設計知識に注目した設計の推論モデルの提案 (第 4 報)

- 設計の推論モデルの計算機上への実装と検証 -

A proposal of design reasoning mode that takes notice of design knowledge (the Forth report)

Implementation of a reasoning model in design and its verification

○ 野間口 大 (東京大) 正 妻屋 彰 (大阪大学先端科学技術共同研究センター) 吉岡 真治 (国立情報学研究所)
鷲尾 隆 (大阪大学産業科学研究所) 武田 英明 (国立情報学研究所)
村上 存 (東京大学工学系研究科) 冨山 哲男 (東京大)
Yutaka Nomaguchi, The University of Tokyo, Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo
Akira Tsumaya, Osaka University
Masaharu Yoshioka, National Institute of Informatics(NII)
Takashi Washio, Osaka University
Hideaki Takeda, NII
Tamotsu Murakami, The University of Tokyo
Tetsuo Tomiyama, The University of Tokyo

Since design knowledge plays a cucial role in design process, we are conducting research on design reasoning model that takes notice of design knowledge. To make a design reasoning model, we have already proposed a reasoning framework of design and analyzed basic operations for the framework, and then propose a synthesis language for describing design operational knowledge. In this paper, we propose our implementation of this model, and verify it to compare design processes replayed in the system with ones of actual design sessions.

Key Words: Synthesis, Design, Design Knowledge, CAD

1 序論

設計とは、設計者が持っている様々な知識を用いて、与えられた要求からそれを実現する人工物を産み出す行為であると考えられている。著者らは、この設計過程を設計知識を用いた推論であると捉えて、前報 [1] までに、設計知識に注目した設計の推論モデルの提案、及びその推論モデルにおける知識記述言語の提案を行ってきた。

本報では、これら推論モデルの枠組みを計算機上に実装する。さらに、実際に行われた設計事例における設計者の推論過程を計算機システム上で再現し、その結果を設計事例の記録と比較することにより、我々の提案する推論モデルの評価を行う。

2 設計の推論モデルの枠組

本節では、著者らが前報までに提案してきた、設計における推論モデルの枠組みについて述べる。

著者らが前報までに提案している設計の推論モデルは、図 1 に示す 3 つの要素から構成されている。

- 複数のモデルベース推論

  設計過程では様々な知識が用いられる。これらの知識をある観点から見たモデルに依存した形で表現し (Object dependent models)、モデルベース推論を行う。またこれらのモデルを、具体的な設計対象モデルには依存しない論理的なモデル (Object independent model) を媒介として統合する。

- メディア知識の取り扱い

  メディア型の知識表現により実世界に存在する様々な知識や情報を取り込む。これらの情報については可能な限りモデル化を支援することにより、複数のモデルベース推論システムの情報と組み合わせる。

- 思考過程モデル

  設計過程特有の設計過程知識などを思考過程モデルとしてモデル化することにより、設計対象モデルにおける推論に対するメタレベルの推論を行い、設計対象への操作を制御する。

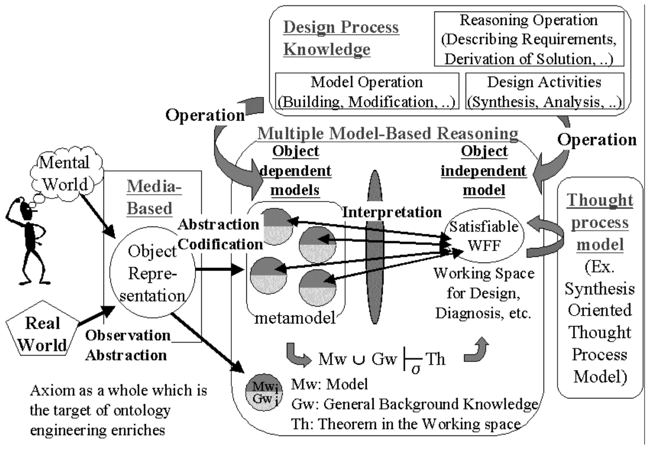


Fig. 1: 設計の推論フレームワーク

この枠組みでは、メディアベースによる多様な設計情報および設計知識の表現と様々なモデルベース推論システムを利用することによって、設計対象に関する情報の記述の自由度を確保できる。また、複数のモデルベース推論システムを統合的に扱うことにより、多数の公理系を扱うことができ、全体の枠組みとしてシンセシスの自由度を高めることが可能である。

また、この枠組みにおける設計作業は、複数のモデルによって表現された設計対象の情報および、各モデラにおける知識に対する操作として捉えられる。

3　システム実装のアプローチ

本研究では、前節で述べた枠組の各構成要素を計算機上に実装するにあたって、以下のようなアプローチを採用する。

- 複数のモデルベース推論システム

  著者らのグループが開発を続けているKIEF(Knowledge Intensive Engineering Framework)[2]を用いることによって、複数のモデルベース推論を行うための枠組を用意する。

- 設計対象モデルの統合

  KIEFにおけるモデル統合のための機構であるプラガブル・メタモデル機構[3]を用いて機能モデリングシステムや各種CAEツールなど、設計対象モデルを統合する。

- 思考過程モデル

  複数のモデルベース推論システムを用いた設計過程を計算機上で処理することが可能なモデルとして、設計シミュレータ[4]における記号論理に基づいた設計過程モデルを用いる。

以下、その詳細について述べる。

3.1　KIEFの利用

著者らのグループは様々な種類の知識を統合的に使用することによって、製品ライフサイクルの各段階における工学活動を支援するための新しいスタイルの工学である知識集約型工学[5]を提唱している。KIEFはこのコンセプトに基づいて、著者らのグループが開発を続けているシステムである。

KIEFは、種々の設計対象モデルを統合し、かつ各モデラ上でのモデリング作業を支援するプラガブル・メタモデル機構と、KIEFで用いる知識を提供する知識ベースから構成される。図2にそのシステム構成を示す。

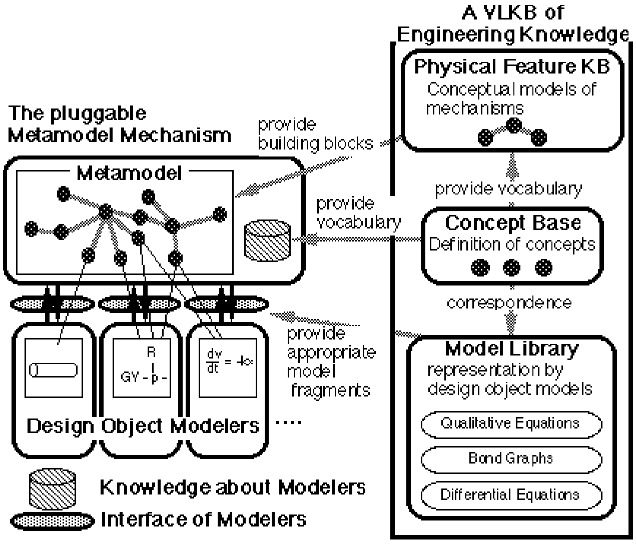


Fig. 2: KIEFの構成

プラガブル・メタモデル機構(図2左上)は、メタモデルとよぶ設計対象の記号表現による概念ネットワークを中心モデルとして、種々の対象モデルを、概念レベルで統合する機構である。

メタモデルを構成する概念や、KIEFで用いる知識は大規模知識ベース(図2右)に蓄積されている。KIEFの知識ベースは物理世界の基本的オントロジーを提供する概念辞書(Concept Base)、KIEF上で用いるツールに固有のオントロジーを提供するModel Library、そして概念辞書が提供するオントロジーを用いてモデルの作成やモデル上での推論に関わる知識としてのPhysical Featureを提供するPhysical Feature知識ベースから構成される。

KIEFを用いることにより、様々なモデルベース推論システムを取り扱うことができる。

3.2　複数の対象モデルの統合

前節で述べたように、本研究では、KIEFのプラガブル・メタモデル機構による複数の対象モデルの統合を行う。この統合は、メタモデルを表現する物理概念と、モデラ上のデータとの関係を記述するだけで、容易に行うことが可能である。また、各モデラ上のデータはプラガブル・メタモデル機構を介して参照可能である。

著者らの先行研究で統合してきたモデラには、汎用数式処理システムMathematica[1]、3次元ソリッドモデラPro/Engineer[2]、機能モデリングツールFBSモデラ[6]等がある。

また、実際の設計作業では、計算機ツールだけでなく実験や試作機作成など実世界における情報も利用している。本研究では、これら実世界における情報源も広い意味でのモデラであると考え、実世界からの情報を入力するためのツールをプラガブル・メタモデルに接続することにより、これらの情報を計算機上に実装された推論の枠組みで扱う。

3.3　計算可能な設計過程モデル

本研究では、計算可能な思考過程のモデルとして記号論理に基づいて定式化された設計過程モデルを採用する。

3.3.1　設計シミュレータ

武田ら[4]は、設計対象に関する論理的な推論と、対象レベルの推論を制御するメタレベルの推論(行為レベルの推論と呼ぶ)を組み合わせることにより、設計過程を再現できる設計シミュレータを提案した。

設計シミュレータでは、設計解の性質を導出する演繹、設計解の提案を行うアブダクションおよび、知識の矛盾を解消するサーカムスクリプションの3つの推論形式で設計過程を定式化し、知識ベースの導入の操作により、複数の公理系における知識を管理することができる。

設計シミュレータにおける基本的な設計過程は、"設計仕様の入力"から始まり、"設計解の提案"、設計解の展開・評価の繰り返しにより設計仕様を実現する過程としてモデル化される。一般に設計過程は思考錯誤を伴って進行するので、設計解の展開・評価の結果、矛盾が発見された場合には、矛盾の解消を行った後、設計解の提案と設計解の展開・評価の繰り返しのループに戻る。

行為レベルの知識は、設計対象の状態を条件とし、設計対象に対する操作列を行為とする優先順位付きのルールで記述されている。設計シミュレータは、この行為レベルの知識に基づいて計の状況に応じて知識や操作を設計者に提供することにより、設計作業をガイドすることが可能である。

3.3.2　行為レベル知識の拡張

設計シミュレータにおける行為レベル知識の枠組みでは、対象モデルに関する操作を十分に扱うことができないため、著者らは2節で述べた推論フレームワークを実装するにあたってその拡張を行い、シンセシス言語と呼ぶ知識記述言語を開発している[1]。

このシンセシス言語では、設計の推論モデルにおける設計対象の状態を判定するための操作、設計対象モデルに対する操作、論理モデルに対する操作をプリミティブ操作として定義する。また、この設計の推論モデルにおける推論を実際に行うため、設計

---

[1] Mathematicaは、Wolfram Research, Inc.の登録商標である。

[2] Pro/EngineerはParametric Technology社の登録商標である

仕様の入力や、複数の候補があったときの選択などのユーザとインタラクティブに行う操作についても定義する。このプリミティブ操作の組み合わせとして設計行為の知識を記述することにより、設計の推論モデルの枠組みにおける対象レベルの推論を制御する思考過程モデルを実現する。

4 システム構築とその検証

前節までの考察を元にシステムを構築し、システム上で設計過程を再現することにより、その検証を行った。

4.1 システム構成

本システムは Smalltalk 言語の開発環境である VisualWorks5i.2[3]上に構築されている。図 3にシステム構成を示す。

本システムにおいては、KIEF のプラガブル・メタモデル機構に接続された各種対象モデルによって設計対象の情報が表現され、各モデラの知識を用いて設計対象レベルの推論が行われる。行為レベルの知識によって、設計対象の状況に応じて設計対象に関する操作が提示される。設計者は提示された操作の中から適当なものを選択することにより、対象モデルを操作し設計作業を進めていくことになる。

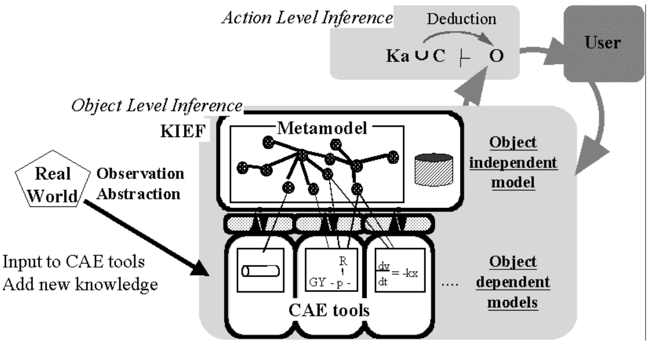


Fig. 3: システム構成

4.2 実行例

システム実行させるにあたり、実際に大学の研究室で 4 年間に渡って行われたレーザーリソグラフィーの設計事例 [7] の研究・開発記録を例題として使用した。本設計事例の特徴は、

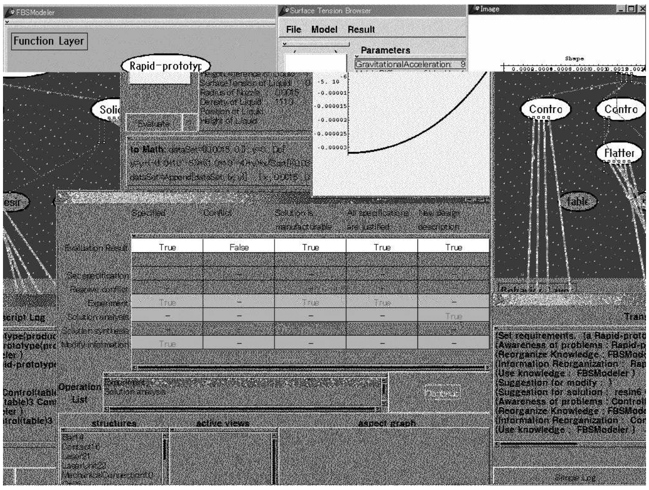
- 加工精度向上を目的とした、既存のレーザーリソグラフィーの改良設計であること。
- 最終設計解に至るまでに、設計解候補として 4 つの案が検討されていること。

である。

図 4にシステム実行画面を示す。設計者は、FBS モデラ (左上) による機能モデリングや、表面張力の影響を考慮した液面表面形状の数値計算ツール (右上) を行いながら設計作業を進めている。これら複数のモデルを用いた設計作業は、行為レベルの知識の推論システム (右下) により制御されている。また、システムを通じて行われた設計過程のログが自動的に記録される (左下)。このログは、本システムにおけるプリミティブ操作と、”要求仕様の設定”、”問題提起”、”実験”など、著者らの先行研究によって収集された設計活動を表現する語彙 [8] との対応関係をあらかじめ用意しておくことで自動的に生成されたものである。

4.3 設計事例とシステム実行結果との比較

図 5にシステム実行結果のログと実際の設計事例の記録との対比を示す。実際の記録に比べてシステムのログの方が粒度が細かいという問題はあるものの、システムのログにおける複数の操作



	Specified	Conflict	Solution is manufacturable	All specifications are justified	New design description
Evaluation Result	True	False	True	True	True
Set specification	–	–	–	–	–
Resolve conflict	–	–	–	–	–
Experiment	True	–	True	True	–
Solution analysis	–	–	–	–	True
Solution synthesis	–	–	–	–	–
Modify information	True	–	–	–	–

```
(Set requirements,  (a Rapid-proto
(Awareness of problems : Rapid-p
(Reorganize Knowledge : FBSMode
(Information Reorganization : Rap
(Use knowledge : FBSModeler )
(Suggestion for modify : )
(Suggestion for solution : resin6
(Awareness of problems : Controll
(Reorganize Knowledge : FBSMode
(Information Reorganization : Cor
(Use knowledge : FBSModeler )
```

Fig. 4: システム実行画面

をまとめると、実際の設計事例における一つの行為として解釈可能であった。この結果から、本研究で開発したシステムは、実際の設計過程と同様の過程を再現することが可能であり、設計者に違和感を感じさせること無く設計を支援することが可能となっていると考えることができる。

4.4 既存システムとの比較

次に、これまでに著者らが開発した設計シミュレータおよび KIEF との比較を行うことにより、本研究で開発したシステムの特徴について考察する (表 1参照)。

本研究で開発したシステムは KIEF と設計シミュレータを統合しているため、複数のモデルベース推論における設計過程制御が可能である。また、推論フレームワークに対するプリミティブな操作と設計活動の語彙とを対応付けることにより、設計過程のログを自動的に記述することが可能である。

著者らのグループでは、KIEF における設計作業を、設計者とのインタラクションの下で半自動的に文書として記録し、管理する、設計文書作成支援システム (DDMS; Design Documentation Management System)[9] の開発を行っている。DDMS で作成される文書は、ある設計タスクに対応した設計ユニットに基づいて構造化されており、後の設計において知識として再利用することが容易になっている。本研究で開発したシステムと DDMS とを統合することにより、システムが設計を制御しながら、構造化された設計文書を設計者が作成する作業を支援することが可能と考えられる。

Tab. 1: 既存システムとの比較

	設計過程の制御	設計過程の記録	複数のモデル推論	設計ツール統合の指針
KIEF	×	×	○	×
設計シミュレータ	○	×	×	×
シンセシスの推論フレームワーク	○	△	○	○

5 結論

本研究では、著者らが提案してきた設計知識に注目した設計の推論モデル及びその推論モデルにおける知識記述言語を計算機上に実装し、実際に行われた設計事例における設計者の推論過程を

---

[3] VisualWorks は Cincom Systems 社の登録商標である。

計算機システム上で再現した。この結果を設計事例のプロトコルデータと比較することにより、我々の提案する推論モデルの評価を行い、その妥当性の検証を行った。他の研究事例における設計モデル (例えば、[10] など) との比較を通じて、本研究で提案した推論モデルの客観性を検証することが考えられる。その詳細について次報で報告する。

尚、本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「シンセシスのモデル論」プロジェクト (JSPS-RFTF 96-P00701) の研究費によって実施された。

```
●方式の選定:
Set requirements: Stereo-Lithograph(product)
Reorganaize Knowledge: FBSModeler
Awareness of problems: Stereo-Lithograph(product)
Use knowledge : FBSModeler
Suggestion for solution:
laser-lithography( Control(table)
Control(surface) Photoform(resin) )

●マイクロマシン製作に十分な精度の層を自由液面方式で作る:
Awareness of problems: Control(table)
Control(surface) Photoform(resin)
Reorganaize Knowledge: FBSModeler
Use knowledge : FBSModeler
Suggestion for solution: freeSurface
( Control(hollow)on(surface)
Measure(liquid_surface) )

●空気流による液面制御:
Awareness of problems :
Control(hollow)on(surface)
Measure(liquid_surface)
Reorganaize Knowledge: FBSModeler
Use knowledge : FBSModeler
Suggestion for solution:
air_flow( Form(hollow)by(air_flow)
Operate(air_flow))
… …
●液厚制御実験:
Make prototype : #Prototype

● (実験結果)10 μm程度の精度可能:
Experiment result : (0.00001 Accuracy Surface)
```

Fig. 5: 設計事例の記録とシステム実行結果との比較 (一部)

参考文献

[1] 吉岡, 鷲尾, 冨山: 設計知識に注目した設計の推論モデルの提案 (第 3 報) –設計行為に関する知識を記述するシンセシス言語の提案–, 第 10 回設計工学・システム部門講演論文集, 2001.

[2] 関谷, 吉岡, 冨山: オントロジーを用いた統合的設計支援環境の実現, 人工知能学会誌, Vol. 14, No. 6, 1999.

[3] 吉岡, 冨山: 設計支援のための統合モデリング環境の研究–プラガブル・メタモデル機構の提案, 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 312–319, 1998.

[4] 武田, 冨山, 吉川: 設計過程の計算可能モデルと設計シミュレーション, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 5, pp. 877–887, 1992.

[5] T. Tomiyama, Y. Umeda, M.Ishii, M. Yoshioka and T. Kiriyama: Knowledge systematization for a knowledge intensive enginnerign framework, In T. Tomiyama, M. Mäntylä and S. Finger eds., *Knowledge Intensive CAD-1, Preprints of the first IFIP WG 5.2 Workshop on Knowledge Intensive CAD-1*, pp. 55–80, Chapman & Hall, 1995.

[6] 梅田, 冨山, 吉川: 機能設計支援のための fbs モデリングの提案, 精密工学会誌, Vol. 63, No. 6, pp. 795–800, 1997.

[7] 謝: 自由液面の制御によるマイクロ光造形に関する研究, 博士論文, 東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻, 1998.

[8] 吉岡, 武田, 妻屋, 村上, 冨山: 設計活動を表現する語彙に関する研究 (第 3 報) –情報操作の観点から見た語彙の整理と意味付け–, 2000 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, p. 259, 2000.

[9] Y. Nomaguchi, M. Yoshioka and T. Tomiyama: Document-based design process knowledge management for knowledge intensive engineering, In *The Forth IFIP Working Group 5.2 Workshop on Knowledge Intensive CAD*, pp. 163–185, 2000.

[10] R. Valkenburg and K. Dorst: The reflective practice of design teams, *Design Studies*, Vol. 19, No. 3, pp. 249–271, 1998.