

# Design, Analogy, and Creativity

Ashok K. Goel: Design, Analogy and Creativity, IEEE Expert, vol.12, no.3, pp.62-70 (1997).

類推は創造的デザインにおいて重要な役割を果たす。本稿は最近の類推に基づく創造的デザインに関する AI 研究の手短な概要を与える。創造的デザインの特徴の説明から始める。その後、類推的デザインの理論を why・what・how・when の 4 つの問いに関して分析する。次に 3 つの最近の類推に基づくデザインの理論, SYN[Borner et al 1996], DSSUA[Qian,Gero 1992], IDEAL[Bhatta 1995] を簡潔に説明する。最後に類推に基づく創造的デザインの研究課題を挙げる。

## デザインの AI 理論

- デザインの種類
  - 定型的 (routine)
  - 新奇的 (innovative)
  - 創造的 (creative)
- 新奇・創造的デザイン
  - AI 研究の重要項目
  - 類推の役割の重要性
- 論文の内容：類推に基づく創造的デザイン
  - 創造的デザインの特徴の説明
  - why・what・how・when における類推的デザインの分析
  - 最近の AI 理論の紹介
    - : 計算機実装された 3 つの理論
  - 研究課題

## 1 Creative Design

### 情報処理の一般的理論による規定

- 問題空間探索 [Newell,Simon 1972]
  - 推論目標・空間探索の操作
- 問題空間探索によるデザインのモデル化
  - 推論目標：デザインの要件 (変数・取り得る値を表現)
  - 空間探索：デザイン領域に依存
- デザインの種類
  - 定型：変数・値の範囲が固定
  - 新奇：変数が固定・値の範囲が変化
  - 創造：変数・値の範囲が変化

### AI 理論固有の規定

- 計算機処理による規程
- デザインプランに基づく定型デザイン [Brown,Chandrasekaran 1989]
  - デザインプランの選択・具体化・拡張によるデザイン
- [Brown 1996] の分類
  - 定型：デザイン空間の構造・検索手続きの両方が既知
  - 新規：デザイン空間のみが既知
  - 創造：両方が未知

### 3 つの暗示

- 問題の定式化・再定式化
  - デザイナーの問題理解はデザイン中に発展
  - 問題・解の表現の (革新的) 変化
- 直接適用可能な形式の知識がない
  - 他の知識源から獲得 (異なる問題からの類推的転移等)

- デザインにおける創造性は連続的
  - 創造性の「程度」
  - 問題と解の再定義の拡張・異なる知識源からの転移に依存

## 2 Analogical Design

創造的デザインにおける類推使用

- 概念の段階での解の提案
- 類推的デザイン
  - あるデザイン問題から他のデザイン問題への解要素の想起と転移  
与えられた問題  $P_{new}$  , 解法  $S_{new}$  (空か不完全)
  - 既知の問題  $P_{old}$  , 解法  $S_{old}$   
 $S_{old}$  の要素を  $S_{new}$  に転移
  - 要素 : 部品・部品の関係・部品や関係の設定

### 2.1 Four Issues in Analogical Design: Why, What, How and When?

4つの問い

- why : 類推を用いる課題 (目標) 関係
  - ex. デザインの候補を提案する課題
- what : 転移される知識の内容に関係
  - ex. 熱流のプロセスの知識
- how : 想起と転移の方法
  - 特定の知識表現・推論方法・制御方略を使用
- when : 処理の制御

伝統的には why と what の狭義で特徴付け

why

- 類推的想起・転移の発生
  - $P_{new}$  の解  $S_{new}$  の生成処理中
  - ex. 候補の提案, 初期デザインの修正, 部分デザインの完成
- デザイン課題への類推に原理的な制限はない
- 創造的デザインが含む課題
  - 問題の解釈・推敲, デザイン候補の改良・評価, 評価情報の解釈, 問題の再定式化 ...

類推はあらゆる課題に役立つ

what

- 課題に依存
- 知識 (要素) の転移
  - デザインの提案・修正・完成に有効
- 異なる知識の転移
  - ex. 新しい問題を解釈する知識, 新しい問題の解を評価する基準や方法
- 方略的知識 (strategic knowledge ↔ domain knowledge) の転移
- 類推的デザインの再定義
  - あるデザイン状況から他のデザイン状況への知識の想起と転移
  - 転移はデザイン課題中に発生
  - 転移内容は問題・解・領域・方略の知識

how

- 課題と内容に依存
- 事例に基づく推論 (Case-Based Reasoning: CBR)
  - how の一般的な答え
  - $P_{new}$  と  $P_{old}$  が類似するなら  $P_{new}$  はだいたい  $P_{old}$  に似ている
  - $S_{old}$  の修正による  $S_{new}$  の獲得 ( $S_{old}$  全体を転移)
  - 類推の特殊ケース (転移 修正)
  - 変形設計 (variant design) ・ 適用的設計 (adaptive design)
- CBR の区分
  - 変形類推:  $S_{new}$  は  $S_{old}$  を変形して獲得  
: 関連付け・領域知識を使用
  - 誘導類推:  $S_{old}$  生成の処理トレースを適用
- デザインでの制限
  - 修正の知識は変形デザインでのみ最適
  - 処理トレースは現実のデザインでは一般に使用不可能
- モデルに基づく推論
  - 「深い」デザイン知識の使用
- 領域内・領域間の類推 [Vasniadou, Ortony 1989]
  - 領域の特徴付け: オブジェクト・関係・処理の表現方法
- CBR による how の答え
  - 問題が類似している時は解も類似する場合に限定
  - 類似しない問題間の CBR はどうなる?  
デザインにおける創造性と関係
- 汎用的な抽象化
  - 転移: オブジェクトとプロセスの関係構造を使用
  - デザインでは幾何学・時間・因果・機能的関係等
  - 目標・方法を決定
  - 汎用的なデザインの抽象化 (generic design abstractions) の学習の重要性
- 類推的デザインの再定義
  - あるデザイン状況から他のデザイン状況への汎用的なデザインの抽象化の学習と転移
  - 汎用的なデザインの抽象化は問題・解・領域・方略の要素間関係を決定

when

- 処理の方略制御
  - 汎用的なデザインの抽象化の学習が好例
- 学習の発生時期
  - eager learning  
: デザインのメモリ格納時
  - lazy learning  
: 既知のデザインの想起時  
: 知識の転移時

### 3 Three Theories of Analogy-Based Creative Design: SYN, DSSUA, and IDEAL

類推に基づくデザインの研究例

- 3つの理論
  - デザインの概念段階を扱う
  - 汎用的なデザインの抽象化の有効性を示す
  - 計算機システムとして具体化

- DSSUA [Quan,Gero 1992]
  - 抽象化：デザインのプロトタイプ
- IDEAL [Bhatta 1995; Bhatta,Goel 1996; Bhatta,Goel,Prabhakar 1994]
  - 抽象化：デザインのパターン
- SYN [Borner et al. 1996]
  - 抽象化：デザインのコンセプト

### 3.1 Design Concepts as Generic Abstractions: SYN

#### SYN

- 概要
  - FABEL (ビルの空間レイアウト設計における建築 CAD) のモジュール
  - 対象：空間レイアウト設計の空気循環システム
    - :排気口とパイプ接続
  - 所期仕様：通路・排気口・パイプの座標を表現する属性-属性値
  - 解：通路と排気口に接続するパイプを配置したデザイン案
- 事例表現
  - グラフに基づく形態モデル
  - ノード：通路・排気口・パイプ間接続
  - リンク：パイプ
  - デザインのコンセプトの木表現
    - :コンセプトは最大公約のサブグラフに相当
- コンパイル
  - 問題仕様 (属性-属性値) からグラフ形態モデルへの変換
  - 逆コンパイル (上記の逆)
- 処理手順
  - 問題仕様のコンパイル (グラフ形態モデルへの変換)
  - デザインのコンセプトにおいて分類
  - コンセプトに基づく事例の検索
    - :構造の類似性に基づく分類・検索
  - 事例の最大公約のサブグラフを具体化, 問題への転移
  - 逆コンパイル・出力

#### SYN の類推

- 処理
  - 形態パターンを表現したデザインコンセプトの分類
  - 最もマッチングするコンセプトを検索
  - コンセプトの具体化による解の生成
- コンセプトの抽象化はしない
- 解の評価はユーザに委任
- システムの利点
  - コンセプトによるライブラリの構築
  - 所期仕様からの変形

### 3.2 Design Prototypes as Generic Abstractions: DSSUA

#### DSSUA (for Design Support System Using Analogy)

- 概要
  - インタラクティブな類推に基づく創造的デザインシステム
  - 建築設計における機械デザイン (家のドア等)

- 事例表現
  - デザインのプロトタイプ
    - 事例を抽象化
  - 機能・振舞い・構造 (Function-Behavior-Structure: FBS) モデルによる表現
  - 構造グラフ (部品の関係を抽象的に記述)
    - 例: 窓のカーテン
      - 部品: 窓, ロッド, リング, カーテン
      - 関係: ロッド (窓に取り付け), リング (ロッド上をスライド), カーテン (リングに接続)
  - 振舞いグラフ (部品の間の因果的影響)
    - 例: カーテンが覆う領域はロッドとスライドの距離に比例
- 初期問題表現
  - 構造グラフ
    - 例: 部品 ( 枠, ちょうつがい, ドア ) と
    - 関係 ( ちょうつがいは枠, ドアはちょうつがいに取り付け )
    - 問題 ( ドアのデザイン ) と抽象的な解 ( ちょうつがい式ドア ) を表現
- 事例検索
  - 構造グラフによるプロトタイプの検索
    - :問題の振舞いグラフの作成 ( ちょうつがいの角度によるドアの開き方等 )
  - 振舞いグラフによるプロトタイプの検索
    - :問題にない要素を転移
- 抽象化
  - 問題と同型でないプロトタイプからの転移 ( ドアに対してカーテンから )
  - 因果的依存性の抽象化 ( ドアの角度とカーテンの距離 )
    - 新しい「スライドドア」の生成が可能に

#### DSSUA の類推

- 領域間の類推
  - FBS モデルの語彙・抽象化表現に依存
- 創造的デザインシステム
  - 新しい変数生成の可能性

### 3.3 Design Patterns as Generic Abstractions: IDEAL

#### IDEAL

- モデルに基づく類推
  - ウチの Bhatta 君が実装
- 概要
  - 工学装置 (自動コーヒーメーカー, 電子アンプ, ジャイロスコープ) の概念デザイン
  - 事例・類推に基づく両方略を使用
- 領域知識
  - デザインの analog (事例), デザインのパターン, デザインのコンセプト, 汎用的なデザイン部品, 汎用的な領域内容
- オントロジー
  - SBF モデルによる事例表現の構成要素
  - 部品や装置の知識
    - 接続・振舞いのインタラクション, 振舞いの状態・状態遷移, 機能
- デザインパターン
  - 過去のデザインエピソードの汎用的な抽象化
  - 学習するパターン (SBF の BF に相当)
    - :一般的な物理法則 (General Physical Principles: GPP)
      - 「熱 冷の熱流」のような因果関係
    - :一般的な目的メカニズム (Generic Teleological Mechanisms: GTM)
      - 機能と因果関係のパターン

## IDEAL のプロセス

- デザインプロセスの例
  - GTM を学習・想起して使用
- 問題表現
  - 機能的要求 (あれば) 振舞いや構造の制約
  - 例: 電子アンプ・出力電圧の変動を小さく
- 問題解釈
  - 部品の概念知識による問題仕様策定
- 想起
  - デザインの analog を作成
  - 機能的に類似する analog の事例の検索
  - 例: 機能的に類似する「電圧変動を大きくするアンプ」を検索
- 適用
  - 問題と事例を比較, 相違点から適用ゴールを作成
  - 例: 事例の電圧変動を減らす
- 異なる領域間の類推の例
  - 問題: 指定範囲の推進力を超えないジャイロスコープ
  - 出力の変動が大きいジャイロスコープの事例が検索
  - 問題と事例の比較から適用ゴールを作成 失敗
  - 適用ゴールの抽象化・GTM のメモリを調査
  - アンプでを使用した GTM を検索・具体化

## IDEAL の類推

- 書ききれない
- 領域間の類推
  - DSSUA 同様の創造的デザインシステム

# 4 A Research Agenda for Analogy-Based Creative Design

## 4つの問いに関する研究課題

1. 類推の使用
    - 概念デザインにおいて有効
    - 問題解釈・問題分割・解の生成・問題統合・予測・評価・評価解釈・問題再解釈
    - SYN・DSSUA・IDEAL では実行するか? しないとしたら理由は?
    - 多様な領域・後半な課題での類推使用に伴う課題は?
  2. 汎用的なデザインの抽象化
    - SYN・DSSUA・IDEAL の転移を介在
    - 各々の手法の違いは領域の違いを反映
    - 他の手法は? 領域との関係は?
  3. モデルに基づく手法による転移
    - 形態モデル・FBS モデル等の差は領域差
    - 適切な知識表現は? 知識表現と推論・デザイン課題との関係は?
  4. 知識の学習
    - SYN では既知, IDEAL は eager learning, DSSUA は lazy learning
    - 学習のトレードオフは? 領域・デザイン課題との関係は?
- 網羅的ではない, 実証的な課題だが野心的で exciting