

## 1. はじめに

人が建築空間をデザインするとき、空間の構成要素の属性や幾何学的関係に関するいくつかのパターンを駆使していると思われる。それらは、独自のものもあれば、多くの人に共通のものもある。それらの起用法が設計者の作風や空間の特徴を造り出している。しかし、それらの大部分は経験や訓練によって身につけてきたものであり言葉で言い表すことが困難なものである。このような技能、知識、判断力、直感力を暗黙知という。

本人でさえうまく言語化できない行為を、第三者が直感的に解釈してパターンを発見しようとする場合、主観が介入し、偏りが生じる。本論文では、機械学習の枠組みの一つである帰納論理プログラミング (Inductive Logic Programming, 以下、ILP) を応用して、建築空間のデザインにおける潜在的なパターンを客観的に発見するシステムの提案をする。

建築空間のデザインという行為を機械学習の対象とするためには、その手法をある程度モデル化して考える必要がある。本論では、モデル化された空間構成手法として居住空間構成法<sup>文献1</sup>を利用する。居住空間構成法 (以下KK法) は、空間図式の解明を目的として開発されたもので、1/50スケールのモジュール化された様々な壁、家具、人形等の模型をホワイトボード上に自由に配置して具体的な建築空間を表現する手法である。

本論文では、まず帰納推論とILPおよび本システムで応用するILPの一つであるprogolの概要を述べ、次にKK法による作品の制作過程 (以下、「空間構成過程」) から規則を抽出するシステムの概要を説明する。さらに、本システムにより抽出された規則の一例とその考察を示す。

## 2. 帰納推論とILPおよびProgolの概要

### 2.1 帰納推論

帰納推論 (Inductive Reasoning) は、概念学習の枠組みの一つである。個々の事例を一般化<sup>注1</sup>して新たな概念である規則を導き出す推論であり、人間の概念獲得でも一般的な方法である。幼児は、タイヤが4つあり車体があるという情報から、「走っている自動車」と、「絵本の中の自動車」が同じ「自動車」であることを認識できる。こ

れはまさに事例の一般化による概念獲得である。

概念学習に利用できる既知の知識の総称を「背景知識」、背景知識だけでは説明できない概念に対し背景知識に加えることでその概念が説明可能となる、変数を含む規則を「仮説」、仮説によって説明しようとする事例を「正事例」、説明してはならない事例を「負事例」と呼ぶ。

### 2.2 帰納論理プログラミング

ILPは、Stephen Muggleton、Ross Quinlan等によって開発された帰納推論の体系の一つであり、帰納推論を、一階述語論理上で展開する枠組みである。これは、データマイニングの目的の一つである、データベースにおける知識の発見 (Knowledge Discovery in Database, KDD) を、一階述語論理上で展開し、これまで、ID3やC4.5といった命題論理に基づく機械学習システムでは学習不可能であった、データ間に潜む論理的、関係的パターンの発見を可能にしたものであるともいえる。ILPは、与えられた背景知識を使って事例の一般的な概念である仮説を生成する。仮説は、既知の背景知識とそれが一般化された記述の組合せである。仮説の生成は「既知の背景知識とそれが一般化された記述の間の可能な組合せの中から、適切な基準によって評価し最適な仮説を選択する」という探索問題として定式化される。

### 2.3 progol

本システムでは規則の抽出にILPの一つであるProgolを用いている。Progolは、Stephen Muggleton<sup>文献2</sup>等によって開発された帰納推論システムである。動作原理は単純な枚挙法ではなく、最弱仮説 (Most Specific Hypothesis, MSH) の生成や、その生成過程において変数の伝播を制御するモード宣言などの言語バイアスの設定により、探索空間の縮小と計算の効率化が図られている。また、Progolの探索は、発見的評価関数を用いた最良優先探索であるA\*探索に改良を加えたA\*-like探索であり、網羅的なトップダウン探索によって最良解を求める。progolでの候補仮説の評価基準は記述長最小原理 (Minimum Description Length Principle) を採用しており、より多くの正事例を被覆 (説明) し、かつ被覆 (説明) する負事例がなるべく少なく、記述がより簡潔な (記述長が短い) ものほど、優良な仮説として評価する。

3. KK法による空間構成過程から規則を抽出するシステム  
 KK法による空間構成過程において、既にボード上に配置されている道具群の配置状態に応じて、新たに次の道具を配置する行為を「配置行為」と呼ぶことにする。配置行為で新たに配置された道具を「主道具」、既に配置されていた道具群の内、主道具と関係づけられたものを「目的道具」と定義する。道具間の関係は、意味的な関係および幾何学的関係が考えられるが、意味的な関係は作品上に形あるものとして現れず、データとして得ることができないので、現時点では幾何学的関係のみを指すことにする。配置行為は、「主道具を目的道具に幾何学的に関係づけること」と言い換えることができる。

以下に、「どのような目的道具の配置に対して、どのような主道具が、どのような幾何学的関係で配置されるのか」を規則として抽出するシステムの説明をする。

### 3.1 システムにおける全体の作業の流れ

KK法による作品制作の実験の様子を被験者の了承のもとで記録させて頂き、実験後に空間構成過程を幾何学的関係認識システム(後述)に入力し、道具間の幾何学的関係と道具の属性を抽出して一階述語論理による記述で出力する。さらにその記述を論理型プログラムによって時間的に連続した一まとまりの配置行為を表せる書式に変換し、最後にそれを Progol に入力して規則を抽出する。

### 3.2 道具間の幾何学的関係認識システム

配置行為ごとに道具間に新たに生成される幾何学的関係と道具の属性を自動的に認識して、一階述語論理で出力するシステムである。これにより、空間構成過程から、配置行為をある一定の基準に基き、客観的に、偏りなく抽出することが可能となった。データ自体が客観性を保持していることは、Progolにより発見される規則に客観性を与えるための必要条件である。ただし、本論文では、認識可能な幾何学的関係は主道具の種類が壁である場合のみに限定している。

幾何学的関係認識システムは、汎用 CAD である MiniCAD を C 言語および Pascal 言語でカスタマイズして作成した。シンボル化された壁や机等の道具(KK法の実験で使われる道具と同じものを準備した)を選択して、CAD画面上に自由に配置できる。道具が配置された順序と道具の頂点座標および属性からなるデータと、事前に準備した幾何学的関係の数理的定義とのテンプレートマッチングにより道具間の幾何学的関係を認識する。

実験後、作品の制作過程をビデオ撮影した画像を参考にしつつ、実際の配置順序通りに入力した。一旦ボード上に置かれて、その後、場所移動された場合は、最終的に位置が定まった時点その道具が配置された順番とみなした。

#### 3.2.1 認識可能な幾何学的関係および道具属性

幾何学的関係認識システムが認識可能な幾何学的関係を

を以下のように定義した。幾何学的関係の一階述語表記表記時の表現、およびその一般的な形態の一覧を表1に示す。

(1)伸長:目的道具の端点から延長するように主道具が配置された関係。(2)挿入:複数の目的道具の端点を連結するように、主道具が挿入された関係。(3)平行分離:主道具が目的道具に直接触れないが、平行に配置された関係。(4)直線分離:目的道具に直接触れずに、その延長線上に主道具が配置された関係。(5)独立:既に配置されている道具と(1)から(4)のどの関係もなく、独立した配置。

以上の(1)から(5)の関係を大まかに形態を表す上位の幾何学的関係(以下、レベル1の関係)とし、さらに詳細な形態を表す下位の幾何学的関係(以下、レベル2の関係)に分類した。また、幾何学的関係認識システムで認識される道具の属性は、ホワイトボードに対する角度、道具の種類、道具の長さ、道具の色の4つである。各属性のとり値を表2に示す。

#### 3.2.2 配置行為の一階述語論理による記述

幾何学的関係認識システムは、一回の配置行為を次の5種類の述語で表現して出力する。

表1 幾何学的関係の一般的な形態

	レベル1の関係	レベル2の関係	形態		レベル1の関係	レベル2の関係	形態
幾何学的関係あり	con_exp 伸長	s0_1		幾何学的関係あり	非接続関係	reg_double	
		s0_2				reg_near	
		s0_3				reg_right	
		s0_4				reg_far	
	con_join 挿入	s1_1				irreg_double	
		s1_2				irreg_near	
		s1_3				irreg_right	
		s1_4				irreg_far	
		s2_2				semi_double	
		s2_3				semi_near	
		s2_4				semi_right	
		s3_3				semi_far	
		s3_4				near	
		s4_4				right	
幾何学的関係なし	no_rel 独立	no_var		det_line 直線分離	far		

\* 表中の黒い道具は主道具を、白い道具は目的道具を表す

表2 道具の属性

道具の種類		道具の角度		道具の長さ		道具の色			
ww 無開口壁	pm パツグメツ	0 平行	18 1800mm	red 赤	cre クリーム	met パツグメツ	c_whi 無輪透明		
ot 窓付き壁	nt 金網	90 垂直	24 2400mm	yel 黄	ivo アイボリー	mir 鏡面	bro 茶		
cd ドア窓壁	sw ソフト壁	45 斜め	36 3600mm	gre 緑	min ミント	net 金網	gla グレー		
cl 透明壁			54 5400mm	blu 青	whi 白	c_red 透明赤	bla 黒		
mr 鏡面壁				pin ピン	woo 木目	c_blu 透明青	no_color 色指定無し		

tool\_type(主道具番号, 主道具の種類).  
 tool\_length(主道具番号, 主道具の長さ).  
 tool\_angle(主道具番号, 主道具の柄杓'ト'に対する角度).  
 tool\_color(主道具番号, 主道具の色).  
 relation(主道具番号, レベル1の関係, レベル2の関係,  
 [目的道具番号,...]<sup>注3</sup>).

実際、一回の配置行為で生じる幾何学的関係は一つとは限らない。通常、複数の道具との間に複数の幾何学的関係が生じる。従って、述語relation/4<sup>注3</sup>は、一回の配置行為で生じた幾何学的関係の数だけ出力される。幾何学的関係認識システムの入出力例を図1図2に示す。

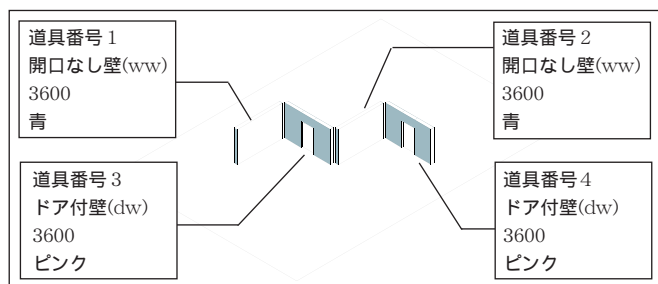


図1 幾何学的関係認識システム入力例

tool_type(1,ww).	tool_type(3,dw).
tool_length(1,36).	tool_length(3,36).
tool_angle(1,0).	tool_angle(3,90).
tool_color(1,blu).	tool_color(3,pin).
relation(1,no_rel,no_var,[no_obj]).	relation(3,con_exp,s1_1,[2,1]).
	tool_type(4,dw).
tool_type(2,ww).	tool_length(4,36).
tool_length(2,36).	tool_angle(4,90).
tool_angle(2,0).	tool_color(4,pin).
tool_color(2,blu).	relation(4,det_para,semi_right,[2]).
relation(2,det_para,semi_right,[1]).	relation(4,con_exp,s0_1,[1]).

図2 幾何学的関係認識システム出力例

### 3.3 progolによる配置行為の規則の発見

ここでは、KK法による空間構成過程における配置行為の規則抽出という問題をprogolに適用させるための幾つかの工夫と特徴およびその意図を述べる。まず、最終的にprogolに学習させたい規則の構造、つまりprogolが生成する仮説の構造を示す。次にそれを実現するためのモード宣言と背景知識を説明する。

#### 3.3.1 仮説の構造

2.3で述べたように、progolでは、記述長最小限理に基づき、被覆する事例の数が同じとき、本体部のリテラル数の少ない候補仮説ほど評価値が高くなる。図2に示したような5種の述語の組合せで仮説を生成すると記述長が短いものが高く評価される。仮説の記述長が短いことは、抽象的で形態や道具を特定する情報が少ないことに等しい。しかし、配置行為の規則としては可能な限り具体的に幾何学的条件が特定できることが望ましい。

この問題点を解決するために、本論文では、仮説の本体部分を多くの項を持つ一つのリテラルとし、一つのリテラルで一回の配置行為に関する全ての情報を表すようにした。つまり、生成される候補仮説は表す内容の具体抽象を問わず、その記述長はすべて等しくなる。これに

より、候補仮説がその記述長によらず事例の被覆数のみで評価されるようになる。

また、単一の配置行為だけでなく、時間的に連続する複数の配置行為がまとまって一つの規則をなす場合も考えられる。規則性を持った連続する複数の行為を一まとまりとして表現する必要がある。このような配置行為を「連続配置行為」、その連続数を「連続行為数」と呼ぶことにする。以上の根拠から、生成される仮説本体部を次の述語n\_placement/14で表すことにする。

```
n_placement(連続行為数n,  

  [連続配置行為における最初の主道具番号 an,...],  

  [目的道具の数 be,...],  

  [主道具の種類 st,...],  

  [主道具の長さ sp,...],  

  [主道具の柄杓'ト'に対する角度 sa,...],  

  [主道具の色 sc,...],  

  [[レベル1の関係 ac,...],...],  

  [[レベル2の関係 tc,...],...],  

  [[主道具と目的道具の配置順序の差 di,...],...],  

  [[目的道具の種類 ot,...],...],  

  [[目的道具の長さ op,...],...],  

  [[目的道具の柄杓'ト'に対する角度 oa,...],...],  

  [[目的道具の色 oc,...],...]).
```

#### 3.3.2 モード宣言における特徴

述語n\_placementの14個の引数の内、第4引数以降の11個の引数が配置行為の規則を形成する要素となる。progolでは、人間が意図的に、各引数に関して入力(+・出力(-)・定数(#)のモード設定をすることになる。しかし、本論では、第4引数以降の11個の引数間の相関関係自体を調べようとする立場なので、特定の引数を意図的に選んでモード設定しない。その代わりに11個の引数の中から任意のn個(n=0~10)を選んで出力(-)変数化を許す)に設定して、残りの11-n個の引数を定数(#)変数化しない)に設定する。従って、 $\sum_{i=0}^{10} {}_{11}C_i = 2047$ 通りの仮説本体部のモード宣言がされる。

ここで、11個の要素のうち、最弱仮説の生成において最大いくつの要素の変数化を認めるかを表す「自由度(f)」という指標を設定した。11個全ての引数が定数のままの場合はf=0であり、10個が変数化された場合はf=10である。自由度1の場合のモード宣言を図3に示す。

```
%modeh 宣言  

:-modeh(1,one_act(+an))?  

%modeb 宣言  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,-oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,-oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,-op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,-ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,-di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,#ac,-tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,#sc,-ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,#sa,-sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,#sp,-sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,#st,-sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?  

:-modeb(*,n_placement(#n,+an,#be,-st,#sp,#sa,#sc,#ac,#tc,#di,#ot,#op,#oa,#oc))?
```

図3 自由度1の場合のモード宣言



1 作品につき自由度毎に 10 回の progol 処理を行い規則を抽出した。f の値が小さければ、道具の属性、幾何学的関係を詳細まで表す規則が生成される。逆に f の値が大きければ、抽象度の高い規則が生成される。

### 3.3.3 背景知識

3.3.1 で示した仮説の書式に従って、幾何学的関係抽出システムから出力された記述を、prolog のリスト処理を応用したプログラムを用いて、連続配置行為を表現可能な述語 n\_placement/14 に変換し、これを背景知識として progol に入力する。図 2 に示した幾何学的関係認識システムからの出力例は、図 4 のように変換される。

```
n_placement(1,1,[1],[ww],[36],[0],[blu],[[no_rei],[[no_var],[[no_dif],[[no_obj],[[no_ole],[[no_oan],[[no_oco]]]]]]?
n_placement(1,2,[1],[ww],[36],[0],[blu],[[det_para],[[semi_right],[[1],[[ww],[[36],[[0],[[blu]]]]]]]]?
n_placement(1,3,[2],[dw],[36],[90],[pin],[[con_exp],[[s1_1],[[2,1],[[ww,ww],[[36,36],[[0,0],[[blu,blu]]]]]]]]?
n_placement(1,4,[2],[dw],[36],[90],[pin],[[con_exp,det_para],[[s0_1,semi_right],[[2,1],[[ww,dw],[[36,36],[[0,90],[[blu,pin]]]]]]]]?

```

図 4 述語 n\_placement/14 への変換結果

## 4. システムにより抽出された規則の考察

自由度毎に progol によって抽出された配置行為の規則の中から、規則が全体として可能な限り具体性を有しており、かつ規則全体での被覆数がもっとも多かった自由度を選択して、そのときの規則を考察した。抽象度の高い規則は、それによって被覆される配置行為が多いため一般性が高いという点では有効であるが、具体的な幾何学的関係を殆ど特定できない場合が多い。逆に、具体的な規則は、被覆される配置行為が少なくなり、一般性に欠ける。しかし、例えば被覆数が 2 という一般性の低い規則でも、複数の異なった規則が寄り集まることにより、新たな規則性を表現している可能性が高い。そのため本論文では、一つの作品の制作過程における配置行為を 2 つ以上説明できる仮説であれば全て「配置行為の規則」として扱うことにする。

ここでは人間が直感的な観察から得た作品の制作過程の特徴と、本システムにより得られた配置行為の規則との比較を通じて、得られた規則の検証をする。

壁を中心とした配置行為が比較的多く見られた作品の一例を図 5 に示す。この作品の制作過程の直感的観察より得られた特徴の内、述語 n\_placement/14 で表現可能な特徴は(1)正面向き of ドア窓壁の多用(2)薄い色使い(3)水平垂直軸性(4)使用する道具属性の限定 が挙げられる。

本システムにより抽出された規則のうち、被覆数が比較的多く、かつ、極力具体性を保っている規則を各連続配置行為数毎に図 6 に示す。例えば、連続配置行為数 1

の時の規則は、特徴(1)から特徴(4)の全てに言及しており、特徴(1)から特徴(4)および、幾何学的関係"s0\_1"、時間的制約"2 行為前(に配置されたの道具と関係づける)"の間に相関関係があることも示している。他の被験者の配置行為の規則と考察は紙面の都合上、次報に譲る。

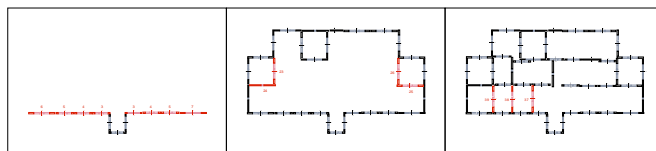


図 5 作品例 分裂病破瓜型 男性 の作品

```
<連続配置行為数 1 自由度 1 の場合>
one_act(A):-n(1, A, [1], [od], [36], [0], [min], [[con_exp], [[s0_1], [[2]], [[od], [[36], [[0], [[min]]]]]]].

<連続配置行為数 2 自由度 7 の場合>
one_act(A):-n(2, A, [1, 1], [od, od], B, C, D, [[con_exp], [con_exp], [[s0_1], [s0_1]], E, [[od], [od]], F, G, H).

<連続配置行為数 3 自由度 8 の場合>
one_act(A):-n(3, A, [1, 1, 1], B, C, D, E, [[con_exp], [con_exp], [con_exp], [[s0_1], [s0_1], [s0_1]], F, [[od], [od], [od]], G, H, I).

```

図 6 連続配置行為数毎の規則一例

## 5. おわりに

帰納論理プログラミングを応用して、KK 法による作品制作過程における配置規則を客観的に抽出することができた。また、人間の直感的観察から得られる特徴を、部分的に抽出することに成功し、さらに直感的な観察からでは発見困難であった特徴同士の関係も progol により抽出された配置規則から読みとることができた。

今後の課題は、幾何学的関係認識システムが扱える道具種類および幾何学的関係を充実させ、より事実 に 忠 実 な データ を 得 ら れ る よう に す る こ と が 挙 げ ら れ る 。 ま た 、 配 置 行 為 の 規 則 抽 出 と い う 問 題 を progol に 適 用 さ せ る た め に 、 今 回 は 「 仮 説 本 体 部 の 記 述 長 を 1 に す る 」 こ と が 鍵 と な っ た が 、 よ り よ い 配 置 行 為 の 一 階 述 語 論 理 で の 記 述 方 法 を 模 索 す る こ と も 必 要 で あ る 。

### 脚注

注1)一般化とは、個々の事例の詳細を無視することによって、例の間の共通性を獲得することである。注2)[a,...]はリスト構造を表す。aをリストの項という。項自体がリスト構造であってもよい。注3)relation/4は述語relationが4個の引数を持つことを示す。

### 参考文献

- 岡崎甚幸 他 居住空間構成法と分裂病者 日本建築学会計画系論文報告集 第 436 号 1992
- Muggleton, S Inverse Entailment and Progol, New Generation Computing, 13, 1995
- 古川康一 帰納論理プログラミング チュートリアル 人工知能学会誌 vol.12 No5,1997
- 溝口文雄 制約充足問題への帰納学習の適用と評価 人工知能学会全国大会 1996
- 古川康一, 嶋津恵子 PROGOLによるデータベースからの知識発見 人工知能学会全国大会 1996
- Ross D. KING Relating Chemical Activity to Structure: An Examination of ILP Successes New Generation Computing 13 1995

\* 1 京都大学大学院博士後期課程

\* 2 株式会社デザイン 工修

\* 3 京都大学大学院生活空間学専攻 教授 工博

\* 4 京都大学大学院博士後期課程

Dept. of Archi. and Environmental Design, Graduate School of Eng., Kyoto Univ.

Space Design Co. Ltd, M.Eng.

Prof. Dept. of Archi. and Environmental Design, Graduate School of Eng., Dr Eng.

Dept. of Archi. and Environmental Design, Graduate School of Eng., Kyoto Univ.