

プラスチック成形品における設計制約学習システム

守屋 哲朗[†] 曾根 順次[‡] 沼尾 正行[†]

[†] 東京工業大学大学院 情報理工学研究科 計算工学専攻
{moriya,numao}@cs.titech.ac.jp

[‡] 株式会社 東芝 精密技術研究部

概要

設計分野においてこれまで知的CADの研究が行なわれてきたが、新たな設計知識の獲得が困難でありシステムの柔軟性に欠けるという問題点があった。また、これまでの機械学習の手法ではCADで必要な三次元形状を取り扱うことは困難であった。以上の問題を解決するために、本研究では幾何推論を用いた二段階処理の学習手法を提案する。この手法を用いて、プラスチック成形品における設計制約を学習するシステムを構築し、実験、評価を行なった。

Learning System of Design-Constraints for Plastics

Tetsuro Moriya[†], Junji Sone, and Masayuki Numao[†]

[†]Department of Computer Science, Tokyo Institute of Technology
2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152, Japan

Abstract

In the field of design, the raw data of intelligent CAD does provide a little knowledge to a naive designer. He or she needs to be assisted by an expert to fully grasp the knowledge contained in the data. In order to replace this assistance, a learning system has been integrated with diagram reasoning to elicit useful knowledge from the rather obscure data. We have used a learning system which expresses its learned knowledge in first order predicate form readily understandable by a human user. We adapted the learning system according to the design constraints of plastics and experimented for evaluating the integrated system.

1 はじめに

設計の分野においてこれまで知的CAD、自動設計といった研究 [3, 4] が行なわれてきた。これは計算機上で図面を描く作業だけでなく、設計プロセス全体を支援するという目的で行なわれている。例えば、構造解析、製造工程のプランニング、設計制約を満たすための変更などの支援が挙げられる。こうした支援を行なうためにはシステムが設計に関する知識を持つことが不可欠である。

しかし、こうした知識があらかじめ組み込まれたシステムは柔軟性に欠ける。設計制約は現場に応じて変わったり、時が経つにつれて変化することもあるし、現場特有の知識を組み込むことも困難だからである。本研究ではプラスチックの射出成形品における設計制約を対象にして、設計例、すなわち、CAD の出力データから設計制約を学習するシステムの構築を目的とする。機械学習の手法を用いて設計制約を学習できれば、初心者に対する支援はもちろん、制約知識を持っている専門家にとってもシステムが変更すべき箇所を指示してくれるので設計変更の手間を減らすことができる。

これまでの機械学習の手法では、CAD データから設計制約を直接学習することは困難である。これは入力となる CAD データがほとんど座標値データであるのに対して、設計制約は幾何要素間の関係(幾何的な性質)によって表現されるものであり、数値では表現できないからである。従来の学習手法では座標値データから述語表現される概念を学習することはできない。ニューラルネットを用いると座標値データを学習できるが、関係概念は学習することができず、設計知識のような高次の知識を学習することは困難である。

本研究では幾何推論を用いた二段階処理の学習方法を提案する。幾何推論を「座標値などで与えられる三次元モデルから推論ルールを用いて幾何的な性質を導出する」とこととし、「幾何的な性質を述語によって表現したもの」を幾何情報と呼ぶことにする [6]。述語表現された CAD データを幾何推論によって幾何情報に変換すれば、FOIL [1] のような学習システムが利用可能になる。

2 射出成形法

射出成形法では、求める成形品の形に彫りこまれた金型に、高温で融解したプラスチックを流し込み、プラスチックが冷却固化した後に、金型を開いて製品を取り出す。図 1 に示すように三段階の工程がある。

型締段階 金型を締めつける。

射出段階 注入口となるスプルーブッシュに射出装置のノズルを差し込み、金型内部に融解したプラスチックを射出する。

取出段階 プラスチックが冷却固化した後に、金型を開いて成形品を取り出す。

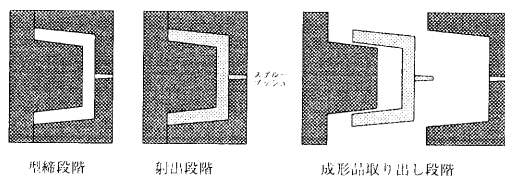


図 1: 箱形状製品の射出成形

これらの動作、あるいはプラスチックの流動性に起因する以下のような制約がある。

- アンダーカット (under.cut)
側面などに突起や孔があり、金型を開くことができないという制約。
- 孔が近い (near.hole)
孔の位置が成形品の端に近い状態を表す制約。
- 抜き勾配がついていない (no.taper)
成形品の側面部に金型から抜けやすいように角度が付けられていない状態を表す制約。
- シャープエッジ (sharp.edge)
成形品のコーナー部分に丸みが付けられていない状態を表す制約。

3 学習方法

3.1 設計における学習

プラスチック成形品の設計では、まず大まかな仕様等が決められ、それから成形品の詳細な設計へと移っていく。この詳細設計を行なう段階では、

通常何度か変更が行なわれる。変更の原因はいくつかありうるが、設計制約を満たすように変更されることが多い。

射出成形法の場合は金型を利用するので、プラスチックの流動性、金型製作の容易さ、といったことを踏まえた設計制約が存在する。

設計の過程においてある制約を満たすような変更が行なわれたとする(図2参照)。設計制約を学習するという事は「制約を満たしていない状態」を検出することであるので、この変更前後の設計例がそれぞれ正例、負例となる。正例、負例の違いは満たしたい制約に関係したものであり、関係のない部分は全く同じである。設計過程の性質を利用することによって学習が容易になると考えられる。

一つの製品を設計する過程において、通常いくつかの制約が考慮される。例えば、最初の変更によってアンダーカットが解消され、次の変更によってシャープエッジの除去が行なわれたとする。三つの設計例が存在することになるが、アンダーカットにとっては最初の二つが正例となり、残りの二つが負例となる。シャープエッジの除去にとっては最初の二つが正例となり、残りの一つが負例となる。一つのプラスチック製品を設計する過程においてそれぞれを訓練例としてとらえ、制約に応じて正例、負例を区別するだけで複数の制約を学習することができる。

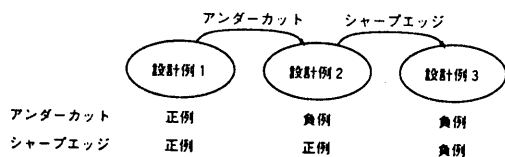


図 2: プラスチック成形品の詳細設計

3.2 学習方法

入力される CAD の出力データ(訓練例)は座標値データであり、従来の機械学習(例からの学習)手法では直接、制約を学習することはできない。そこで本研究では、図3に示すように、幾何推論を利用した二段階処理の学習手法を提案する。幾

何推論によって、座標値データから幾何的性質を述語表現した幾何情報を導出する。この幾何情報を帰納学習システム FOIL への入力とすることによって、設計制約を学習することが可能になる。

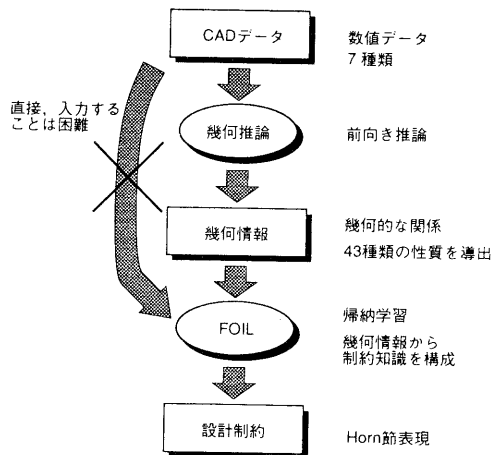


図 3: 学習の流れ

1. CAD データのフォーマット変換

CAD データを Prolog で読み込めるように述語形式に変換する。

2. 幾何推論を行ない、幾何情報を導出

設計制約を学習するために必要な幾何的性質を CAD データから導出する。

3. FOIL を使った帰納学習

与えられた多数の設計例から導出された幾何情報をひとつのファイルにまとめる。このデータを背景知識とし、訓練例から帰納学習を行なう。設計上の制約を学習したいので制約を満たしていない設計例を正例として扱う。FOIL[1] は導出された幾何情報の中から必要なものだけを選択し、設計制約を構成する。

3.3 CAD データ

CAD システムとして DESIGNBASE¹を用いた。この CAD は標準化されたフォーマットである IGES²[2] 形式でデータを出力することができる。

¹©株式会社 リコー

²Initial Graphics Exchange Specification

このデータを述語形式に変換することによって、直線、平面 (2 種)、円弧のデータ、直線と円弧がどの平面に属するか、平面の包含関係という 7 種類の述語が得られる。

3.4 幾何推論

幾何推論では 60 個の推論ルールを用いて前向きに推論を行ない、導出可能な幾何情報はすべて導出する。幾何情報は設計の領域に依存したのもも含めて 43 種類ある。

幾何推論ではボトムアップに認識が行なわれる。CAD データで与えられるのは直線、円弧、平面のデータである。まず円の認識が行なわれ、次に曲面すなわち、円筒面、球面、円錐面が認識される。最後に立体すなわち、壁、穴、リブ、突起、くぼみの認識が行なわれる。

幾何対象が認識されたのち、座標値データから幾何情報を導出する。幾何情報は図 4 のように階層構造となっており、以下に示すような幾何的性質を表す。

has_

対象が一つ下の階層の対象を含んでいるという従属関係を表す。

connect_

同一階層にある対象の接続を表す。

include_

同一階層にある対象の包含関係を表す。

_dir

方向ベクトルをもつ立体の方向を表す。

distance_

幾何対象同士の距離を表す。

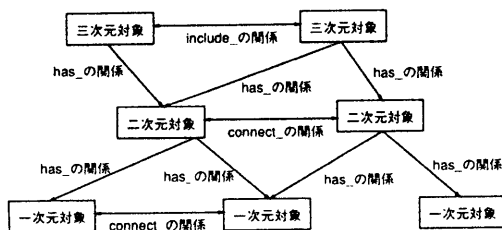


図 4: 階層的知識の例

射出成形品の設計においては、パーティングライン (分割面) が重要な要素でありこれに関する性

質として、パーティングラインとのなす角度、平面が一致するか、垂直方向であるかといった幾何情報も導出される。

図 5 に示すような設計例の場合、例えば以下のような幾何情報が導出される。

- **has_line(plane1,line1)**

平面 (plane1) が直線 (line1) を含むことを表す。

- **connect_line(line1,line2, 交点座標)**

直線同士 (line1 と line2) の接続関係を表す。

- **include_hole(wall1,hole1)**

壁 (wall1) が孔 (hole1) を含んでいることを表す。

この例の場合では 66 個の入力データに対して出力データ数は 228 個になる。

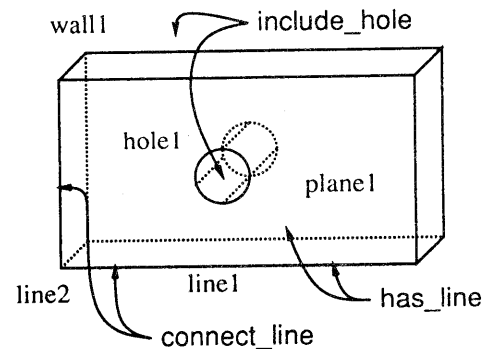


図 5: 幾何推論の具体例

3.5 FOIL による学習

設計制約に対する正例と負例、およびすべての訓練例に対する幾何情報を FOIL に入力する。この時幾何情報が背景知識となる。FOIL は Gain ヒューリスティックに基づいて学習するので、獲得された概念は必要な幾何情報だけを用いて一階述語論理で表される。

訓練例とは別の設計例が与えられると、まず幾何推論によって幾何情報を導出しその例が学習した概念を満たすかどうかによって制約を破った設計を判断することができる。また、幾何情報を調べることによりどの部分が原因であるかということも分かる。

4 実験

2 節で述べた設計制約に応じた訓練例を用意する。まず、基本となる形を決めそれらに変更を加えて正例と負例を作成する。前述の四つの設計制約は独立しているので 16 通りの変更が可能である。基本形 10 種にそれぞれに 16 通りの変更を加え 160 個の設計例を作成した。

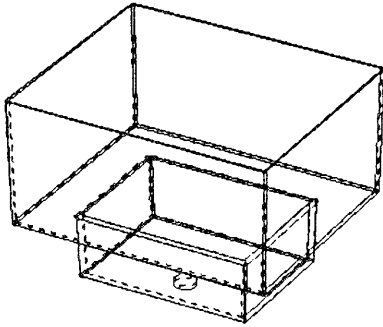


図 6: 設計例

クロスバリデーション法を用い、160 個の訓練例により前述の設計制約の学習実験を行なった。また、幾何推論を評価するための実験も行なった。

実験 1 学習に用いる訓練例の数を 16 個, 32 個, というように増加させて学習の精度を調べる。

実験 2 入力される設計例に含まれるデータ数に対する、推論時間と出力データ数を調べる。なお、幾何推論は SICStus Prolog2.1 を用いて SPARC Station 20/61 上で行なった。

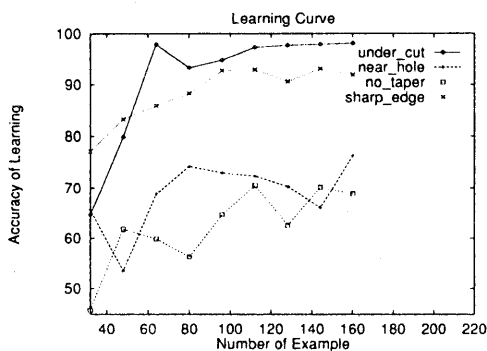


図 7: 訓練例の数に対する正確さ

訓練例の数に対する学習結果(実験 1)を図 7 に、入力される設計例のデータ数に対する、幾何推論の時間と出力データ数(実験 2)を図 8 に示す。

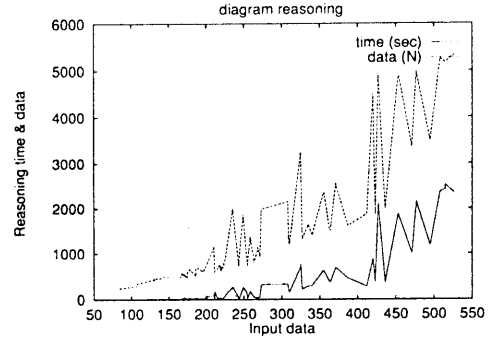


図 8: 推論時間と出力データ数

アンダーカット (under_cut) とシャープエッジの除去 (sharp_edge) の制約は 90% 以上学習できたが、孔が近い (near_hole) と抜き勾配 (no_taper) の制約は 75% 程度の学習しかできなかった。これらの制約の違いは制約に「数値に関する条件が含まれている」か「含まれていない」ということである。孔が近いという制約は距離に関するリテラルが、抜き勾配の制約は平面の角度に関するリテラルが含まれている。

FOIL は連続値の境界を学習することが可能であるがその探索の優先順位は低く、正しい制約を学習できない場合が起こる。制約とは無関係なリテラル(幾何情報)に関して偏りがあると、そのリテラルの方が先に探索されてしまうからである。

160 個の設計例から得られる幾何情報はかなり大きなもの (10MB) であるが、学習時間はアンダーカットで 50 秒程度、孔が近い制約の場合は 2 時間程度である。学習にかかる時間は入力される幾何情報の量よりも学習しようとする制約の性質に影響される。数値に関する条件を含まない制約の学習は訓練の数が多くても学習時間は短かった。

幾何推論を行なう時間は入力データ数の増加に対して指数関数的に増加していると考えられる。特に立体を認識する推論ルールが原因となる。このルールは前提条件が多く、条件の途中まで実行しても失敗して幾何情報を何も導出しないことがある。設計例に立体が多く含まれるとこの推論ルールが繰り返し適用され、また失敗することも多くなり、計算時間に影響を与える。

推論の効率化のために、幾何情報の整理および洗練と誤差処理の改善を行なうことが考えられる。

幾何情報は次元によって分類した階層的な体系であるが、さらに洗練することによって幾何推論と学習の効率化が期待できる。

座標値データを扱うので誤差の処理は必要になる。本システムでは推論ルールの中で誤差の計算を行なっているため、推論の効率が悪くなっている。CAD の出力データに含まれる誤差は非常に小さいものであるのであらかじめ閾値を設定することができれば、データを読み込む際に一括して誤差処理を行なうことができるであろう。

また、推論時間を減らすためには学習する概念とは無関係な幾何情報の導出を抑える必要がある。そのためには二段階処理ではなく、学習機構からのフィードバックを利用して幾何推論を進めるといふ、推論と学習の相互作用が有効だと考えられる。

5 関連研究

花田ら [5] は射出成形品向け知的 CAD システムの研究を行なっている。このシステムは設計対象の特徴を記述した知識ベースを利用して設計支援を行なうものである。

本システムは設計制約を学習によって獲得し、それを利用して設計例の判定を行なうことができる点がこれまでの知的 CAD と異なる。また、学習機構が CAD と独立しており、CAD におけるモデルの表現方法に依存することなく学習できる。

清水ら [6] は設計過程における幾何推論の研究を行なっている。この幾何推論は本論文で述べたものとは異なり、位相制約、構造制約、寸法制約といったあらかじめ与えられた制約のもとで幾何要素の属性を、ATMS を用いて計算処理するものである。

「図による推論」[7] の研究には図の表現力を生かした推論を行なう研究と、図を対象とした推論の研究があり、本研究は後者に属する。CAD のデータを利用して推論を行ない、しかも例からの学習を行なうというところに本研究の特徴がある。

設計分野における学習の研究は少なく、とくに例からの学習に関する研究はこれまで行なわれてこなかったが、本研究では座標値データである訓練例 (CAD 出力データ) から、高次の設計制約を学習できた。

設計の分野ではあらかじめ制約知識などを与え

ておき、それらの知識をどのように利用するかという点に重点がおかれている。しかし、設計制約の中には現場や時代によって変わるものもあるので、設計例から制約を学習することは重要であると考えられる。

6 まとめ

本研究では座標値データから述語表現された設計制約を学習するために幾何推論を用いた二段階処理の学習手法を提案した。この手法にしたがって設計制約学習システムを構築し実験を行い、CAD の出力データを訓練例として、設計制約を学習することが可能であることを示した。実験結果から数値を含む制約は学習が困難であるが、数値を含まない制約については学習できることが分かった。

今後の課題は幾何情報の整理、洗練と他の機械学習手法の利用を検討すること、学習した設計制約を設計例の判定に利用するだけでなく、自動設計に応用することである。

参考文献

- [1] J.R. Quinlan. Learning Logical Definition from Relations. *Machine Learning*, Vol. 5, , 1990.
- [2] Bradford Smith, Gaylen R. Rinaudot, Kent A. Reed, and Thomas Wright. *Initial Graphics Exchange Specification (IGES), Version 4.0*. Society of Automotive Engineers, Inc., 1988.
- [3] 吉川弘之, 富山哲男 (編). インテリジェント CAD (上) --理念とパラダイム--。朝倉書店, 1989.
- [4] 長澤勲. 設計の諸相と知的 CAD. 精密工学会誌, Vol. 54, No. 8, p. 30, 1988.
- [5] 花田宏司, 玖波井説文, 元田武彦. 射出成形品向け知的 CAD システム. 人工知能学会研究会資料 SIG-KBS-9002, 1990.
- [6] 清水周一, 沼尾雅之. 幾何制約に基づく 3 次元形状の設計. 人工知能学会誌, Vol. 9, No. 4, pp. 129-38, 1994.
- [7] 西田豊明, 安西 祐一郎 (編). 特集: 「図による推論」. 人工知能学会誌, Vol. 9, No. 2, pp. 182-215, 1994.