建築設計プロセスにおける幾何的知識の表現に関する研究

REPRESENTING GEOMETRIC KNOWLEDGE
IN ARCHITECTURAL DESIGN PROCESS

渡辺 俊*

Shun WATANABE

Geometric knowledge is essential to architectural design. Every geometric object used in current CAD/CG systems is primary defined by vertices. But most of geometric objects in architectural design are produced by previously defined objects and geometric procedures. To follow the designer's decision making process, what we have to store in intelligent CAAD systems are the designer's decisions expressed as procedures which imply the geometric facts, restrictions, and contexts.

GDL(Geometric Decision Library) is designed to express architectural designer's geometric decisions making process naturally, and implemented on Smalltalk environment. GDL constitutes geometric decision tree(network) for architectural design, and reconsideration of geometric decision for an architectural design extracts each restrictions, and can maintain total geometry in every state of architectural design process.

Keywords : computing geometry, artificial intelligence, knowledge representation, CAD
計算幾何学, 人工知能, 知識表現, CAD

1. はじめに

設計プロセスとは決定プロセスであるとも言われるように、知的設計支援システム^{文5,7)}の実現においては、設計プロセスにおけるデザイン上の様々な決定を、いかに人間の思考・記憶方法により近いカタチで表現し蓄えることができるかが重要となる^{注1)}。今日、これらを実現する具体的な枠組みとして、情報処理の分野で主流となりつつあるオブジェクト指向分析 (Object-Oriented Analysis) の方法論^{注2)}に基づき設計要素をオブジェクトと捕らえ、これら要素間の関係により設計対象の人工物を表現する研究が盛んに行われるようになった^{注3)}。これらの研究では、単に設計要素の形態情報を表現するに留まらず、そのオブジェクトが内包する幾何的屬性以外の情報をも取り扱うことに主眼が置かれているが、一方そこで利用される幾何的表現自体は、既存のCAD・CGシステムに見られる方法論を踏襲するものがほとんどである。即ちこれら知識表現に基づくモデルにおいても、デザインに登場する全ての幾何的決定は、個別の幾何オブジェクトの存在を具体的な座標値として、静的に還元されているのである。

例えば、M.Grossが提案したシステムでは、まず建築要素を示唆する線分や長方形といった幾何図形を入力し、それらの図形間の制約を"関係メニュー"から選択・適応するというアプローチを採用した^{文6)}。また高本らは、設計者の思考過程において観察される建築要素間の関係を大きく部材構成・隣接関係・位置関係という3つの設計ルールとして整理し、同様のアプローチで商用CADシ

ステムを拡張し実装した^{文10)}。これらの研究はいずれも、制約プログラミングの考え方に基づき、建築要素間の幾何的制約を図形間の制約として、既存のCADの延長線上に付加的に表現したものであった。

これに対し筆者らは、知的建築設計支援システムを実現するための建築モデルの基本的枠組みとしてAKM (Architectural Knowledge-representation Model)を提案し、システムのプロトタイプを作成してきた^{文11,12)}。AKMでは、特定の座標値に固定された建築要素の形態表現が設計プロセスのダイナミズムを制約するとの認識から、既存のCAD・CGシステムに見られるような形態表現モデルを建築オブジェクトの属性情報として恒久的に保持させることをあえて切り捨ててきた。つまりAKMは、建築デザインにおける階・部屋・柱・梁などといった具体的な構成要素間の制約に関する認知科学的視点から見た表現を、主に考慮したものであった。他方、建築設計における幾何的制約あるいは秩序を表現するものは、水平方向については柱の位置を特定するための通り心オブジェクトのみであり、垂直方向については階オブジェクトがその幾何的秩序の代用となっていた。

建築設計は、他の工学における設計分野と比較して形態志向が強く、設計仕様から導かれる設計要素の構成においても、機能的秩序もさることながら幾何的秩序を優先する傾向が強い分野である。しかし、通り心による順序付けのみを拠り所とするモデルだけでは、表現可能な建築形態に対する制約が大きいことは想像に易い。形態

* 筑波大学社会工学系 講師・工博

Assistant Professor, Institute of Policy and Planning Science, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

表現における自由度をより高めるためには、幾何学それ自体を知識として表現できかつデザイン思考とも親和性の高いモデルが、先のような建築モデルと供に必要である。

一方、コンピュータを単に狭義の数値計算の道具として利用するのではなく、より広義の数学的計算を行わせるための数式処理の研究が、人工知能研究の一分野として古くから行われてきた。これらの成果として提供される数式処理システムを利用することにより、幾何的要素を具体的座標値に還元する前の関数の段階で処理することが可能となる^{文4)}。しかし、関数のレベルで処理が行われること自体は、それぞれの式が個別の幾何的意味や CAD・CG における形態の表現と直接結びつくものでもなければ、個別の幾何オブジェクトを明示したり示唆するものでもない。今日、まだ幾何図形を幾何本来の方法論に基づき表現可能なシステムは存在しない。

2. 研究目的

本研究の目的は、建築設計プロセスにおける幾何的制約あるいは秩序に関する決定が、知識工学により指摘される人間の思考・記憶方法に従ったかたちで表現可能なモデルを提案することである。これに基づき構築されるジオメトリックライブラリは、今日の CAD・CG システムが拠り所とするグラフィックライブラリと呼ばれるものが表示メディアへの出力を主として考慮した構造体・関数群であるのとは対照である。

3. 設計における幾何学

建築デザイン^{註4)}が持つ幾何的特性を分析する研究は、建築史学や建築計画理論などでも様々なアプローチがなされてきたが、まさにそこで指摘されることは、形態記述に観察される建築要素の構成が平行・交差・対称といった幾何的事実・秩序を拠り所とした述語により説明されていることである。同様に、建築設計プロセスにおける形態試行は幾何的操作の積み重ねであり、単なる建築要素の一元的羅列による表現ではなく、建築形態を構成する文法に着目したデザイン操作の研究 (Shape Grammar) も行われるようになった^{文9)}。

一方、今日の CAD・CG システムにおいて利用されている幾何オブジェクトは、頂点 (vertices) を基準に考えられてきた。つまり、まず静的な構造体としての $P(x, y)$ あるいは $P(x, y, z)$ により定義される 2 次元および 3 次元上の点の存在を仮定し、これをして他の全ての幾何オブジェクトの根元としてきたのである。例えば、直線を示すオブジェクトは始点と終点という二つの頂点により定義され、平面を示すオブジェクトは、三つ以上の頂点の集合により定義されるのである。これらを正確に表現するならば、数学的意味での直線 (Line) や平面 (Plane) は存在せず、線分 (Segment) や面分 (Domain) が存在するのみであると言える。

一般にデザインにおける幾何的意味での決定とは、ある面とある面が平行であるという事実であり、個々の面を具体的に構成する頂点列ではない。あるいは、あるデザイン上で参照する点が補助線と補助線の交点として生成されるという事実であり、その点が結果的に持つであろう具体的な 3 次元座標値ではない。デザインを構成する大半の幾何オブジェクトは、他の幾何オブジェクトを拠り所に手続き的に生成されたものであり、ここで保存すべき設計者の決定

とは、それが生成されるべき背景としての手続き自体とするのが理想である。

これに対し、幾つかの CAD システムでは、既存の枠組みの中で、幾何的決定を入力したコマンドの時系列的スタックとして付加的に保存する方法が古くから試行されてきた^{註5)}。この方法は一見、設計者の決定プロセスを保存しているように思われる。しかし、この方法だけでは、単に以前のデザインの状態に戻ることができるだけで、決定の変更が幾何的要素間の制約により関連する他要素に伝播するという設計行為本来に見られる幾何的処理が実現できない。例えば、設計プロセスにおいて二つの平面の交差部分として意図された直線は、いずれの平面の移動においても応分の影響をうけるのが自然である。同様に二つの直線の交点は、直線の移動により適宜その位置が変更されるであろう。

建築設計プロセスの中でデザインのコンテキストに必要な幾何オブジェクトを定義した手続きの構造そのものが、建築設計における幾何的意味での決定と呼べるものである。しかし、今日コンピュータにより幾何学を扱う方法論では、これらの決定の構造自体は保存すべき対象とされず、手続きにより変換された結果としての具体的数値のみを蓄積するというモデルを追いかけてきた。これは、多くのコンピュータ言語自体が、手続とデータを明示的に分離するパラダイムを採用してきたことにも起因すると考えられる。

一方 LISP に代表される人工知能向言語と呼ばれる環境では、手続き (プログラム) そのものをデータとして扱うことが可能である。すなわちこれらの言語は、手続き自体を変数に割り当てたり、その任意の時点での具体的値を動的に得られる仕組みを有している。設計における幾何学のために必要なモデルとは、グラフィックを表現するための効率的モデルもさることながら、このようなパラダイムに基づき幾何的決定を手続きの集合体として表現し保存できるモデルである。

以上の考察に基づき、GDL (Geometric Decision Library) を提案する。なお、以下に示すプログラムを示唆する記述文は全て Smalltalk 言語^{註6)}上に実装された具体的ライブラリにおいて、そのまま実行可能なコードに基づくものである。

4. 空間幾何オブジェクトの表現

全ての空間幾何オブジェクトを座標値の集合に還元して表現・保存する方法論は、どの様に複雑な操作対象でも基本的に 3 次元座標値 (x, y, z) のみであるという単純な構造を保証している。これは、境界のはっきりした人工物の形状のみを表現する、あるいはその延長線上で幾何的操作 (4×4 の行列変換) を加えるには有効なアプローチである。しかし、特に建築設計プロセスで必要とされる”空間的秩序を示す制約としての幾何”を表現するには、この座標値還元モデルだけでは困難である。なぜなら、ここで表現したいのは、建築的実体としての面や線ではないからである。つまり、秩序とは個別の要素の具体的な形態を表すのではない一方、代用される計算幾何図形のデータ構造はデザインに意図された本来の意味から解離しているからである。

GDL においては、まず様々な建築設計プロセスにおいて設計対象の幾何的制約を記述するために最低限必要とされる空間幾何オブ

ジェクトを、座標値の集合と限定せず、それ本来の幾何的・数学的特性により記述することを試みる。数学において空間を表現する基本要素としてはベクトル V による表現が有効であり、人工物の形態における幾何的制約の表現に最低限必要な直線・平面といった基本図形が、それぞれベクトル空間における関数として表現できることは広く認められるところである。ただし、これは空間のモデルとしてベクトル空間を採用するということであり、幾何オブジェクトの表現が全て位置ベクトル(座標値)の集合に還元されることは異なる。

ここで3次元ベクトル V を $x @ y @ z$ として表現すると、二つの位置ベクトルにより示される点を通過する直線は、以下の式、

$$\text{Line at: } 1 @ 0 @ -1 \text{ and: } 0 @ 1 @ 1 \quad (1)$$

を評価する^{注7)} ことにより、

$$(x - 1) / -1 = (y) / 1 = (z + 1) / 2 \quad (2)$$

なる直線オブジェクト(インスタンス)がその戻り値として生成される。ここで大文字で始まるシンボル(Line)はオブジェクト指向におけるクラスを、コロンを含むシンボル(at:and:)はメッセージをSmalltalkの慣例に従い表現するものとし、(2)に示されるようなインスタンスの関数表記はそれが内包する手続き(printOn:)によりその表示が決定されるものとする。また、通過点の位置ベクトルと方向ベクトルにより、

$$\text{Line at: } 2 @ 4 @ 6 \text{ direction: } -3 @ 7 @ 0 \quad (3)$$

を評価すれば、

$$z = 6, (x - 2) / -3 = (y - 4) / 7 \quad (4)$$

が得られる。ここで、直線オブジェクトがその所在を特定するために保持すべき必要十分な情報とは、いずれの場合においても通過点の位置ベクトルおよび内部的に変換された方向ベクトルの二つのみであり、前者(1)の場合には、

$$\text{Line at: point1 direction: point2 - point1} \quad (5)$$

へと単に変換するだけでよいことは自明である。以上はベクトルを扱い所に直線オブジェクトを生成する手続きの最も初歩的事例であり、直線を特定する方法は他にも様々な幾何オブジェクトを扱い所に生成する方法が多数考えられる。しかし、いずれの場合においても直線オブジェクトが一意的空間図形として特定されるために必要十分な情報は上記の二つのベクトルである。

一方、平面は、通過点の位置ベクトルと法線ベクトルを指示した、

$$\text{Plane at: } 3 @ 6 @ 4 \text{ normal: } 2 @ -4 @ 3 \quad (6)$$

を評価して、

$$2x - 4y + 3z + 6 = 0 \quad (7)$$

なる平面オブジェクト(インスタンス)がその戻り値として生成される。平面を特定する方法は他にも、最もCAD・CGで一般に用いられるような通過する3点の位置ベクトルによる指示方法を用いれば、

$$\text{Plane at: } 1 @ 0 @ 0 \text{ and: } 0 @ 1 @ 0 \text{ and: } 0 @ 0 @ 1 \quad (8)$$

なる記述文より、

$$x + y + z - 1 = 0 \quad (9)$$

が得られる。しかしGDLでは、一般のCAD・CGシステムが3点の座標値を直接・間接的に保持するのとは対照に、平面オブジェクト(9)は既に(8)における3点を保持しておらず、インスタンス生成の過程で平面を特定するために必要十分な法線ベクトルと定数へと翻訳される。これは、平面を通過点の集合により表現する既存のモデルと比較して情報量が少なく、平面の延長性を的確に表現していると言える。また、次の章で述べるような関数レベルでの様々な幾何的操作を施す場合にも取り扱い安い。逆に、3点として指示される領域を明示する必要があるのであれば、面(Face)として表現すればよい。

一般に球面や回転体を3次元モデル(サーフェスモデル)で取り扱う場合、分割数を指定することで構成面に分解し、多面体に近似する方法が一般的に用いられている。これは形態のグラフィック表示には効率的な表現であるが、幾何本来の意味は消失していると言わざるをえない。一方、同じ3次元モデルでもプリミティブによる表現は幾何的ではある。しかし、これは形態の境界特性がグラフィックモデルとして採用できることによるもので、幾何の意味を表現することを意図したものではない。GDLでは、球面は位置ベクトルと半径により、

$$\text{Sphere center: } 1 @ -1 @ 0 \text{ radius: } 1 \quad (10)$$

を評価することにより、

$$(x - 1)^2 + (y + 1)^2 + z^2 = 1^2 \quad (11)$$

として示される球面オブジェクト(インスタンス)として生成されるが、その内部構造は単純に(10)による指示をそのまま保存したオブジェクトである。

一方、頂点(vertices)を基準に定義される空間幾何オブジェクトも必要である。例えば線分(Segment)は、

$$\text{Segment from: } 0 @ 0 @ 0 \text{ to: } 1 @ 1 @ 1 \quad (12)$$

を評価することにより、円弧(Arc)は

$$\text{Arc from: } 1 @ 0 @ 0 \text{ to: } 0 @ 1 @ 1 \text{ center: } 0 @ 0 @ 0 \quad (13)$$

を評価することにより、それぞれのインスタンスを得ることになる。これらのオブジェクトは、基本的にグラフィックライブラリに用いられるものと等価である。

5. 空間幾何オブジェクトの操作

建築デザインを構成する空間幾何オブジェクトは、様々な幾何的操作の結果として作り出される。その具体的手続きは、今日のCAD・CGシステムにおいては一般にコマンド群として用意されているが、そのロジックは既存システムにおける幾何オブジェクトの内的表現を反映し、「幾何的操作の結果として新たな空間幾何オブジェクトを得る」というより、「個別の座標値を計算して幾何的操作と同値とする」という方法論が主流である。一方、設計思考に

において一般に幾何的知識をどのように利用しているかを考えた場合、幾何オブジェクトは全て幾何オブジェクトレベルで抽象的に処理されるものであり、具体的な座標値に還元して計算されている訳ではない。ここで、幾何学の方程式を解くのと同様の、素直な形での空間幾何オブジェクトの操作の表現を試みる。

建築設計プロセスにおいて、ある平面に平行で適当な距離だけ離れた平面を想定することは頻繁に行われる行為であるが、GDLにおける平面オブジェクトの操作では、例えばそれぞれを plane1・plane2 とすると、

```
| plane1 plane2 |
plane1 := Plane at: 3 @ 6 @ 4 normal: 2 @ -4 @ 3.   (14)
plane2 := plane1 translatedBy: 10.
```

を評価することにより plane2 は、

$$2x - 4y + 3z - 47.8516 = 0 \quad (15)$$

としてインスタンス生成される。ここで重要なのは、先に述べたように、生成される plane1 が数学的関数を拠り所とした内部表現である点である。つまり、plane1 は生成の過程で参照した位置ベクトル (3 @ 6 @ 4) を保持していないため、plane2 が既存のグラフィックライブラリにおけるような、plane1 における特定の頂点の平行移動により求められるものではないことである。また、建築における柱の軌道は一般に二つの通り心 (平面) の交線として意図されるものであるが、二つの平面の交差部分としての直線を求めようとする場合、それぞれを plane1・plane2・line1 とすると、

```
| plane1 plane2 line1 |
plane1 := Plane at: 0 @ 1 @ 0 normal: 1 @ 1 @ 1.
plane2 := Plane at: 1 @ 0 @ 0 normal: 2 @ -1 @ 1.   (16)
line1 := plane1 intersectionWith: plane2.
```

を評価することにより line1 は、

$$(x) / 2 = (y + (1/2)) / 1 = (z - (3/2)) / -3 \quad (17)$$

としてインスタンス生成される。その内的処理手続きは、二つの平面関数による連立方程式を解くことであり、具体的には平面の法線ベクトルの外積により条件分割して求められることは代数幾何学の初歩である。さらに例えば、直線と空間の一点を通る平面を求めようとする場合、それぞれを line1・point1・plane1 とすれば、

```
| point1 line1 plane1 |
point1 := 0 @ -1 @ 1.
line1 := Line at: 0 @ 0 @ 0 direction: 1 @ 1 @ 1.   (18)
plane1 := line1 interconnectionWith: point1.
```

を評価することにより plane1 は、

$$2x - y - z = 0 \quad (19)$$

としてインスタンス生成されるが、これもその内部手続きは同等の幾何問題を代数的に解く手続きと等価である。

このように、GDL が行う具体的手続きは全て幾何オブジェクトレベルで数式的に処理されるものであり、頂点の座標値に還元して

計算されるものではない。単に、初等代数幾何における知識をそのまま素直に記述したにすぎない。

6. 幾何的決定のモデル化

設計のダイナミズムを考える場合、空間幾何オブジェクトが数式レベルで表現されたり操作されているだけでは不十分である。なぜなら先に示した Line や Plane などの演繹的に生成された幾何オブジェクトそれ自体はベクトル空間内において静的構造を持つ幾何的決定の結果であり、設計における幾何的決定を直接表現するものではないからである。設計における幾何的決定とは、これら幾何オブジェクトを生成する手続きそのものであり、GDL ではこれを幾何的決定オブジェクト (aGeometricDecision) として導入する。つまり、建築設計における幾何的決定プロセスは、幾何的決定オブジェクトの決定木 (ネットワーク) として表現されることになる。

幾何的決定オブジェクトは、それ自体が幾何的図形を直接示すのではなく、それを導出する手続きを変数として保持するオブジェクトであり、親 (parents)、コンテキスト (context)、子 (dependents)、および現在幾何 (currentGeometric) という属性により表現可能である。親は文字どおり、その幾何的決定オブジェクトを生成する際に参照した、基となる幾何的決定オブジェクトを保存する変数である。コンテキストはその生成手続きそのものをデータとして保存する変数であり、具体的に Smalltalk 言語ではブロック^{※8)}と呼ばれる構造で表現される。手続きを大括弧 [] で囲むことで指示されるブロックは、手続きの構造自体をデータとして保持する特殊なオブジェクトとしてインスタンス生成されるが、その手続き自体は生成時点では評価されない。例えば、[x + y] として記述されるブロックは、x と y を足すという手続き自体をデータとして保持したオブジェクトであり、その具体的値は、それが評価される時点での x と y の値に依存する。子は、その幾何的決定オブジェクトを親として指示している幾何的決定オブジェクトを保持する変数である。現在幾何は文字どおり、コンテキストを評価した結果としてインスタンス生成される最新の空間幾何オブジェクトを参照する変数である。

GDL においては、人工知能向言語が手続きをデータとして取り扱えるという特徴を利用し、幾何的決定オブジェクトの生成手続きを settled メッセージとして実装した。settled メッセージは、空間幾何オブジェクトに送信することにより、その空間幾何オブジェクトを生成する最も単純な手続きをコンテキストに保持した幾何的決定オブジェクトへと昇格させる。また、幾何的決定を操作するプロトコルは、空間幾何オブジェクトを操作するプロトコルと同じである。例えば、先の二つの平面を設定し、これらの交差部分としての直線を定義するプロセス (16) は、以下のように記述できる。

```
| decision1 decision2 decision3 |
decision1 := (Plane at: 0 @ 1 @ 0
              normal: 1 @ 1 @ 1) settled.
decision2 := (Plane at: 1 @ 0 @ 0
              normal: 2 @ -1 @ 1) settled.   (20)
decision3 := decision1 intersectionWith: decision2.
```

ここで decision1 はベクトル空間の基準点 (0 @ 0 @ 0) を親として参照し、[Plane at: 0 @ 1 @ 0 normal: 1 @ 1 @ 1] というブロックをコンテキストとして持つ幾何的決定オブジェクトとして、decision2 は [Plane at: 1 @ 0 @ 0 normal: 2 @ -1 @ 1] というブロックをコンテキストとして持つ幾何的決定オブジェクトとして生成されることになる。また、(16) では intersectionWith: により、line1 に具体的な直線のインスタンス (17) が直接生成されたが、decision3 では、親は decision1 と decision2 であり、コンテキストは [decision1 intersectionWith: decision2] というブロックそれ自体となる。そして、生成直後の現在幾何は、

$$(x) / 2 = (y + (1/2)) / 1 = (z - (3/2)) / -3 \quad (21)$$

と、(17) と同値となる。

一方、これらは生成手続きによる幾何的決定として定義しているため、親となるオブジェクトにおける何らかの変化は、即座に自身の変化の引き金となる。つまり (20) での直線 (decision3) は、あくまで平面 (decision1) と平面 (decision2) の交差部分として定義されているために、平面 (decision1) が移動すれば、その結果としての直線 (decision3) は応分の影響を受けることになる。例えば、

$$\text{decision1 moveBy: } (4 @ 1 @ 3) \text{ settled} \quad (22)$$

という平行移動^{註9)}により、decision3 の現在幾何は、

$$(x) / 2 = (y - (7/2)) / 1 = (z - (11/2)) / -3 \quad (23)$$

へと変化することになる。この変更は平面の移動に伴い瞬時に起こるべきであり、実際にはこの制約伝播に依存性メカニズム^{文2)}の考え方を応用する。依存性メカニズムでは、自身が何らかの幾何的変更を受けた場合に、変更が行われた旨を changed: メッセージとして自身に送信する。それぞれの幾何的決定オブジェクトは依存関係にあり挙動を調整しなければならない幾何的決定オブジェクトの集合を子として保持しているため、changed: メッセージでは、それらに update: メッセージを一斉送信する役割を果たす。update: メッセージを受け取った幾何的決定オブジェクトは、改めてコンテキストを評価することにより、自身の幾何的表現の一貫性を保証する。

また、平面 (decision1) と平面 (decision2) の交線として求めた decision3 自身をさらに移動した場合には、

$$\text{decision3 moveBy: } (3 @ 4 @ 5) \text{ settled} \quad (24)$$

と記述されるが、これが実行された decision3 のコンテキストは [[decision1 intersectionWith: decision2] moveBy: 3 @ 4 @ 5] という入れ子構造のブロックを値として取ることになる。これにより、幾何的決定オブジェクトの現在幾何を更新する場合には、単にコンテキストを評価するというシンプルな構造で実現することが可能となる。

7. 考察

本論文で示した GDL が想定する空間幾何オブジェクトの表現は、数学的定義を素直にオブジェクト構造に投影した結果である。一方、このような空間幾何オブジェクトの表現には限界があることも事実である。一般に、関数的記述で簡便に表現できる空間幾何図

形には限りがあり、建築形態の自由度という観点からの限界が指摘されるかもしれない。しかし、自由な形態表現こそは既存のグラフィックライブラリが対応する領分であり、GDL が扱うべきは具体的な建築形態の記述ではなく、設計プロセスにおける形態の秩序としての幾何であると考えらる。

GDL を具体的 CAD システムに適応する場合、例えば上記の枠組みの中で AKM における階 (aFloor) を定義する手続きは、

```
| decision1 decision2 floor1 floor2 |
decision1 := Plane xyPlane settled.
decision2 := decision1 translatedBy: (0 @ 0 @ 3600) settled.
floor1 := Floor supportedBy: decision1.
floor2 := Floor supportedBy: decision2. (25)
```

図 1

のように記述できる。ここで、それぞれの階を支えるオブジェクトは、幾何的決定オブジェクトのインスタンスであり、決定相互の間には translatedBy: という制約が存在することになる。あるいは二つの通り心 (decision1, decision2) の交線 (decision3) を軌道とする柱 (aColumn) を定義する手続きは、

```
| decision1 decision2 decision3 column1 |
decision1 := (Plane xzPlaneAt: 1200) settled.
decision2 := (Plane yzPlaneAt: 2300) settled.
decision3 := decision1 intersectionWith: decision2.
column1 := Column1 supportedBy: decision3. (26)
```

と記述されよう。

図 2

一方、入れ子構造のコンテキストはオブジェクト単位での決定の履歴が簡単に記述できるが、設計プロセスの進行の中で発見される等価でより単純な変換に還元するには、ヒューリスティックな知識を導入する必要もあり、今後の課題である。

なお、GDLの実装はVisualWorks環境上に構築されているため、Smalltalkの仮想計算機が提供されている様々な計算機環境下で実行可能であり、そのソースコードはインターネット上に公開している(<http://gaudi.sk.tsukuba.ac.jp/>)。また、本ライブラリを用いて実際に構築したCAADシステムの詳細については、次稿に譲る。

本研究は94年度および95年度の文部省科学研究費助成を受けて行なわれた。また、その一部は1994年度九州支部研究報告会(日本建築学会)^{文13)}およびCAAD Futures '95(国際会議)^{文14)}にて発表されたものであり、本論文はその後の研究を踏まえて加筆修正したものである。

注

- 1) 本論文で意図するところの「設計プロセス」とは、ある目的を達成するためにオペレータ(設計要素)を制御し・選択し・順序づけるといった、決定に関する「時間的」様相である。^{文1,7)}
- 2) オブジェクト指向とは、データのなかにその手続き(プログラム)をパッケージ化したものをオブジェクトとしてとらえ、オブジェクト同士がメッセージを交換しながら処理を進めるというデータ主導のパラダイムに立った考え方であり、それを具体的に表現する手段としてデータ抽象・インヘリタンス(クラス階層構造)・ポリモルフィズムなどが要求される。^{文3,8)}
- 3) 建築分野では、古くはスケッチパッド(長澤勲他)、DELTA(三菱地所)、LORAN-T(大成建設)などが上げられる。また、最近ではAIAによるIFC(Industry Foundation Classes)などの動きもある。
- 4) 本章で意図するところの「デザイン」とは、建築要素の意匠的・形態的構成あるいはその記述である。
- 5) 例えばAutoCADでは、UNDOコマンドにより、それまでに実行されたn回のコマンド操作を取り消し、n回前の状態に戻ることができる。
- 6) Smalltalkは、オブジェクト指向のコンピュータ言語である。クラスは大文字で始まるシンボルで表現され、記述文頭の「|...|」は一時変数の宣言である。変数にはオブジェクトが代入され、:= が代入記号である。オブジェクトに続

くシンボルがメッセージであり、メッセージが引数を持つ場合にはシンボルの最後に「:」が付加され、それに続くオブジェクトがメッセージの引数として扱われる。^{文2)}

- 7) 人工知能向言語において「評価する」とは、そこに示された手続きを具体的に実行し、具体的値(インスタンス)を得ることである。
- 8) ブロックは、Smalltalk言語の制御構造でよく使用されるオブジェクトであり、一連の処理を実行しない状態のままにしておきたい場合に用いる。^{文2)}
- 9) GDLでは、moveBy: は幾何的操作によりそのオブジェクト自身を更新する手続き、translatedBy: は幾何的操作により新しいオブジェクトを生成する手続きとして、区別している。

参考文献

- 1) Simon, H.: The Sciences of the Artificial, MIT Press, 1969
- 2) Goldberg, A. and Robson, D.: Smalltalk-80 The Language and its Implementation, Addison Wesley, 1985
- 3) Cox, B.J.: Object Oriented Programming: An Evolutionary Approach, Addison Wesley, 1986
- 4) Wolfram, S.: Mathematica - A System for Doing Mathematics by Computer, Addison Wesley, 1988
- 5) 吉川弘之、富山哲男: インテリジェントCAD(上), 浅倉書店, 1989
- 6) Gross, M.D.: Relational Modeling: A Basic for Computer-Assisted Design, The Electronic Design Studio - Architectural Knowledge and Media in the Computer Era, MIT Press, 1990
- 7) Coyne, R., Rosenman, M., Radford, R., Barachandran, M. and Gero, J.: Knowledge-Based Design System, Addison Wesley, 1990
- 8) Code, P. and Yourdon, E.: Object-Oriented Analysis, Yourdon Press, 1990
- 9) Mitchell, J.: The Logic of Architecture, MIT Press, 1990
- 10) 高本孝頼、両角光男: 建築要素に関する設計ルール(関係情報)を考慮したシステムの試作とその評価、日本建築学会計画系論文集 第441号、1992
- 11) 渡辺俊、渡辺仁史: 建築設計のための知識表現モデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集 第443号、1993
- 12) Carrara, G. and Kalay, Y.E., eds.: Knowledge-Based Computer-Aided Architectural Design, Elsevier, 1994
- 13) 渡辺俊、大澤義昭、渡辺仁史: 建築設計における幾何的知識の表現 - 知的建築CADのための空間記述言語の開発 -, 九州支部研究報告会、1995
- 14) Watanabe, S.: Representing Geometric Knowledge in Architectural Design, CAAD Futures '95, 1995

(1996年8月26日原稿受理、1997年2月5日採用決定)