

## 設計における創造性支援環境

## 「ユニバーサル・アブダクション・スタジオ」の提案

Universal Abduction Studio: A Proposal for Creativity Support Environments in Design

武田 英明<sup>\*1</sup> 坂井 宏充<sup>\*2</sup> 野間口 大<sup>\*3</sup> 吉岡 真治<sup>\*4</sup> 下村 芳樹<sup>\*2</sup> 富山 哲男<sup>\*5</sup>  
 Hideaki Takeda Hiromitsu Sasaki Yutaka Nomaguchi Masaharu Yoshioka Yoshiki Shimomura Tetsuo Tomiyama

<sup>\*1</sup> 国立情報学研究所    <sup>\*2</sup> 東京大学    <sup>\*3</sup> 大阪大学    <sup>\*4</sup> 北海道大学    <sup>\*5</sup> デルフト工科大学  
 National Institute of Informatics    The University of Tokyo    Osaka University    Hokkaido University    Delft University of Technology

This paper describes a new design support system that aims to support conceptual design by dynamically integrating various superficially irrelevant knowledge in different design domains. We argue that abduction for integrating theories can be a basic principle to formalize design processes that yields non-trivial, new design solutions. According to this principle, we propose Universal Abduction Studio, a design environment to support designers, in which designers can manage and integrate knowledge toward new design solutions. This system should provide various types of abduction that designers can select and combine to archive their design. To implement UAS, we propose to use analogical reasoning. We show an example taken from a real design activity in which the system discovers a new design idea.

## 1. はじめに

本研究は創造的な設計をいかに計算機が支援できるかについて議論し、新しい枠組みを提案するものである。但しここで「創造的な設計」とは、必ずしも発明などの新規の設計を意味するものでなく、既存の設計解から容易に到達できるような設計解ではないという意味で考える。

設計において、計算機はもはや欠くことのできないものである。しかし、その利用は対象の表現・記述が中心であり、設計行為、ことに新規性の高い設計行為においては補助的な役割に限定されている。これはこのような設計行為が設計者の持つ多様な大量な知識を必要とし、単に設計対象が計算機上に表現できただけでは不十分だからである。設計知識の問題は 80 年代のエキスパートシステムの頃から認識されているが、いかに質、量において有効な知識を獲得することの困難さ(知識獲得のボトルネック)も同時に指摘されてきた。

今日、知識の量の問題は解決されつつあり、例えば、インターネット、ことに WWW の発達に伴い、各方面における情報・知識の外在化が急速に進んでいる。設計分野はこれらの動きの中では遅れた分野であるものの、この傾向は今後も加速するものと思われる。

では大量の知識があったとき、それをどのように使えば創造的な設計の支援が可能となるのであろうか。筆者らは設計過程のモデル化の研究の中で、設計行為のモデル化には演繹ではなくアブダクションが適切であることを示してきた[武田 2001]。本研究でもこの枠組みを基本的な前提とする。

本研究の課題の第一は、知識統合を実現する基本メカニズムとしてのアブダクションの論理的性質を明らかにすることである。単純なアブダクション、すなわち知識が固定された状況におけるアブダクションは、推論としては演繹と等価であることが示されている。設計におけるアブダクションは一見、無関係な知識を統合する役割が重要である。

第二の研究課題は統合されるべき異なる知識の発見の発見である。知識統合のアブダクションは異なる知識が結び付けられることを期待している。しかし、このような関係は論理的方法だけでは達成できない、多様な関係発見の方法が試される必要がある。

第三の研究課題は第一、第二の成果に基づき、設計者を支援するシステムの枠組みを提案することである。ここで重要なことは、いかに人間とシステムが一体となって設計を進めていく仕組みを提供できるかにある。計算機に蓄えられる知識は常に不十分であり、それゆえ推論も不完全である。従って、計算機と人間の設計者とがいかに役割を分担していくかが課題となる。

## 2. 設計におけるアブダクション

先に述べたように、設計行為において設計知識の果たす役割は大きい。したがって設計のモデル化において設計知識をどのように扱うかが問題となる。

## 2.1 知識統合としてのアブダクション

ほかの分野とくらべて、創造的な設計過程における知識の特徴はその動的な振る舞いにある。ある新規設計が達成されたとしても、そのあとに類似の設計をすることは一般に容易である。しかし、後者の設計が創造的設計とは言われることは少ない。これは最初の設計時に新しい知識が獲得され、2 番目の設計時にはその知識を利用しただけという違いから来るのであろう。すなわち、創造的設計においては新たな知識の獲得が不可欠である。言い方を換えれば、創造的設計における結果には、設計物そのものと新たに獲得された設計知識の両者が含まれるということになる。このような行為をモデル化することこそが本研究の課題である。但し、ここで獲得された知識がまったく新しい発見的要素を含む知識であることを意味しない。知識そのものは既存であっても、当該設計分野や設計対象に関して過去に利用されたことがない、したがって知識の組み合わせに新規性があるような場合を想定する。

筆者らを含め、いくつかの研究グループは設計過程をアブダクションを用いてモデル化してきた[林 1989][武田 1992][Coyne

連絡先: 武田 英明, 〒101-8430 千代田区一ツ橋 2-1-2, Tel: 03-4212-2543, [takeda@nii.ac.jp](mailto:takeda@nii.ac.jp), <http://www-kasm.nii.ac.jp/~takeda/>

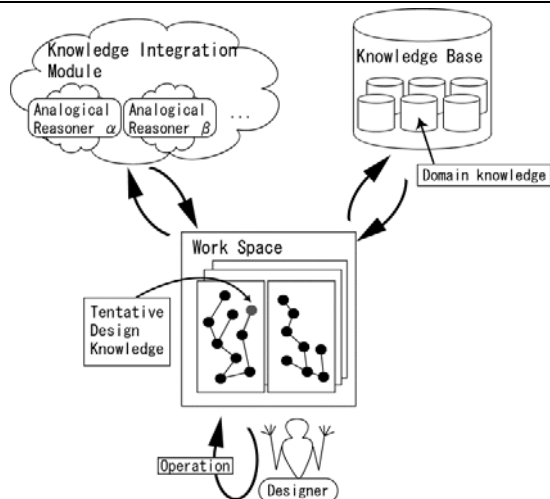


図 1: UAS の基本イメージ

1998], [Roozenburg 1995]。ここで設計過程は、演繹とアブダクションを組み合わせた知識操作の過程としてモデル化される。アブダクションが新しい設計解を提案して、演繹が検証する。

ここでは設計におけるアブダクションを既存の一見無関係な知識を統合するアブダクションと考えることで、上記の二つの結果、つまり新規性のある設計解を提案する行為をモデル化する。

一般にアブダクションは与えられた事実(定理)を説明するような仮説(公理)をもたらすような推論である。しかし、なにが事実であり、なにが仮説であるかによって、多様なアブダクションが可能である<sup>1</sup>。

設計におけるアブダクションを考えると、必ずしも新しい法則を発見するわけではなく、むしろそこで用いられる知識の大半は既知のものであることが殆どである。すなわち、設計における知識操作の本質は、新しい知識の獲得にあるのではなく、知識をどう組み合わせるかの発見にあるものと思われる。

この行為はある事実を説明する事項を求めるアブダクションにおいて、知識を動的に導入するアブダクションとしてモデル化できる[武田 2001]。事実を説明するにあたり、どの知識が必要とされるかは事前にわからないが、所与のアブダクションを遂行するためにその過程において使われたものが必要な知識である。この結果は、所与のアブダクションの結果と組み合わせられた知識の両方ということになる。

## 2.2 知識間の関係の発見

以上述べてきた知識統合の仕組みを実現するにあたり、重要であるのは知識間の関係である。

即ち、論理的なアブダクションにおいては知識が連鎖的に使われるために、この連鎖を形成する各知識の記述(述語など)は共通であることが求められる。しかしこのような条件を、あらゆる知識が事前に満たしていることを期待することはできない。

このような問題があるにもかかわらず、知識間の関係を扱う知識統合としてのアブダクションはこれまで十分に議論されてこなかった。例えば、[Takeda 1994]で提案しているアブダクションでも知識がアブダクションによって順次導入されるが、そのための知識間の関係は予め記述されたものであった。そのため、知識記述時にあらかじめ想定された以外の結果は得られなかった。

これに対し、既に行われた創造的な設計の事例における知識統合を観察すると、表面上には関係が見受けられない知識を結び付けたことが、結果的に新しい解をもたらし、Peirce の言う「驚くべき発見」が発現したと見受けられる事例が多く見受けられる。すなわち、設計過程における知識間の関係発見こそが、創造的な設計に大きく寄与していると言える。

この関係の発見はさまざまなレベルにわたる。字面上の関係の発見から意味的關係の発見、あるいは構造的な関係の発見とさまざまな関係発見がありうる。本研究での関係性の発見においては、論理的な推論だけではなく、多様な推論の可能性を検討する。

## 3. アナロジーに基づく設計支援

関係発見の推論の一つとしてここではアナロジーに注目する。アナロジーは、人の柔軟な思考を支える有力なメカニズムのひとつであると考えられている。アナロジーによる発想とは、ある分野(ターゲット領域)における未知のアイデアを、その分野とは異なる別分野(ベース領域)との類似性に基づき、ベース領域の要素をターゲット領域に転写することで獲得するものである[JSAI 2002]。創造的設計においてこのアナロジーの過程は、知識間の類似性をもとに知識統合のための知識間の関連付けを行うことに等しいと考えられる。アナロジーのプロセスにおいては、知識間の類似性の判定基準が重要な役割を果たすが、一般にアナロジーにおける類似性の判定基準は複数存在する。本研究では様々な情報源を利用して類似性の判断を行う例として、以下の観点による類似性を用いることを提案するとともに、これらの類似性判断を組み合わせることにより、さらに幅広い類似性判断を行う。

### (1) オントロジーの定義に基づく類似性を利用したアナロジー

異なる設計対象領域間の概念において、それぞれが基本オントロジーによる定義を持つとき、その概念間の対応関係を生成することにより、類似性を発見する。

### (2) 対象の構造に基づく類似性を利用したアナロジー

設計対象知識が対象の構造についての知識を含むとき、対象を構成する要素、要素間の接続関係を利用することにより、異なる対象間の構造類似性を発見する。

### (3) 対象の設計手順に基づく類似性を利用したアナロジー

設計対象知識が対象の設計手順に関する知識を含むとき、異なる対象の設計手順との類似性を発見する。

## 4. Universal Abduction Studio

本研究が目指すのは設計者と協力して創造的設計を支援するシステムである。すなわち、設計者が設計をしやすくする環境構築がその目的である。本環境の利用イメージは、工房のように設計者の思考を拡張できるような多様な道具立てを用意することにより、設計者がそれらを自由に組み合わせるというもので、著者らはこれを Universal Abduction Studio (UAS)と名づける。

図1に UAS の全体構成を示す。UAS は、ワークスペース、知識ベース群、知識統合モジュール群からなる。設計者はワークスペースに暫定の設計案を置き、その全体や部分に対して知識ベースにある知識を適用して設計を行う。さまざまな知識がひとつの設計に適用されるためには知識の統合が必要であり、このとき知識統合モジュール群から適切な推論モジュールが選択的に使用される。このようにして設計の各場面で必要な知識を、そこでの適切な知識に変換して適用していくことで UAS における設計は進行する。先に述べたように UAS は自動的に設計を実行するのではなく、設計の各ステージで設計者の選択や意

<sup>1</sup> [Schurz 2002]は多様なアブダクションを収集して分類を試みている。第一の分類項目は *factual abduction* と *law abduction* である。これは発見するものが事実であるか、規則であるによって分けられる。

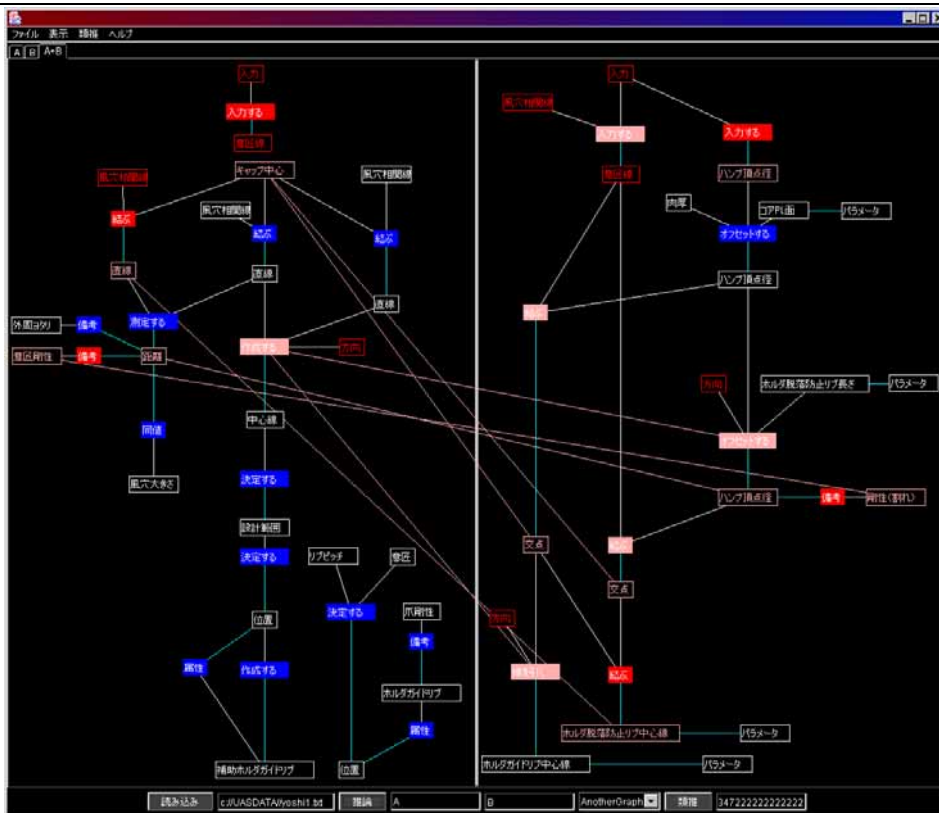


図 2: UAS Prototype 1 によるアナロジー推論の結果例

思決定を促すことで設計が進行する。UAS を推論システムとしてみた場合、二つの特徴がある。第一の特徴は対象レベルとメタレベルからなる二層型推論である。対象レベルの推論とは設計解を導き出すアブダクションと検証に用いられる演繹が主である。メタレベルの推論とは知識の統合であり、これもこのレベルのアブダクションとして実現される。第二の特徴は多様な推論の利用である。とくにメタレベルのアブダクションはきわめて多様であり<sup>1</sup>、理論的に統合されたものは存在しない。対象や目的によって異なる推論手法を使用できるように、多様な推論を提供できる仕組みを提案している。

## 5. UAS Prototype 1

著者はこれまでの議論に基づき UAS のプロトタイプシステムの開発を行った。ここでは多様な法則アブダクションの中から類推型アブダクションに注目し、類推を異なる知識の間を発見するために用いた。今回のプロトタイプシステムは 4 章で挙げた多様な推論による支援という部分では類推にかかる部分のみを実装したものである。

このシステムを利用した設計過程は次のようである。なお、ここでは知識は 1 階述語論理の形式で書かれているものを想定し、その述語と項の関係をグラフ構造として扱う。

### (1) 類似領域の選択

設計対象領域と類似した設計領域を選択してアナロジーを行う場合、設計対象領域に対して高い信頼性を持った知識を導出可能であるが、この知識は初期の設計知識とさほど変わらないものとなる。他方、低い類似性の設計領域を選択す

る場合、得られる知識の信頼性は下がるが、本来利用していた設計領域から見れば「驚くべき」知識の導出が期待できる。

### (2) 異なる領域概念の対応関係の生成

異なる領域間でアナロジーに基づく推論を駆動するためには、一定の対応関係 (同一概念あるいは同一インスタンスである等の関係) が必要である。しかしながらここで想定している知識は本来別個の知識であるので、このような対応関係を期待することができない。そこでまず基礎となる同一性に関する対応関係を字面上の同一性に基づき導出する。この対応関係は多数存在しうるが、ここではグラフ上の近さでスコアリングを行うことでもっともらしい関係を見出す。一方で、このような対応関係を生成するための手がかりが無い場合には、設計者自らが対応関係を作成する必要がある。

### (3) 対応関係による仮説的な設計知識の生成

ステップ (2) で生成した対応関係を用いて、仮説的な設計知識を導出することにより、選択した領域の知識を設計対象領域における知識として用いることが可能になる。(2) で求めた対応関係を有する双方の知識上で、グラフの同一位置にあるノードは類似するノードの候補である。

ただし、この時点においては、この知識は注目している設計領域においては仮説に過ぎず、他の知識とは明らかに区別して認識する必要がある。このステップで生成された仮説的知識が設計者にとって利用可能でないとき、設計者はステップ (1) に戻って、新たな領域知識を選択するか、ステップ (2) に戻って別の対応関係作成手法を用いることになる。

### (4) 設計解候補の生成

ステップ (3) で生成された知識を用いて設計者は設計解の候補を生成するが、ステップ (3) で生成された仮説が知識として採用されるか否かは本ステップで生成される設計解候補によって決まる。即ち、ステップ (3) で生成される仮説を新たな知識として確定するためには、提案された設計解候補の評価による仮説検証のプロセスが必要である。評価によって設計解

<sup>1</sup> ここでのメタレベルのアブダクションとは [Schurz 2002] の法則アブダクション (law abduction) にあたり、(pure) law abduction, micro-part-abduction, analogical abduction, missing-link common cause abduction, fundamental common cause abduction が含まれるとしている。



候補が設計解として利用可能であると判断された場合は、その時点で設計を終了することができる。設計解候補が設計者の意図する仕様を満たさない場合、再び、設計者はステップ(1)からステップ(3)の各段階へ戻り、設計作業を繰り返す。

## 6. 実験例

5章に述べたプロトタイプシステムを用いて、小規模な適用実験を行った。題材は設計手順書であり、ここでのシナリオは二つの異なる手順書間で類似的アブダクションを行うことで、新しい設計解の候補を提案するというものである。

ここで取り上げるのは自動車用ホイールキャップの補助ホルダガイドリブの設計手順書とホルダガイドリブ位置決定の手順書である。この二つの設計は同一の設計対象物の一部ではあるが、実際の設計対象範囲に共通性はない。

### (1) 設計対象の知識の入力

設計課題に関する領域知識を入力する。例題では、実際の設計課題ではなく、領域知識間の知識統合の検証が目的であるため、ここでは領域知識として、補助ホルダガイドリブ形状の設計手順を選択した。

### (2) 類似性を発見したい領域知識の選択

次に設計者は、(1)で入力した領域知識に対して、知識統合を行いたい領域知識を選択する。ここでは、ホルダガイドリブの位置決定に関する手順書を選択した。

### (3) 領域知識間における対応関係の発見

設計課題に関する領域知識(ベース領域知識)と、統合される領域知識(ターゲット領域知識)を選択し、次に両者の間の対応関係を5章で述べたグラフマッチングの手法を用いて生成する。設計者は、まずベース領域知識で順位付け計算用の基準要素を一つ選択する。システムはグラフマッチングを行い、マッチする部分グラフを全て発見する。同時に各部分グラフを得点により順位付けし、得点の最も高い部分グラフを設計者に提示する。

図2において、右がベース領域知識であり、左がターゲット領域知識である。黒地にピンクで示される四角形のノードは対象の対応関係が発見された要素を表し、赤地に白で示される四角形のノードは関係の対応関係が発見された要素をそれぞれ表している。

### (4) 対応関係に基づく仮説的設計知識の生成

システムは、領域知識間に対応関係を生成した後、5章で述べた仮説的設計知識生成のための類推を行うことで、仮説的な設計知識を導出する(図2参照)。ピンク地のノードで示されるのが、システムによって生成された仮説的設計知識である。特に置き換えが可能だと提案されているノード同士は、直線で結ばれている。先にも述べたように、これらの仮説的設計知識は、実際に利用可能であるかはこの時点では不明である。ここで提案されているものの一部または全部を実際に新たな領域知識に含めて設計を行うかどうかは、設計者の判断に任せられる。仮に設計者が提案された知識を採用すれば、その知識がベース領域知識に反映され、知識ベースが変更される。開発したシステム上では、領域知識の変更については、提案された仮説的設計知識に基づき、リンクの追加とノードの変更の二つの操作が可能となっている。

### (5) 仮説的設計知識の評価に基づく領域知識の統合

システムによる仮説的設計知識の生成を行った後は、生成された知識を評価し、新しい領域知識として採用するかどうかを決定しなければならない。この評価は設計者が行い、設計者は評価を行うにあたり、仮説的設計知識の解釈を行う。

図3は図2における仮説的設計知識の一部を抜粋したものである。図の右側がベース領域、左側がターゲット領域の知識で

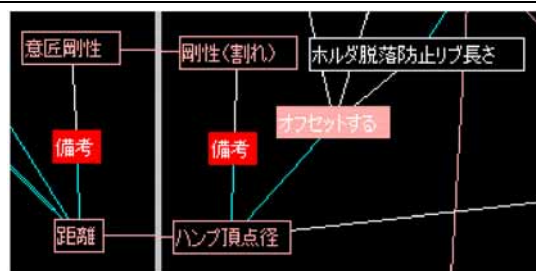


図3：対応関係の例

ある。図3では、補助ホルダガイドリブ形状の設計途中で、ハンブ頂点径を決定する作業が対象となる。ハンブ頂点径を決定する際、割れに関する剛性を考慮に入れなければならない。アナロジーの対象として、剛性(割れ)と意匠剛性、及び距離とハンブ頂点径がリンクで結ばれている。このアナロジーにはいくつかの解釈が考えられる。例えば、ハンブ頂点径を決定する際には、剛性(割れ)だけではなく意匠剛性も考慮すべきであると言う解釈が可能であり、あるいは剛性(割れ)と意匠剛性は類似の概念であるという解釈もできる。このように設計者は、導出された仮説的設計知識に対して、その設計課題との間での解釈を行い、解釈が有意であると判断できる場合、その仮説的知識を設計対象の領域知識に統合することができる。

## 7. まとめ

本稿では創造的な設計のために新しい支援の枠組みとして Universal Abduction Studio の概念を提案した。UAS の推論システムとしての特徴は、多様なレベル、方法のアブダクションの提供にある。また支援システムとして特徴は、設計者が自由にツールや知識を選択し、それらの組み合わせをつくることを可能とする環境であるという点にある。本稿では UAS 構築の第1段階としてのプロトタイプシステムについて報告した。今後この概念をより明確するとともに継続的なシステム構築を行う予定である。

## 参考文献

- [Coyne 1998] Coyne, R., Logic Models of Design. Pitman: London, 1998.
- [JSAI 2002] 特集「類似性に基づく推論」, 人工知能学会誌 Vol. 17, No. 1, 2002.
- [Roozenburg 1995] Roozenburg, N.F.M., and Eekels, J., Product Design: Fundamentals and Methods. Chichester, MA.: John Wiley & Sons, 1995
- [Schurz 2002] Schurz G., "Models of Abductive Reasoning", TPD Preprints Annual 2002 No. 1, Schurz G. and Werning M. (eds.), Philosophical Prepublication Series of the Chair of Theoretical Philosophy at the University of Düsseldorf, 2002.
- [武田 2001] 武田, 吉岡, 富山. シンセシスにおけるアブダクションの役割と定式化. 人工知能学会全国大会(第15回)論文集, 2001.
- [Takeda 1994] H. Takeda. Abduction for design. In J.S. Gero and E. Tyugu, editors, *Formal Design Method for CAD*, IFIP Transactions B-18, pages 221–244. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1994.
- [武田 1992] 武田, 富山, 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, 7(5):877–887, 1992.
- [林 1989] 林, 武田, 富山, 吉川. 設計過程の分析と論理による形式化(第3報)--サーカムスクリプションとアブダクションによるモデル化--. 1989年度精密工学会春季大会講演論文集, 7-8, 1989