

Title	オブジェクト指向モデリングを用いたリンク機構の最適形状設計支援システムの構築
Author(s)	藤田, 喜久雄; 赤木, 新介; 辻本, 和則
Citation	日本機械学会論文集 C編. 1992, 58(545), p. 310-315
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2886
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

オブジェクト指向モデリングを用いたリンク機構の 最適形状設計支援システムの構築*

藤田 喜久雄*¹, 赤木 新介*¹, 辻本 和則*²

Building an Optimal Shape Design System of Link Mechanisms Using an Object-Oriented Modeling Method

Kikuo FUJITA, Shinsuke AKAGI and Kazunori TUJIMOTO

An optimal shape design system is developed using an object-oriented modeling technique. The shape design problems of link mechanisms are generally formulated as mathematical optimization problems. In the formulation, the driving forces required for the motion of the follower are considered as objective functions to be minimized, and kinematic and geometric relationships are investigated as constraints. The process of formulating them is so complicated that the usual optimization techniques are not effective enough to support the shape design. In our system, link mechanisms are represented using an object-oriented modeling technique based on their graph representation. By means of it, the formulation for optimal design is automatically carried out. The system has effective user interface functions for setting initial shapes of mechanisms and showing results of optimization calculation. Finally, it is applied to the optimal shape design of a power shovel in order to check its validity and effectiveness.

Key Words: Design Engineering, Optimal Design, Object-Oriented Modeling, Link Mechanisms

1. 緒言

各種機械システムの設計は、要求される機能に対してそれを実現する対象物の像を求める過程であり、いわゆる逆問題であるとされる。このような逆問題に対する方法論として、数理計画法を援用した設計最適化の手法が有効であることは広く認められている⁽¹⁾。しかし、そのような方法論を適用するための定式化の過程は対象システムの複雑さに対応して煩雑で複雑なものとなり、また、実際に最適化手法を適用する場合には、最適化の結果をもとに定式化の変更を繰り返すことの必要性も多い。そのため、個々の設計問題に対して数理計画法を適用するのみならず、その前処理や後処理として、設計対象の定式化過程を有効に支援したり、あわせて、最適化計算の結果を視覚的に表示するなど総合的な支援環境を構成することが、設計最適化手法をより有効性のあるものとするためには重要である

と考えられる。これに対して、一方では、エキスパートシステムや人工知能技術の基礎をなす柔軟な対象表現の方法は従来の設計最適化では扱うことが困難であった対象システムの構成や配置などの部分についての支援を行うための技術として有効であることが認められつつある⁽²⁾。このような技術は複雑な対象物についてのモデリング技術としてとらえることができ、従来からの設計最適化の手法をより有効かつ広範に適用するための基本的な手法としてもとらえることができる。

そこで本研究では、各種機械において多方面で利用されているリンク機構の形状最適化問題を対象として取り上げ、上記の要件を満たす設計支援システムの構築を試みる。リンク機構は、原動節・中間節・従動節から構成され、その形状設計問題は従動節の運動に必要な原動節の能力(例えば、シリンガを駆動するために必要となる力の大きさ)を最小化するように機構形状を決定する最適化問題として定式化できる場合が多く、また、そのような問題は一般にある種の Min-Max 形の設計最適化問題として定式化することができる⁽³⁾⁽⁴⁾。ここでは、そのような問題をコンピュータ上に表現し、最適化計算のための定式化を自動化するための手法と

* 平成3年7月17日 第9回設計シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成3年7月22日。

¹ 正員、大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1)。

² 学生員、(株)クボタ (研究当時: 大阪大学大学院)。

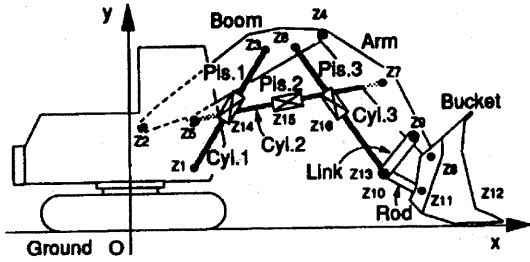


図1 リンク機構の一例
— パワーショベルのフロント部 —

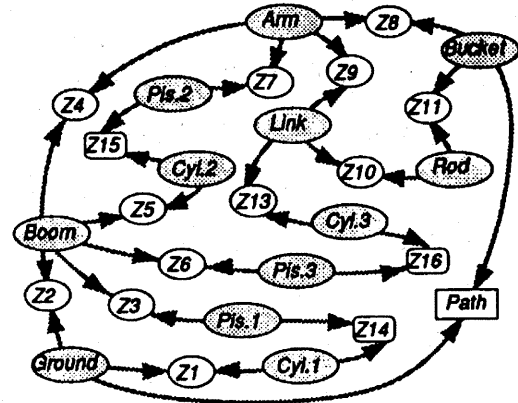
して、オブジェクト指向によるモデリング手法⁽⁵⁾を導入し、あわせて、ワークステーション上で作成したグラフィカルインターフェースの機能を用いることにより、総合的に機構形状の最適設計を支援するシステムを構築する。さらに、本システムを土木工用パワーショベルのフロント部機構の形状設計問題へ適用した事例を示す。

2. リンク機構の形状最適化問題とその構成

上述のように、リンク機構の形状設計問題はある種の最適化問題として定式化することができ、その一般的な構成は以下ようになる。

- ・設計変数：機構を構成する各部材の形状寸法など。
例えば、最後に事例として取り上げるパワーショベルフロント部の機構は図1に示すようなものであり、ブームやアームなどのサイズを設計変数とすることができる。
- ・制約条件：各部材および部材間における幾何学的な関係式・力学的釣合式、部材間の干渉に対する制約条件など。
- ・目的関数：ある運動に必要なシリンダ力など。
図1のような機構では、先端のバケットをあるパスに沿って動作させるときに、それに作用する外力に対して必要となる油圧装置やシリンダの小型・軽量化をはかるために、3本の油圧シリンダにおいて作用する力の最大値を最小化するように、目的関数を設定することができる。

しかし、図1の例をはじめとして、リンク機構は多数の部材(例えばアームやバケットなど)と対偶(ジョイントやシリンダなど)から構成されているため、上記の各種制約条件を設計変数に対して定式化することは煩雑な計算と処理を必要とし、それが最適化手法を適用す



○ : Rigid body
○ : Revolute joint
□ : Prismatic joint
□ : Path
← : Association between a body and a joint

図2 リンク機構のグラフ表現

る上でのひとつの問題点にもなっている。

そこで、本研究では、緒言でも述べたように、リンク機構の形状最適化設計の過程に対して、定式化の過程を自動化し最適化計算のためのコードを生成するための基本となるモデリング手法としてオブジェクト指向による表現⁽⁵⁾を導入し、それを核とした支援システムの構築を行う。

3. オブジェクト指向によるリンク機構モデリング

リンク機構は、一般にいくつかの部材がジョイントによって互いに連結されることにより構成されているものとしてとらえることができる。例えば、前出の図1に示した機構は、図2に示すように、個々の構成要素とそれらの間の連結関係によりシンボリックに表現することができる。また、最適化計算において条件となる機構の動作パスについても、図中のように、パスを設定する部材と基準となる部材の間で仮想的なジョイントを設定することにより、他のジョイントとあわせて統一的に扱うことができるようになる。このようなグラフ状の表現に対して、定式化における各種の制約条件も個々の構成要素や互いに隣接する要素間の関係をもとにして把握できることから、オブジェクト指向による表現⁽⁵⁾を導入することは以下の点で有効であると考えられる。

- ・図2に示したグラフ状の関係に対して、部材やジョ

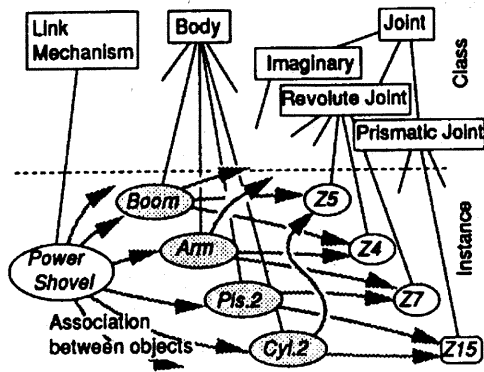


図3 オブジェクト指向による表現

```
(instance (name boom body01)
(class body)
(instance-variable
(joint-local-coord
((z2 (0.00 0.00)) (z3 (3.30 0.31);
(z4 (4.55 0.00)) (z5 (1.14 -0.35))
(z6 (4.01 0.05)))) )
(shape ((0.00 0.00) (3.00 0.90)
(3.80 0.70) (4.55 0.00)
(1.14 -0.35)) ) )
(association is-connected-by
(boom z2) (boom z3) (boom z4)
(boom z5) (boom z6) )
```

図4 オブジェクトの記述例

イントをそれぞれモジュール化することによりオブジェクト(インスタンス)として表現し、また、部材間の連結関係をオブジェクト間の関係として表現することにより、リンク機構の構成を自然な形で計算機上に表現することができる。

各種制約条件を導出するために必要となる部材とジョイントとの間の接続関係を、メッセージパッシングによりオブジェクト間のつながりをたどっていくことによって、把握することができる。

定式化のための処理をオブジェクトのクラスにメソッドとして定義することにより、それらを簡潔に記述することができる。

図3は、以上のような表現の構成と、モデリング手法における主なクラスとその階層関係を示したものである。また、図4はある部材についての具体的なオブジェクト(インスタンス)の記述例であり、そのインスタンス変数には初期形状においてジョイントが位置する局所座標値や外形などが記述され、また、オブジェクト

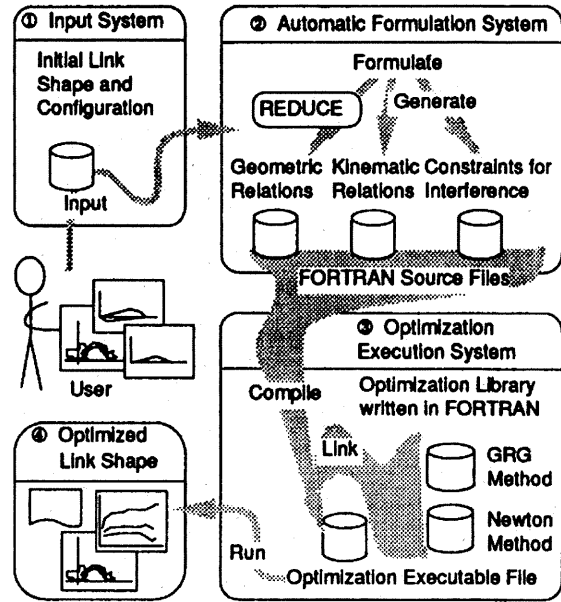


図5 設計支援システムの構成

間の関係によりその部材といくつかのジョイントが関係付けられている。

4. 最適形状設計支援システムの構築

次に、上記のようなモデリング手法を基本として構築する最適形状設計支援システムの構成とその支援過程を図5に示す。本システムは機構形状入力部(①)、定式化実行部(②)、最適化計算実行部(③)、最適化結果表示部(④)から構成されており、行列演算や数式微分のためのREDUCE3.3⁽⁶⁾や最適化処理を実行するためのFORTRANコンパイラなどとの関係をはかりつつ、機構形状設計を支援する構成になっている。機構形状入力部は、ワークステーションのマルチウインドウ上でのマウス操作によりリンク機構の初期概略形状と部材間の連結関係を入力する部分であり、定式化実行部は入力されたリンク機構に対してオブジェクト指向に基づいたモデリングを行い、最適化のための制約条件式などを導き出した上で、それらをFORTRANのソースファイルとして出力する部分である。最適化実行部は生成されたFORTRANプログラムをコンパイル・リンクし、実行形式の最適化計算プログラムを作成した上で、それを実行する部分である。なお、本システムはSun SPARC Station上でCommon Lispにより記述したオ

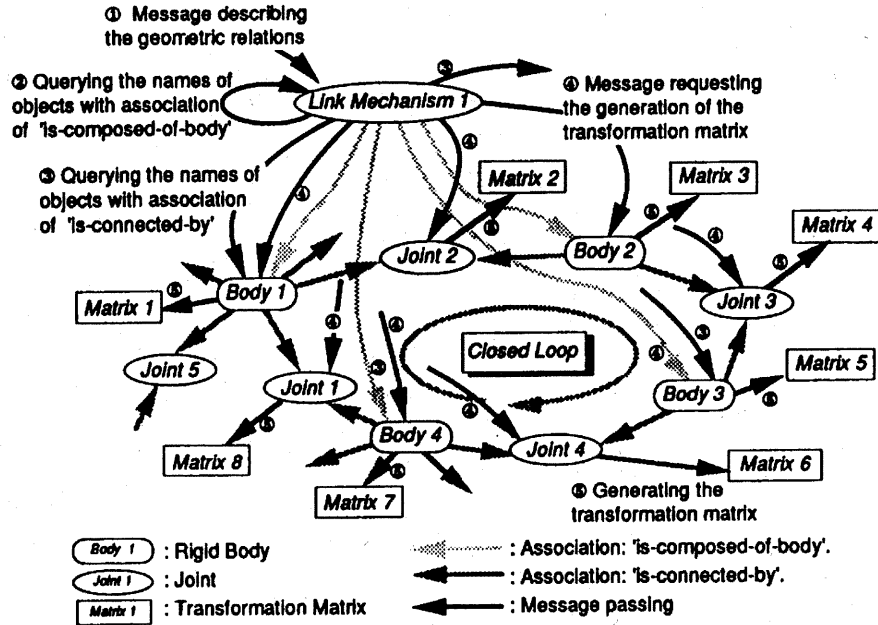


図6 幾何学的関係式の導出

プロジェクト指向プログラミング環境を用いて構築し、グラフィカルインターフェースの構築には Open Windows⁽⁷⁾を用いた。次節では、定式化処理の過程を中心にシステムの具体的な処理を示す。

5. オブジェクト指向モデリングに基づいた定式化処理と最適化計算の支援

5.1 幾何学的関係式の導出 上記のシステムにおける処理の一例として、まず、部材間の幾何学的な関係式を導出する過程を以下に示す。本モデリング手法では、3節で示した図2のように、リンク機構のすべての部分がグラフ状の表現における閉ループの何れかの部分に含まれるようになっている。これにより、幾何学的な関係は、すべての独立した閉ループにおける幾何学的関係、すなわち「ループに沿って一周する座標変換が恒等変換となる」という条件として扱うことができる。図6は、その処理過程を示したものであり、機構に対応するオブジェクトに対して処理を求めるメッセージが送信されると(①)、それを構成する部材やジョイントの中から独立した閉ループの部分が探索により切り出される(②・③)。その後、各閉ループに対して、それを構成する部材やジョイントにおける並進や回転の座標変換を表した行列のオブジェクトを生成する処

理が行なわれる(④・⑤)。またそれとともに、積が単位行列となる座標変換行列の列がリストとして保持される。これを用いることにより、幾何学的な関係に関する連立方程式を Newton-Raphson 法を用いて解くため FORTRAN サブルーチンを作成することができる。なお、この過程では、座標変換行列についての演算や Jacobian 行列の算出などを行うために REDUCE 3.3⁽⁶⁾の機能を用いる。

5.2 力学的釣合式の導出 次に、力学的な釣合式を導出する過程について示す。図7は、ある部材における力の釣合式を導き出す処理の一部を示したものである。釣合式の導出は、ある部材にジョイントを介して作用する力の各方向成分の釣合を表した条件式を導出する処理過程であり、3節で示したモデリング手法に基づいて以下のようにして行うことができる。まず、ある部材のオブジェクト 'Body1' に力の釣合式を生成することを求めるメッセージが送信される(①)。続いて、その処理に対応するメソッドがそのクラスから継承され(②)、この部材と連結されている部材名を列挙するために、オブジェクト間の関係 'is-connected-by' によって接続されているジョイントのオブジェクトを参照するメソッドが起動される(③)。さらに、それらのジョイントに対して同様の関係によって接続されている他の部材のオブジェクトを参照する

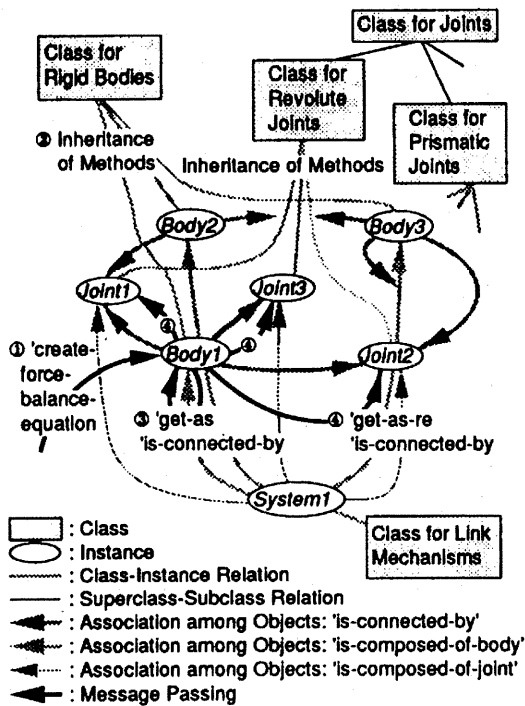


図7 力学的関係式の導出

ための処理が起動される(④)。このようにして得られた部材について、それらとの間で作用し合う力に対する名称がそれぞれ参照され、導出すべき釣り合い式が生成されて、オブジェクト'Body1'に保持される。なお、モーメントに関する釣り合い式についても、同様の処理により導出することができる。

5.3 部材間の干渉に関する条件式の導出 リンク機構の設計においては、上記の幾何学的・力学的条件に加えて、機構として成り立つための条件、すなわち、所定の動作において部材どうしが干渉しないための条件を考慮する必要がある。ここでは、なかでも、回り対偶となるジョイントによって連結された2つの部材間の干渉を制約条件として考慮することとし、さらに、図4にも示したように、各部材の外形を多角形と仮定した上で、その形状を設計変数である部材の代表寸法に対して比例的にのみ変更できるものとする。その上で、ジョイントのオブジェクトを中心として、両者のオブジェクトの間で制約条件式を導出するための処理が行なわれる。

5.4 目的関数とその設定 目的関数には、一例として、2節でも述べたようにある動作パスにおいて原動節に作用する力(シリンダ力)の最大値の最小化を設

定する。すなわち、

$$J = \min_u \left[\sum_{i=1}^I \max_{\lambda_i} \{ F_i(\lambda_i) \} \right] \quad (1)$$

ここで、 i : 原動節、 I : 原動節の総数、 u : 設計変数ベクトル、 λ_i : 従動節の動作パスを構成する動作位置に対応するインデックス、 $F_i(\lambda_i)$: 動作位置 λ_i において原動節 i に作用する力、を最適化すべき目的関数とする。しかし、このようなミニ・マックス操作を直接実行することは計算量の増大につながるため、以下のような目的関数におきかえることにより、最適化計算を実行することにする⁽³⁾⁽⁴⁾。

(I) 機構の動作についてのシミュレーション計算により、各原動節 i について作用する力がそれぞれ最大となる動作位置 λ_i^* ($i=1, \dots, I$)を求める。

(II) (I)で求めた λ_i^* に対して、

$$J = \min_u \left[\sum_{i=1}^I F_i(\lambda_i^*) \right] \quad (2)$$

を最小化する設計変数の値を最適化計算により求める。

(III) Kuhn-Tuckerの条件⁽⁵⁾を満足するか、目的関数の変化が微小であれば、(II)で得られた値を最適値とし、そうでなければ、(I)にもどって以上の過程を繰り返す。

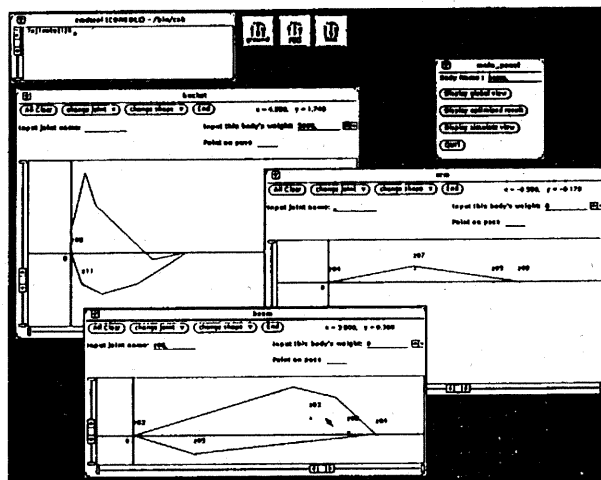
なお、ここで、(II)における最適化計算には、一般縮小勾配法(GRG Method)⁽⁶⁾を用いる。また、目的関数には上記のものと異なる関数を設定することも可能である。

5.5 最適化ルーチンとの融合と最適化計算の実行

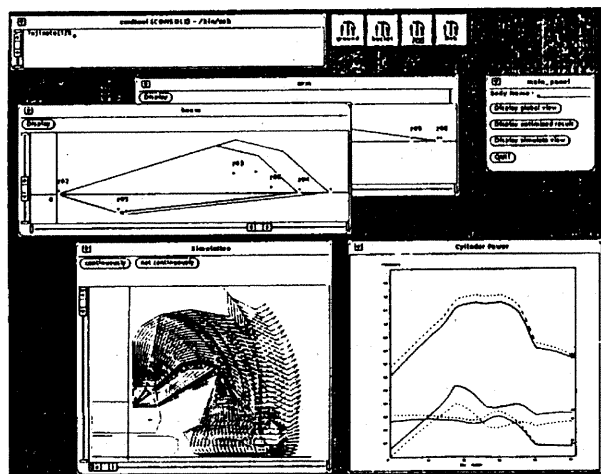
以上の処理により、各種の制約条件や目的関数がFORTRANのサブルーチンとしてコーディングされると、最後に、それらを最適化計算のためのルーチンプログラムとともにコンパイル・リンクし、続いて、最適化計算を行う。また、それにより得られた最適結果は、ユーザが初期値として設定した形状とともにワークステーションのウィンドウ上に表示される。

6. パワーショベルの最適形状設計問題への適用

最後に、本システムを土木工専用大型パワーショベルのリンク機構(図1)に適用した事例を示す。対象とする機構は原動節である油圧シリンダの伸縮によりバケットの平面運動を行なう3自由度機構であり、その設計問題は、設定された従動節であるバケットの挙動および負荷条件に対して3つの油圧シリンダの必要動力の最大値の総和を最小化するようにブームとアーム



(a) 初期機構形状の入力



(b) 最適化形状とその動作の表示

図8 システムの実行例

の形状を決定する問題として定式化することができる。

図8は、その形状最適化設計を本システムを用いて行った過程を示している。図中(a)は、本システムの機構形状入力部の機能により、ユーザが最適化すべきリンク機構の構成(初期形状)を入力している画面である。このようにして、初期形状が入力され、設計変数や目的関数が設定されると、続いて、定式化処理や最適化計算が実行される。さらに、最適化計算が終了すると、図中(b)のように機構の動作や初期形状と最適化形状の比較が表示される。表1は、この計算例における初期値と最適値の比較を行ったものであり、シリンダ2に作用する力が改善されたことにより、最適化がはかれ

表1 最適化計算の結果

	Design variables		Objective functions [$\times 10^6$ N] (Max. of cylinder power)			
	Boom	Arm	Cyl. 1	Cyl. 2	Cyl. 3	Total
Initial	1.0	1.0	0.3077	0.5402	1.1642	2.0121
Optimal	1.1277	1.0194	0.3457	0.4023	1.2195	1.9672
Improvement	—	—	-12.3%	25.5%	-4.65%	2.23%

たことを示している。なお、以上の一連の計算には、SPARC Station 2 を用いて約 90 分を要した。

7. 結 言

本研究では、オブジェクト指向モデリングにより最適化計算のための定式化を自動化することを基本としたリンク機構の最適形状設計支援システムを構築した。また、事例としてあるパワーショベルの最適形状設計問題に適用してその基本的な有効性を検証した。これにより、オブジェクト指向による対象モデリングは、リンク機構の構成を表現し各種の関係を定式化する上で有効な手法であることを確認した。以上のような支援をより有効なものにするために、今後、動的な動作条件のもとでの最適化計算や定式化処理の効率化などの点で拡張をはかる予定である。

文 献

- (1) 例えば、赤木、エンジニアリングシステム設計工学、(1982)、共立出版。
- (2) 例えば、Pham, D. T. (Ed.), *Artificial Intelligence in Design*, (1991), Springer-Verlag.
- (3) 伊東・黒岩・赤木、機論、51-462, C (1985), 460.
- (4) 伊東・沢田・赤木、機論、52-483, C (1986), 2982.
- (5) 例えば、Booch, G., *Object-Oriented Design with Applications*, (1991), Benjamin/Cummings.
- (6) Hearn, A. C., *REDUCE USER'S MANUAL Version 3.3*, (1987), The RAND Corp.
- (7) Heller, D., *XView Programming Manual — An OPEN LOOK Toolkit for X11* —, (1989), O'Reilly & Associates.
- (8) 例えば、Papalambos, P. Y. and Wilde, D. J., *Principles of Optimal Design — Modeling and Computation*, (1988), Cambridge University Press.
- (9) 例えば、Himmelbrau, D. M., *Applied Nonlinear Programming*, (1972), McGraw-Hill.