

知的情報処理—情報問題の根本的解決に向けて

大須賀節雄

早稲田大学理工学部情報学科

情報技術は転換期を迎え、従来の技術をそのまま持続しあるいは延長することが困難な状況が発生している。本稿では従来とは全く異なる新しい汎用情報処理の枠組みが可能であること、それが今日発生している多くの問題にたいする解決の手段になり得ることを示す。これはモデルの概念を中心に据えた方式である。この諸様相を述べるのが目的であるが、指数の都合で中心概念のみを記す。

The More Intelligent Method of Information Processing - Toward the Solution of Problems in Information Technology

Setsuo Ohsuga

Waseda University, Department of Computer and Information Science

The problem solving process is divided into two parts - solution finding and product generation and the present computer technology covers only the second aspect. The objective of this paper is to develop computer systems that can cover both the above mentioned aspects of problem solving. If a formal method of representing various problems can be made and operations defined to get solutions as transformations of the problem represented in this formal method, then a general purpose problem solving system can be attained. We discuss in this paper the possibility of developing completely new information processing style based on the modeling concept which can solve many problems arising in information technology today.

1. はじめに

現行ソフトウェアの開発原理では、本来、前以て厳密に記述されたことのみが処理可能であるのに、この領域外でコンピュータへの期待が増大している。新しい物を創造的に作り上げてゆく問題はその代表的なものである。特にソフトウェア開発の問題は古くから重要性が指摘されながらその根本的な解決に至らないのは、これが創造型の問題であるにも拘わらずその支援ツールは、'プログラムを作るのは人間である'、とする従来型のソフトウェア開発原理に基づいているためという側面があるからではないだろうか。与えられた出発点から所要条件を満たすゴールに到達する道筋は多数あり、そのどれを選択するかは完全に管理することができぬままにプログラマ個人に任される部分が残される。

このような根本的な問題を解決する一つの可能性として、設計手法に基づく新しいアプローチを取り、それを支援するものとしての知的コンピュータを考える。このアプローチの基本的考え方は、プログラミングの主体を人間からコンピュータに移し、問題解決としてのプログラミングに際して、コンピュータの手に余る部分に人間の手を借りるようにすることである。問題の管理はコンピュータ側にあり、人間が介入するときの問題の定義は既にコンピュータ側でなされているので、プログラミング過程の多くが明示的になり、人間の行う不透明な部分が限定される。これには問題解決の方法を定式化してコンピュータに前以てあたえておくこと、特に大規模問題を小問題に分割する方法を定式化することが重要である。実はこれ自身が問題解決の特殊な形態として定式化の対象になることを以下に示す。

問題解決の一般的な定式化は容易ではないが、ここでは新しい視点の下でそれが可能であることを示す。ここではモデリングの概念を中心に置くことによって問題解決の枠組みが表されること、モデリングを支

援することのできる知的コンピュータにより、問題解決が自律的に行われること、あるいは逆に、そのような知的コンピュータの要求仕様が定まることを示す。またモデリングの考え方を普遍化し、問題の型を、その表現に必要なモデルの形式によって分類すること、その形式は有限であることを示す。

筆者は人間が行うことを前提とした従来の技法が行き詰まることを早期に予想して上記の考え方に立脚するシステムを開発してきた。この一部は既に筆者のグループで開発され、この考え方の実現可能性が示された。開発されたシステムはKAUS (Knowledge Acquisition and Utilization Systems) [YAM93]と名付けられた。しかし実装方法についてまで本論文に含めるにはあまりに紙数が足りない、以下では主として基本的な概念を論じ、問題解決への重要な見通しを得ることを目的とする。

2. 概念モデル

問題解決の基本的形式を概念モデルを中心的な概念として定義する。コンピュータによる情報処理の現実的な意味での実現可能範囲は与えられたモデリングの方法論によって各種概念がどこまで表現されるかに懸かっている。概念モデルはこの立場で研究されねばならない。

2.1 情報処理の新スキーム

新しい問題解決法を可能にするための知的コンピュータの構成を図1に示す。問題はまず表現され、次いで解に向けて変換される。結果はユーザの基準に従って評価される。変換は表現がゴールに達するまで繰り返される。知識はこの変換に用いられるが、最終評価はユーザ指定の基準でなされるから、知識によって導き出された結果がそのまま解になる訳ではなく、知識は問題解決に間接的に関与する。従って知識の作成者とシステムで知識の解釈が仮に異なっても、モデルをゴールの方向に変換する知識は結果的に有効に働くこともあり得る。これによってシステムは入力や知識のゆらぎに対して強靱なものになる。このような枠組みは大規模知識ベース構築には不可決の条件である。またこの方式によってユーザは逐次的にモデルを拡大することによってシステム内に大規模モデルを構築することができる。問題の表現は後に述べるように対象モデルの一表現である。

問題解決は図2の手順で進められる。

箱で表された各行為は演繹である。即ち関連知識ソースから適切な知識を選び、演繹を実行する。従ってこれら行為はすべて同様である。ただし知識は異なった知識ソースから選ばれる。これはこのプロセスを表現し、制御するメタ動作によって実現される。知識ベースは異なった知識塊に分けられ、メタレベルにおける管理機構によって管理される。この構成ではモデルが中心的役割を演じる。

2.2 多重構造モデルと問題の分類

概念モデルはモデルを作る主体とモデル化される対象の関係で定義されねばならない。主体は人間もしくはコンピュータであり、関心を持つ対象から何らかの結果を導きだそうという意図を持っている。ここでは主体がコンピュータである場合に関心を寄せる。それはコンピュータがモデルを構成することが自律的な問

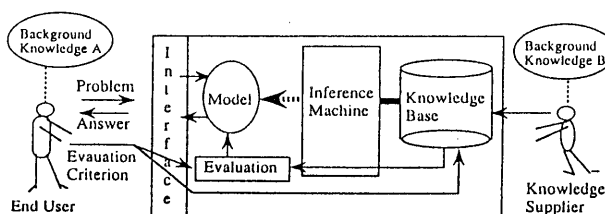


図1 知的コンピュータシステムの構成

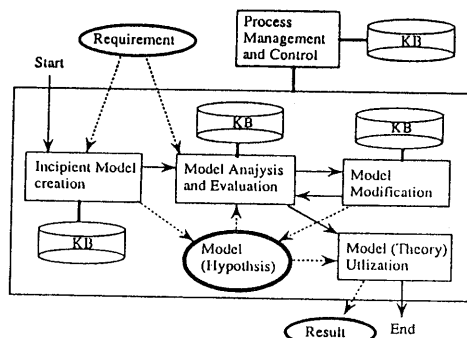


図2 問題解決の基本方法

題解決への第一歩だからである。一方、主体が関心を持つものすべてが対象になり得る。対象は実体であっても抽象的な何かであってもよい。それは問題解決過程であるかも知れない。対象は一般に多くの側面（性質）を持っている。そのうちの一部分、人間が関心を持つ側面のみが概念モデルに含まれる。主体-対象の関係は多様であり、それぞれ異なった概念モデルが作られる（図3）。

モデル構築と解の生成には様々な方法がある。主体が人間である場合、モデルは人間の精神的な活動の一環としてまず頭の中に作られる。人は目的が最終成果物を得ることにある場合、モデル構築法について必ずしも意識していない。しかし主体がコンピュータである場合、概念モデルの構築法を前以て定式化し、それをコンピュータに与えておく必要がある。その前に人間が如何にモデルを構築するかについて学び、明示的に表現しておかねばならない。この研究はそれ自身、主体と対象からなる問題である。主体は人間であり、対象はモデルを構築し、結果を生成する人間の知的活動である。この問題解決は与えられた対象から結果を得る単純な問題解決である内部プロセスと、この内部プロセスにおいて結果を得る方法を見いだすという問題解決を表す外部プロセスからなる2重プロセスとして表現される（図4参照）。

この2重プロセスは問題解決コンピュータ化の一過程である。

時にはさらに多重のモデル必要とする場合がある。例として先生と生徒の関係を考えよう。生徒は与えられた問題を解こうとする。この問題解決において主体は生徒である。生徒は先生の提示する条件に合うモデルを自分で作る様に努力する。先生は生徒に一連のサブゴールを与える。生徒は各サブゴールにその都度到達することを試みる。生徒が最も効率的に学習するようなサブゴールはいかなるものか？これは先生が解決すべき問題である。さらに、この先生-生徒の関係を第3の人が観察し、先生の知的活動を表現しようとする場合を仮定しよう。この人（主体）にとって対象は先生の知的活動である。このような試みは先生をコンピュータ化しようとする時必要なものとなる。この時の問題解決ではモデルとして3重の構造を必要とする。

このようにモデリングの方法は状況と、対象の構成要素によって変わる。もしあらゆるモデルの形式を分類することができるなら情報処理の機構が明らかになり、情報処理機構の一般的定式化が可能になる。これは情報処理に含まれるいくつかの不明な点を解明する。例えばソフトウェア設計の定式化が可能になることが期待される。従って概念モデルを議論することは情報処理のの基本を議論することである。これは従来のものとは別種の、汎用的な情報処理システムが実現可能であることを意味する。

上例からすべての問題解決に対して外側のプロセス、即ちその問題解決を対象とする主体-対象関係を想定することができるから、原則的には無限階層のモデルが必要になる。これは問題を型によって分類することを試みたとき、分類が無数の項を含むことを意味する。しかし実際にはそれは整理されて有限に納まる。上例において先生の思考活動を観察している第三者（これを A とする）をさらに外側から観察する人（B）を考えよう。4重のモデル構築が必要になるが、B に対応する最外側の構造はその内側の構造と同じである。図4においてO1、S1、M1を最内側の対象、主体、モデルとする。別の S2 は S1 の行動を学んでモデル M2 を作り、その一部としてある操作 Op1 を見いだして定式化し、明示することが

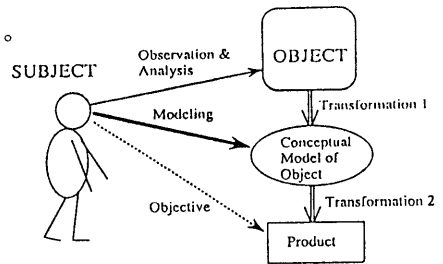


図3 概念モデル

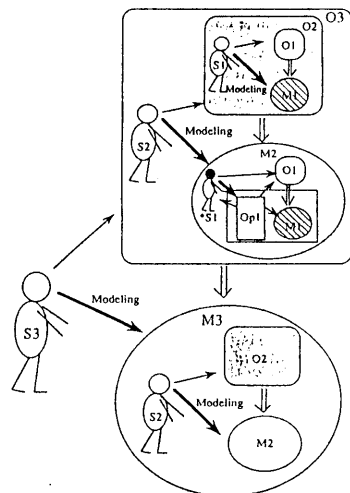


図4 多重モデルのレベル

できたとする。すると S2 は問題解決において何らかの価値ある仕事を達成し、モデルM2が問題解決のコンピュータモデルとして使われる。しかし S1 の行為は完全には分析されず、残りの部分にたいしては意思決定が人間によって行われる。問題解決はインタラクティブに行われる。

さらに S3 が S2 の行為の分析を試み、失敗したとしよう。するとモデル M3 は問題解決のプロセスを通して最初の表現から何等の変化もなく、問題解決の定式化という観点からは無意味になる。これ以後の多重化についても同様であり、これを省略することによって実際面では分類は有限に留まる。このことは概念モデルの適切な表現法を用いれば、図2に示した単一問題解決法がモデルの多重化表現を用いることにより、非常に広い範囲の問題をカバーすることを示す。モデリングは人間のすべての行為の核概念であると言ってもよい。従って、人間の行為の多様性に対応する様々なモデルを生成することのできる単一のモデル構築法があり、それを扱う形式的方法が見いだされれば、人間の思考法に近い、新しい型のコンピュータ処理法が実現されることになる。

図4でS2がO2に対して、初期モデル生成、モデル解析/評価、およびモデル構築/修正の諸行為で一般の問題解決法が形成されることを見いだしたものとしよう。この全体プロセスはS2、O2および通常の問題解決操作を含み、この全体はO1に対する基本問題解決法と類似である。新しい対象を表現するために多重モデルが作られている。

図2の様な問題解決プロセスを定義することは関連知識の構造を作ることである。モデル解析/評価用の述語とモデル修正/変更用の述語は分離されて別の知識塊を形成する。これらは必要に応じてさらに詳細な構造化がなされる。これらの構造に対して外付けで（この構造を対象として）これらの述語が活性化される条件等の記述がなされる。この構造は述語の構造であるから、それに対する記述はメタ記述である。このメタ記述も述語で表現される。図4のS2のモデルの制御部分に含まれる知識ベースはこれらメタ述語の集まりである。M2のメタ操作に含まれるこのプロセスは人間の問題解決の写しである。

このようにしてすべてのものは人間の思考対象になる。対象が人間の行為であるとき、多重モデルが作られる。このように作られた多重モデルのうちすべてあるいは一部分が定式化され明示されたものはコンピュータ内に実現される。一つの問題解決プロセスがすべて定式化され、必要な知識が準備されていればシステムすべてを行えるので自律システムが達成される。ある部分は定式化されるがそうでない部分があって人間に任せる外ない場合には人間-コンピュータ協調のインタラクティブシステムとなる。ソフトウェア自動化は問題解決（処理）の自動システムを作ることである。これはプログラマS1を含むO2の自動化モデルM2を実現することである。

2.3 モデル群

図2の基本問題解決法では、モデルは様々な視点から見られ、各視点に対応して特定の操作が行われる。モデルはこれら視点に対応する側面を持たねばならない。一つの問題解決のプロセスの中に多数の異なったモデル表現が含まれることを意味する[TOP94]。これらの側面はモデルに基づく問題解決が自律的に行われるよう明示的に表されていないなければならない。各操作は固有のモデル（対応する側面の表現）を要求するから、これは特定のモデルを自律的に生成することを必要とする。視点は問題依存であるから前以て必要な側面を決定しておくことは難しい。このモデル形成の条件は問題依存性は領域依存あるいは問題依存知識を与えることによって満たされる。図2のモデルは実際には図5の様なモデル群として実現されている。核モデルを中心として、各種操作を定義するための知識に特定のモデルが対応する。

モデルの諸側面は2種に大別される。外在化と探究である。外在化は初期モデル構築である。外在化側面を外部モデルと呼ぶ。これはユーザの意図を受け取るモデル側面であり個々のユーザによる問題記述と密接に関連する。外部モデルを作るプロセスを外在化フェーズと呼ぶ。ユーザの考えをシステム内の諸操作と結び付ける為にこのモデルはまず核モデルに変換される。この変換の知識はモデル構築の方法に従って定義される。この方法には少なくとも4通りある。（1）過去の例を用いる、（2）現存の対象を参照する、（3）シナリオを作る、（4）アイデアの断片を寄せ集めてモデルを形成する、などである。この

うち、(1)はCBRとして知られ、(2)は対象構造が観察可能なきとき有用である。例えば現存の企業組織を観察することにより、モデルが作られる。ビジネス情報システムの要求仕様がこのモデルから作られる [BUB93]。(3)は技術分野で革新的な設計を開始する場合などで必要になる。例えば新型の飛翔体を開発するとき、その期待されるミッションがまず考察されシナリオの形で表される。このシナリオがモデル表現に変換される。多くの場合、人間は自分の考えを一度に正しく表現できるとは限らない。(4)は人間が自分の考えを適切に表現する過程を支援する[HOR94]。

外部モデルはシステムによって解釈され、外在化を通して表された問題の解が探求フェーズにおいて見いだされる。探求フェーズはモデル解析/評価とモデル精製/変更からなる。探求には問題に応じて固有の方法が必要であり、固有のモデル表現を必要とする。それは明示されねばならない。例えば解析法として構造解析のような手続き的プログラムが使われ、固有のモデル表現が必要となる。このように核モデルを解析するにはこのモデルを個々の解析法が必要とする別のモデル表現に変換せねばならない。この変換は解析法と一緒に定義されシステムに与えられた知識によって遂行される。

このようにしてモデル群が創造される。これらのモデルが協調的にユーザの問題を表現する。システムに(1)すべてのモデルを表すことができる方法と、(2)外在化や探求フェーズに含まれるすべての操作がモデリング法を含む言語によって表現されるなら、全プロセスがこのシステムによって処理されることになる。このような言語はシステムに大きな記述力を保証するのみでなく適応力も与えることになる。

2.4 問題解決プロセスの制御のためのメタ操作

問題解決プロセスは異なった種類の操作を一定の順序で行うように明示的に表現される必要がある。探求フェーズではゴールにできるだけ早く到達するようにモデル変換操作を制御することも重要である。操作は問題解決の文脈とは独立な推論機構を通して知識を対象に作用させることで行われるから、プロセス表現および制御は知識の選択を指定することである。システムに環境変化への適応力を与え、また知識の付加、削除、変更の自由度を保証するためにこの知識選択も知識ベース方式で行うことが望ましい。そのような知識は対象処理レベルの知識について何かを述べるものである。例えばある規則が他の規則より優先されると行ったようなものである。即ちこれはメタ知識である。この知識を適切な形式で表現することにより、対象レベルでの問題解決がうまく進められる。多重モデルの表現のような、上記以外の様々な利用の可能性を含めて、メタレベル表現と実行は知的システムを開発するうえで不可欠のものである。

3. モデリング法

概念モデルにはいくつかの重要な性質が要求される。それを列挙するに留める。モデルは外在化による対象の内部表現や探求時に生成される様々な表現が可能でなければならない(記述性)。モデルは知識によって操作されねばならない(操作性)。問題解決の基本は探索にあるので記述されたモデルは部分のみならず全体として外部の評価システムによる評価が可能でなければならない(評価性)。モデルは問題解決時には現時点までになされたすべての決定を反映し、次の決定が過去に遡ることなく現モデル表現のみに基づいてなされねばならない(文脈独立性)。これはモデルに基づく問題解決の重要な特徴である。知的コンピュータ開発の成否はこれらの条件を満たすモデル化法を見いだし得るか否かにかかっている。

実現の立場からは単一のモデル化法によって多様な概念モデルが生成できることが望ましい。モデルが構造情報と機能/性質等情報を基本として持つべきことは良く知られている。ここで対象の属性、性質、振る舞い、機能、他の実体との関係など述語によって記述されるものを一括して機能と表現しておく。対象構造はシステム内ではデータ構造として表される。するとモデル化法は述語で表された各種機能的側面が配置された構造表現を生成することである。

4. 実現へのアプローチ

4.1 知識表現—多層論理 (Multi-Layer Logic—MLL)

モデル化に普遍性を与えるためにデータ構造と機能表現の両方に大きな記述力を持つ知識表現言語が必要である。またこの言語は多重モデルとその操作を記述出来ねばならず、多レベル表現機能が要求される。多くの場合、機能表現には1階述語論理が用いられが、多重モデルを表現するときこれでは不足であり、高階論理の導入が必要になる。一般高階論理は実現が困難であるため、制約が科せられる。筆者のグループはこの条件を満たす言語を開発してきた [OHS85]。この言語は1階述語論理を拡張して上記の要求を満たすようにしたもので、この拡張は、(1) データ構造の表現と処理、(2) 制約された範囲での高階化、に集約される、実際にはこの組み合わせによって、この言語は極めて高い記述力を得る。データ構造は公理的 (Z-F) 集合論に立脚し、プリミティブな集合 (構造化) 要素を定義し、さらにこれらを結合子によって結合することによって複雑な構造が定義できる。プリミティブな集合 (構造化) 要素は集合-要素 (is-a)、集合和、集合積、構造-要素 (component-of)、積集合、冪集合、対 (リスト) である。述語は n 組 (x, y, \dots, z) から (T,F) への写像であり、これを述語に固有の手続きに置き換えることができる。このように評価手続きが準備されている述語を手続き述語 (PTP) と呼ぶ。システムは任意の手続きを受け付けて対応する PTP と共に登録できるようにしている。知識の表現に含まれている PTP は知識の評価時に対応する手続きが実行される。さらに変数は閉述語文であってもよい。この時、 $P(x, \dots, y, S(u, \dots, w))$ の形が現われる。ただしこの際、述語 S の中のどの変数 u, \dots, w , もその外側の述語 P の変数、 x, \dots, y と同じであってはならない。この2種の表現の組み合わせとして、変数が述語の構造の集合を変域とする構造変数であることができる。例を図5に示す。この言語を多層論理 (MLL) と呼ぶ。MLLはKAUSの核言語である。

4.2 概念空間

KAUS 内ではモデルを含めてすべての概念の表現は概念空間に配置されて記憶される。まずすべての対象は空間内で原則としてノードが与えられ、他の対象 (ノード) との関係が述語関係で表される。複合関係はこの連鎖として、中間ノードを介して構造を辿ることによって求まる [OHS85]。異なった記述レベルでは別の概念空間が作られる。モデル構造内の任意のノードは is-a 関係を通して上位クラス概念に自動的にリンクされ、情報を相統する。

4.3 推論

推論機構としては通常のユニフィケーションが基本として用いられる。述語のシンタックスの拡張に伴って推論アルゴリズムも拡張されている。主たる拡張は構造マッチングである。構文内に構造項が含まれているため、2つの構造の等価性あるいは包含関係のチェックが必要になる。ある種の構造ではこの直接マッチングが可能である。しかしそれが困難な場合、構造はよりプリミティブな構造に展開された上でマッチングが取られる。内部述語を含む述語に対してもマッチングや代入則が定められている。ここでは詳細は省く [YAM93]。

4.4 KAUS (Knowledge Acquisition and Utilization System)

MLLを用いて知識処理システム KAUS が開発された [YAM93]。KAUS は航空機の翼設計 [TAK89]、自動制御系設計 [GUA88]、分子構造設計 [SUZ93]、ソフトウェア設計 [LI93]、データベースからの知識の発見 [ZHO94]、知識ベースとデータベースの統合 [YAM90]、問題分割 [OHS94]、協調問題解決 [SUZ93] など多くの問題に適用されてその有用性が示された。

5. 結論

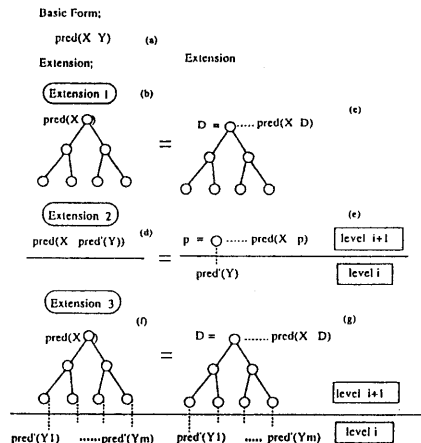


図5 多層論理のシンタックス

本論文の目的は問題解決を含め高度な情報処理が可能なコンピュータを開発することである。概念モデリングはこのシステムでは重要な役割を演じている。これからモデルに基づく問題解決システムが定式化された。本稿の内容は以下のように要約される。

- (1) 豊富なデータ構造とメタレベル記述を許す知識表現言語が定義され、準備された
- (2) 推論、記述レベルにまたがる操作の制御（レベルマネージャ）および殿レベルにおいても局所世界を作る基本システム機能が作られた
- (3) 対象構造と対象の機能を表す述語群から成る標準モデル化法が用いられている
- (4) 多重モデリング概念が確立された
- (5) このモデリング法に基づいて基本問題解決法が定義された

これらの新概念の導入の結果、次の結果が得られた。

- (A) 標準モデリング法を含む多様なモデル群が表現されること
- (B) 同じ基本問題解決の枠組で広範囲の問題が表現されること
- (C) 可能な問題解決プロセスのクラスは有限であり処理可能であること
- (D) すべての必要な概念が一つの言語で表現できること

従って、このシステムは汎用問題解決システムの枠組みを与えている。領域依存の知識が与えられてシステムは領域向き問題解決システムとして働く。

参考文献

- [BUB93] Bubenko, J.A., Jr, and Wangler, B.; Objectives Driven Capture of Business Rules and of Information System Requirements, IEEE Systems Man and Cybernetics '93 Conference, La Touquet, France, 1993
- [GUA88] Guan, J. and Ohsuga, S.; An Intelligent Man-Machine Systems Based on KAUS for Designing Feedback Control Systems, Artificial Intelligence in Engineering Design, Elsevier Science Pub. Co. 1988
- [HOR94] Hori, K.; A system for aiding creative concept formation, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 24, No.6, 1994
- [LI92] Li, C.Y. and Ohsuga, S.; A Meta Knowledge Structure for Program Development Support, Pro. 5th Intn'l Conf. on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE), 1993
- [OHS85] Ohsuga, S. and Yamachi, H.; Multi-Layer Logic - A Predicate Logic Including Data Structure As Knowledge Representation Language, New Generation Computing, 1985
- [OHS94] Ohsuga, S.; How Can Knowledge Based Systems Can Solve Large Scale Problems - Model Based Decomposition and Problem Solving, Knowledge Based Systems, Vol. 5, No.3, 1994
- [SUZ93] Suzuki, E., Akutsu, T. and Ohsuga, S.; Knowledge Based System for Computer-Aided Drug Design, Knowledge Based Systems, Vol.6, No.2, 1993
- [TAK89] Takasu, A. et al.; Intelligent Wing Design Support System, Proc. 2nd Scandinavian Conf. on AI, 1989
- [TOP94] Toppano, E. Chittaro, L. and Tasso, C.; Dimensions of Abstraction and Approximation in the Multimodeling Approach, Proc. Fourth European-Japanese Seminar on Information modelling and Knowledge Bases, 1994
- [YAM90] Yamachi, H and Ohsuga, S.; Loose Coupling of KAUS with Existing RDBMSs, Data and Knowledge Engineering, Vol. 5, No.3, 1990
- [YAM93] Yamachi, H.; KAUS6 User's Manual, RCAST, University of Tokyo, 1993
- [ZHO94] Zhong, N. and Ohsuga, S.; Discovering Concept Clusters by Decomposing Databases, Data and Knowledge Engineering, Vol. 12, 1994