM(Design Structure Matrix)⁽⁷⁾、DMM(Domain Mapping Matrix)、Petri nets などである。これらは設計プロセス構造を「見える化」するためのモデルであり、設計プロセス構造の構築の支援に用いられる。

2.2 設計到達度と整合度 サブシステム間には依存関係が存在するため、図1で示すように、それぞれのサブ

Fig. 1 Process Architecture

システム間ですり合わせをして整合を取るための作業が必要である。このすり合わせ作業は個々のサブシステムの設計の到達度を向上させる作業とともに重要である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。一方で、限られたリソースのもとでは、サブシステムの設計作業とすり合わせ作業に対するリソース配分を適切に計画することが求められる。また、すり合わせ作業の効率は組織構造に大きく依存するため、相互依存の強いサブシステムは同じタスクグループで担当してコミュニケーションを密に取れるようにする、といった調整も必要となる。

2.3 知識獲得のプロセス 設計プロセスは作業の内容が明確である生産プロセスと異なり、プロセスの進行と同時に作業の内容を決めていく知識獲得のプロセスである。時間をかけることにより獲得される知識量が増え、それに対応して設計の到達度も向上する。一方で、設計問題は限られたプロジェクト期間における満足化の問題であるため、設計者は納期やコストなどの制約により妥協を余儀なくされる。つまり、知識獲得のプロセスが打ち切られることを考慮する必要がある。したがって、設計プロセスの計画においては、目標を達成できる可能性がどの程度あるかを予測することが重要である⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

2.4 設計プロセス計画の構造 以上の議論を踏まえば、設計プロセス計画には下記3つの要素が含まれていると考えられる。

(1) プロセス構造の決定 プロセス構造は知識獲得の効率に大きく関わる。不適切なプロセス構造を選択すると、不要な繰り返しや、重大なリワークを生じる可能性がある。

(2) 組織構造の決定 組織構造も知識獲得の効率に影響する。ミーティングの効率を良くするために依存関係の強いタスクは同じ設計者が同じタスクグループで担当する、といった調整が必要である。その際には、ミーティングの参加者数が少ないほうがミーティングの効率が高いことも考慮する必要がある。

(3) リソース配分 知識獲得の成果は担当する設計者の能力や、費やす時間にも依存する。重要なタスクには知識が豊富で優秀な設計者を担当させ、十分な設計時間を確保する必要がある。

2.5 設計プロセスにおける課題と解決手法 以上の議論をもとに、本研究では以下の課題について取り組む。

(i) 各段階を含む最適化問題の定式化。

Fig. 2 Organization Structure

(ii) 設計が知識獲得プロセスである点を踏まえた、タスクの到達度とタスク間の整合度の評価指標。

これまで多くの研究者により、プロセス構造や組織構造の最適化手法⁽⁷⁾⁽¹²⁾や知識到達度と整合度の定量的評価モデル⁽¹¹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾など、設計プロセスの最適計画のための手法が提案されている。しかし上記の2つの問題の包括的な解決には至っていない。本研究では2つの問題に対して以下のアプローチで解決する。第一の課題については、プロセス構造および組織構造の決定と時間配分の決定の2つの最適化問題を定義し、連携させる。第二の課題については、知識到達度と整合度を評価するためにファジィ数を用いた成長曲線で目的関数を定式化する。

3 設計プロセス計画の問題設定

3.1 設計プロセス計画の設定 本研究では、設計プロセス計画に関連する概念を以下のように定義する。

タスク 個々のサブシステムの知識到達度を向上させる作業である。設計プロセスの最小単位であり、製品のサブシステムに対応して定義される。

タスク依存度 タスク間の依存の度合いを表す。サブシステムは互いに依存関係があるため、それに対応してタスクにも依存関係が存在する。

タスクグループ 組織構造の一部であり、図2のように特定のタスク群を担当するグループである。設計者は自らが担当するタスクに応じたタスクグループに所属する。

ミーティング タスク間の整合性を取るための活動である。ミーティング時に設計者は依存関係のあるタスクに対して整合がとれているかどうか確認を行う。主にタスクグループ単位で行われる。デザインレビューは全員が参加する全体ミーティングである。

達成確率 プロジェクト計画案のもとで、タスクの到達度や整合度についての目標を達成できる可能性である。

3.2 部分問題の設定 前節での定義に基づき、本研究では下記の計画問題を設定する。

設計変数 タスクの担当設計者の決定、タスクグループの構成の決定、タスクとミーティングの実行時間と実行のタイミング。

制約条件 タスク、設計者、知識到達度と整合度の目標値、設計期間。

目的関数 タスクの設計到達度の達成確率、タスク間の整合度の達成確率。

Fig. 3 Coordination between Sub Problems

4つの設計変数のうち、タスクの担当設計者の決定とタスクグループの構成決定は離散変数であり、タスクとミーティングの実行時間と実行のタイミングは連続変数として定義される。一般的に離散変数と連続変数の混合問題において最適解を探索するのは大変困難である。適切な計算コストで解を得るために、本研究では上記の計画問題を以下の2つの部分問題に分割して最適化計算を行う。

部分問題 1: 設計組織の決定

タスクの担当設計者とタスクグループの構成を決定する。

部分問題 2: 時間配分の決定

部分問題 1 の解を与条件として、タスクとミーティングの実行時間とそのタイミングを決定する。

それぞれの最適化問題の解において一貫性を保つために、同じモデルに基づいて目的関数を定式化する。

上記のように問題を分割することにより計算コストを下げるができるが、探索空間が狭くなり、局所解に陥りやすくなるデメリットも生じる。したがって解の多様性を保ちつつ大域的最適解を得るために以下のようにする。

- (i) 部分問題 1 で得たパレート解 (図 3 の PO_1) の中から n 個の解を選択。
- (ii) (i) で得た n 個の解のそれぞれを与条件として、部分問題 2 の最適化計算を行う。
- (iii) (ii) で得た n 個のパレート解集合を重ね合わせて得られた解集合について、部分問題 2 のパレート解 (図 3 の PO_2) となっているものを選択。

4 評価モデル

設計プロセスは知識獲得のプロセスである。先行研究⁽¹⁾では成長曲線を用いることで設計の進捗を定量的に評価するモデルを提案しており、本研究でも用いることとする。本章ではこの評価モデルの詳細について説明する。

4.1 前提条件

- 個々のタスクを定義すること自体も設計プロセス計画において重要な作業であるが、本研究ではプロジェクトのタスクはあらかじめ決定されており、与条件とする。
- 設計者は複数のタスクを担当することができる。し

かし1つのタスクに対して2人以上の設計者が担当する事はないものとする。複数の設計者が担当することとなった場合、タスクを分割して複数のサブタスクを構成し、各設計者に割り当てるようにする。

- 知識獲得のプロセスのもとで、知識の到達度は漸進的に増加する。

4.2 タスクの到達度 知識のレベルが高ければ高いほど、タスクの技術的な到達度は高くなると考えられる。知識のレベルを、設計者が設計対象に対して何も知識を有していない状態を0、あらゆる知識を有し完璧な最適設計が可能な状態を1とし、その間を解析モデルや製品の使用条件に対する理解の程度に応じて定義する。これによりプロジェクトマネージャーは、各タスクの到達目標を定量的に設定することが可能である。その上で、タスクの到達度を下記の成長曲線で表す。

$$f_i(t) = 1 - (1 - f_{0i}) \exp(-m_i \tau_i(t)) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_i(t)$ は時刻 t までにタスク i の設計を行った時間、 $f_i(t)$ は時刻 t でのタスク i の到達度 ($0 \leq f_i(t) < 1$)、 f_{0i} は設計者が設計開始以前から有するタスク i に対する初期知識到達度 ($0 \leq f_{0i} < 1$)、 m_i はタスク i の難易度に相当する係数を表す。初期知識到達度 f_{0i} は設計者とタスクによって決定する値、難易度 m_i はタスクに固有の値である。また難易度 m_i は小さいほどタスクが難しいことを表している。

4.3 整合度 タスク i とタスク j の整合度 $g_{ij}(t)$ はミーティングを行うことにより上昇する。整合度の上昇量はタスクの依存度とミーティング効率によって変化する。またミーティング時の設計者が有するそれぞれのタスクに対する知識量が整合度の上限となる。このような特徴を反映させ、整合度を以下の成長曲線でモデル化する。

$$g_{ij}(t) = \left(\sqrt{f_i(t)f_j(t)} - g_{ij0} \right) \left(1 - \exp \left(-\alpha \frac{e}{\tau_{ij} + \tau_{ij0}} \tau_{ij}(t) \right) \right) + g_{ij0} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{ij}(t)$ は時刻 t までにタスク i とタスク j のミーティングを行った時間、 $f_i(t)$ は時刻 t でのタスク i の知識到達度、 g_{ij0} は前回のミーティング終了時での整合度 (ただし1回目のミーティング場合は0) である。

e はミーティング効率に対応するファジィ数である。ミーティング効率はタスク i, j を同じ設計者が担当している場合に最も高くなり $e = 1.0$ 、設計者とタスクグループが異なる場合に最も悪くなり $e = 0.1$ とする。同じタスクグループに属する異なる設計者が担当する場合は、タスクグループの大きさに応じて変化し、 $e = \frac{N-0.9C-0.1}{N-1}$ とする。なお、 N はタスクの総数、 C はタスクグループに含まれるタスクの数を表している。

また、 r_{ij} は DSM 上で表現されるタスク i に対するタスク j の依存度であり、0, 1, 3, 9 で表される。 α は整合

Fig. 4 Growth Curve Model

度の上がりやすさを調整するパラメータである。

4.4 リワークによる到達度の減少 複数の設計者による協調作業の場合、並列的に作業が行われるため、設計者は関連のあるタスクに対してある仮定をおきながら進めることになる。したがって、タスク間に不整合が生じないようにミーティングを行い調整する。このとき、不整合部が分かると、その部分を修正するためにリワークが生じる。このリワークにより知識到達度は減少するが、整合度は上昇する。整合度が高いほど、知識の減少量は少なくなる。

図4は知識到達度と整合度の関係を表す計算例である。整合度はミーティングにより上昇し(図4下)、知識到達度は設計を行うことにより上昇するが、ミーティング終了時には減少する(図4上)。

ミーティング終了時の知識到達度は以下の式で与えられる。

$$f_i(t_e) = f_i(t_b) - \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta f_{ij} \quad (3)$$

ここで、 $f_i(t_b)$ と $f_i(t_e)$ はミーティング開始時と終了時のタスク i の知識到達度を表している。また、 Δf_{ij} はミーティング終了時のタスク j の影響によるタスク i の知識の減少量であり以下の式で表される。

$$\Delta f_{ij} = \beta r_{ij}(1 - g_{ij}(t))\Delta f_i \quad (4)$$

ここで、 $\Delta f_i(t)$ は前回のミーティングからのタスク i の知識到達度の増加量、 β は知識修正に対する影響の度合いを表すパラメータである。

4.5 不確実性の表現 式(1)、(2)は、将来のある時点での知識の獲得量を予測するものであり、その値は必然

Fig. 5 Pareto-Optimal Solutions of Sub Problem 1

的に不確実性を含むものとなる。不確実性を表現するために、本研究では図4に示すようにタスクの到達度およびタスクの整合度を三角ファジィ数を用いて表す。三角ファジィ数は、四則演算を容易に行うことができるという特徴がある。

4.6 達成確率 達成確率 p は到達度および整合度の三角分布の面積の中で、目標値を上回る面積の割合によって算出される。三角分布が関数 μ で表される時、タスク i の知識到達度の達成確率 p_i は以下の式で与えられる。

$$p_i = \frac{\int_{f_{Ti}}^{f_{Tu}} \mu(f) df}{\int_{f_{iL}}^{f_{iU}} \mu(f) df} \quad (5)$$

式(5)の分母は三角分布の面積を表し、分子は三角分布が目標値を上回る面積を表している。同様に、整合度の達成確率 q_{ij} も以下の式で与えられる。

$$q_{ij} = \frac{\int_{g_{ijT}}^{g_{ijU}} \mu(g) dg}{\int_{g_{ijL}}^{g_{ijU}} \mu(g) dg} \quad (6)$$

4.7 評価指標 設計プロセスは多くのタスクから構成されている。各タスクは並列に行われる一方で、設計プロセス全体からみるとどのタスクも必要不可欠であるという意味では直列システムとみなすことができる。したがって、それぞれの到達度の相乗平均をとったものを総合的な評価指標とし、以下の式で与える。

$$P = \left(\prod_{i=1}^N p_i \right)^{\frac{1}{N}} \quad (7)$$

$$Q = \left(\prod_{i=1}^N \prod_{j=i+1}^N q_{ij} \right)^{\frac{2}{N(N-1)}} \quad (8)$$

以上の知識到達度の達成確率 P と整合度の達成確率 Q を、プロジェクト計画問題の目的関数とする。

Fig. 9 Pareto-Optimal Solutions of Scheduling

合度が高いパレート解Ⅰに関しては他よりもミーティング時間が多くなり、逆にタスク到達度が高いパレート解Ⅲは、個々のタスクに配分される設計時間が多くなるという結果が確認できた。

6 結言

本報では、タスク到達度とタスク間整合度に着目した多目的設計プロセス計画の最適化手法を提案した。設計プロセス計画の最適化設計問題を組織構造の編成と時間配分の2つの部分問題に分割し、両者の連携によってパレート解を求める方法を提案した。またファジィ数を用いた成長曲線によりタスク到達度とタスク間整合度の評価を行った。それぞれの部分問題に対して一貫性した最適化の結果が得られるように、同じモデルを目的関数に適用した。また多目的最適化問題に対してNCGAを用いて計算を行った。例題に提案手法を適用し様々な計画案の検討を行うことができた。

文 献

- (1) 野間口, 堤, 藤田, 到達度に着目した評価モデルに基づく設計プロセス計画支援手法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 75, No. 751, (2009), pp. 749-759.
- (2) 渡邊, 廣安, 三木, 近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol. 43, No. SIG 10(TOM 7), (2002), pp. 183-198.
- (3) OFRAC, (2011), Osaka University Formula Racing club home page. (online) available from <http://ofrac.net/> (accessed 2011-8-31).
- (4) Browning, T. and Ramasesh, R., A Survey of Activity Network-based Process Models for Managing, *Product Development Projects, Production and Operations Management*, Vol. 16, , (2007), pp. 217-240.
- (5) Browning, T. and Eppinger, S., Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 49, No. 4, (2002), pp. 428-442.
- (6) Marca, D., *IDEF0/SADT Business Process and Enterprise Modeling*, (1988), Eclectic Solutions Corp..
- (7) Eppinger, S. D., Whitney, D. E., Smith, R., and Gebala, D., A Model-based Method for Organizing Tasks in Product

Table 1 Solutions of Scheduling; Allocated Time

Pareto-optimal solution	I	II	III
Task name	time [hour]	time [hour]	time [hour]
alignment geometry	24	23	24
braking system	16	13	48
suspension	36	29	33
arm	11	7	8
upright	22	20	23
hub	37	41	44
steering tie rod	18	20	20
footboard box	32	36	34
battery mount	10	10	21
packaging	19	13	17
front car frame	24	22	18
rear car frame	17	12	11
impact attenuator	21	27	22
cockpit	13	16	20
electric equipment	14	15	10
fuel tank	3	4	9
radiator	10	11	12
fuel injection	21	17	36
inlet manifold	3	4	2
exhaust manifold	29	26	7
surge tank	16	24	29
assist parts of powertrain	13	16	12
muffler	23	31	28
differential gear	8	12	12
drive shaft	10	11	8
Eg setting	53	74	53
shift lever	24	28	28
meeting in task group 1	5	4	2
meeting in task group 2	4	3	3
meeting in task group 3	3	6	3
meeting in task group 4	6	4	0
meeting of all members	6	3	3
technical performance P	0.8510	0.8983	0.9061
integrity Q	0.7601	0.7332	0.6130

Development, *Research in Engineering Design*, Vol. 6, No. 1, (1994), pp. 1-13.

- (8) Clark, K. B. and Fujimoto, T., The Power of Product Integrity, *Harvard Business Review*, Vol. 68, No. 6, (1990), pp. 107-118.
- (9) MacDuffie, J. and Fujimoto, T., Why Dinosaurs Will Keep Ruling the Auto Industry, *Harvard Business Review*, Vol. 88, No. 6, (2010).
- (10) Reich, Y. and Levy, E., Managing Product Design Quality under Resource Constraints, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 13, (2004), pp. 2555-2572.
- (11) Lévy, V. and Browning, T. R., An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 56, No. 4, (2009), pp. 600-620.
- (12) Chao, L. P. and Ishii, K., Design Process Error-proofing: Failure Modes and Effects Analysis of the Design Process, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Vol. 129, No. 5, (2007), pp. 491-501.
- (13) Clarkson, P. J. and Hamilton, J. R., 'Signposting', A Parameter-driven Task-based Model of the Design Process, *Research in Engineering Design*, Vol. 12, No. 1, (2000), pp. 18-38.
- (14) Ostergaard, K. J. and Summers, J. D., Resistance Based Modeling of Collaborative Design, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 15, No. 1, (2007), pp. 21-32.