ファジィ理論に基づく対話形機構選定システムに関する研究*

堀江 三喜男^{*1}, 舟橋 宏明^{*1}, 荒井 勝^{*2}A study of an Interactive Selection System of Mechanisms
in Mechanical Systems Based on Fuzzy Set Theory

Mikio HORIE, Hiroaki FUNABASHI and Masaru ARAI

This paper deals with an interactive system which is able to select mechanisms of mechanical systems in conceptual designs. In this system, there is a heuristic knowledge base of mechanisms which is expressed by membership values and vagueness values based on fuzzy set theory. When design specifications expressed by a frame representation are given, consistency degrees and matching degrees are derived. These two values represent the similarity between the design specifications and the information about various mechanisms in the heuristic knowledge base. By evaluating these two measurements for each possibility, a mechanism is selected for the conceptual design. The effective performance of this system is demonstrated with an example.

Key Words: Design Engineering, Mechanism, Fuzzy Set Theory, Conceptual Design, Mechanical System, Interactive Selection System of Mechanisms

1. 緒 言

本研究は、複数の機構から構成される機構系の概念設計を機構の組合せ問題と機構選定問題として捉え、対話的に設計を支援する CAD システムの開発の一環として行われたものである⁽¹⁾。この CAD システムは、(1) 要求機能を整理・検討し、要求仕様をコンピュータのデータとして入力する要求仕様決定過程、(2) 要求仕様より得られる機構の入出力運動形式に着目した機構モデルによる機構系の自動生成過程、(3) 機構モデルを具体的な機械要素・装置に変換し、その結果について総合的に評価・決定する機構選定過程、の三つの設計過程から構成されている。

本報は(3)の機構選定過程について述べたものであり、この過程は設計者の要求に対して知識ベース内の専門家の機構に関する知識を検索・参照し、設計者の満足のいく機構を効率的に得る過程である。

本報では、まず、この機構選定を可能にするために、設計者の要求をフレーム表現で整理し、ファジィ理論

を用いて設計者の要求と専門家の知識を同一の知識表現で表す。ついで、このように表された要求仕様と専門家から得た知識との類似度を判定し、機構選定が効率的に行えるシステムを提案する。さらに、このシステムにより、機構系の自動生成過程⁽¹⁾より得られる機構系内の機構の選定が可能となることを具体例とともに示す。

2. 機能の記述

2.1 機構の属性 一般に概念設計とは、与えられた機能に対し必要な機能を明確に定義し、その機能を実現する原理や構造を求めて、技術的に裏付けのある製品の全体を創出する設計過程である。これは、人間が頭の中に概念として持っている要求機能を実体としての製品に展開する過程である。この知的活動をコンピュータで処理するために、図1のように機能群から機構群への変換になんらかの中間モデルを作成することが必要であり、中間モデルを生成した後に⁽¹⁾、機構の選定を行う必要がある。そこで、これらの変換過程に必要な機構の属性について考えた場合、以下の(1)、(2)に示す機能面と実体面という二つが機構の属性として挙げられる。

(1) 機能面：機構のもつ機能を定性的にとらえた

* 原稿受付 平成元年10月20日。

^{*1} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} 正員、山武ハネウェル(株) (〒144 東京都大田区西六郷 4-28-1)。

もの。例えば、運動の変換伝達を行う、運動軸方向を変換する、トルクを変換する、動力の断続を作る等が挙げられる。

(2) 実体面：機構の形、外観を形成する定量的なもの。例えば、寸法、重量等が挙げられる。

本報では、概念設計段階における設計要求仕様としては、上述の機構の属性である機能面と実体面の二つのうち、「出力に不等速運動を要求する」や「動力の断続を作るものが必要である」のような(1)の機能面を取扱うことにする。

まず、機構の持つ機能を基本機能とそれ以外の機能に大別する。基本機能とは、入出力運動を変換・伝達し、かつ入出力運動軸方向を変換する機能に相当する。この機能を用いて、図1の機能群から機構の中間モデル群への変換が行われる。そして、基本機能以外の機能を用いて、図1の機構の中間モデル群から機構群へと変換が行われる。

いま、次のような要求仕様「入力に回転運動を与え、出力に間欠回転運動を得たい。その際、変速が可能で、振動がとて小さいものを作りたい」に対して機能の違いを考える。この要求仕様のうち、機能要求 (Function Requirement) のみを構文として取り出すと次のようになる。

FR1：入力の回転運動を変換して出力に間欠回転運動を得る

FR2：変速を可能とする

FR3：振動をとて小さくする

FR1は入力から出力まで運動を伝えるという機械運動系における基本機能である。FR2およびFR3はそれ以外の機能であり、次のように表現することができる。

FR2：〈変速〉 〈行う〉

FR3：〈振動〉 〈小さい〉

この二つの機能のうち、FR2は可能か否かを要求する機能であり、FR3はある程度の幅を持って実現の可能性を要求する機能である。そこで、FR2のような機能を副機能Iと呼び、FR3のような機能を副機能IIと呼ぶ。

能IIと呼ぶ。

2.2 機能のフレーム表現 2.1で述べた基本機能、副機能IおよびIIを、コンピュータに階層的に体系づけて記憶させるためにフレーム表現を採用する。その例を以下に示す。

(要求仕様

(基本機能

(入力 (回転運動))

(出力 (間欠運動))

(軸位置関係 (平行)))

(副機能I

(変速 (行う)))

(副機能II

(振動 (小さい)))

この中の副機能IIに含まれる「小さい」、あるいは「多少、とて」等の取扱いには、量的なものを定性的に扱うということで、次節に示すファジィ理論を用いることにする。

2.3 メンバシップ値とベグネス値による機能表現 要求仕様のうち副機能IIにあたる機能を言葉で定義するあいまいさとその要求の程度の不確かさをそれぞれファジィ概念のメンバシップ値とベグネス値で表す。ここでは表1に示すメンバシップ値に[0, 1]の範囲で0.25ずつの5値、ベグネス値に[0, 1]の範囲で0.5ずつの3値を用いる。同表において、五つのメンバシップのうちUKは“～必要でない”, MLは“多少～必要である”, VTは“とて～必要である”を表し、三つのベグネス値のうち、Cは“はっきりと要求する”, Rは“だいたい要求する”, Vは“わからないが要求する”を表す。

ここで、あいまいさをメンバシップ値で扱い、要求の程度の不確かさをベグネス値で表したのは、人間

表1 メンバシップ値およびベグネス値

Membership		Value
Unknown	: UK	0.0
More or less true	: ML	0.25
True	: TR	0.5
Very true	: VT	0.75
Completely true	: CT	1.0

Vagueness		Value
Clearly	: C	0.0
Roughly	: R	0.5
Vague	: V	1.0

図1 中間モデルをおいた機能群から機構群への変換

がコンピュータに情報を入力する場合、次の二つの問題点

(a) 人間側で情報が不足しており、あいまいな情報を入力しなければならない。

(b) あいまいな情報しか持っていないにもかかわらず、数個の選択肢の中から無理の一つを選んで入力した場合、同一の質問を受けても再び同一の回答を入力するか否かに関して自信が持てない。

が生じ⁽²⁾、これらの点を考慮して、(a)に対してメンバシップ値、(b)に対してベグネス値を採用する。

副機能IIのコンピュータへの入力是对話形式で行われ、その応答例を以下に示す。=>はコンピュータからの応答、>は設計者の入力部分である。

=>要求機能を入力して下さい

> 振動 小さい

=>どの程度必要ですか？

=> (1. 必要でない 2. 多少必要である
3. 必要である 4. とても必要である
5. 絶対必要である)

>4

=>振動 とても 小さい

=> ただいまの要求をどの程度の自信をもって答えましたか？

=> (1. はっきりと 2. だいたい
3. わからないが)

>1

図2 メンバシップ関数

図3 ファジィ集合間の関係 (A: 要求仕様より得られるファジィ集合, B: 知識ベース内のファジィ集合, C: A, Bの共通ファジィ集合)

=>はっきりと 振動 とても 小さい

=> ****要求機能 入力終了****

このようなシステムへの入力により、システム内部ではファジィフレーム表現による要求仕様が表1に示す値を用いて表現される。しかし、その値をコンピュータ内部で演算処理するために、定量値に変換する必要がある。その変換関数は中央値にメンバシップ値を、中央値の広がりにはベグネス値を用いて、次式で表される。

$$\mu(x) = \left(\frac{x - m_L}{m - m_L} \wedge \frac{m_H - x}{m_H - m} \right) \vee 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $m_L = m - mv$ (下限値), $m_H = m + (1 - m)v$ (上限値), m : メンバシップ値, v : ベグネス値, $\wedge$ および $\vee$ はそれぞれその記号の前後の値の小さいほうおよび大きいほうをとる演算記号である。

いま、振動が小さいという知識に関して、メンバシップ値がVT、ベグネス値がRのときの変換関数であるメンバシップ関数を示せば図2の太実線となる。この関数を表す三角形の底辺の長さはベグネス値がC, R, Vと変化するとともに大きくなる。これは知識があいまいになるほど、大きなものとなることを意味する。

3. 機構選定のための評価測度

機構選定においては、設計者の要求と知識ベース内の専門家の知識との類似度の高い機構が、選定される順位の高い機構となる。そこで要求仕様から定まるファジィ集合と知識ベース内のファジィ集合から得られる評価測度を定める。いま設計者の要求から定まるファジィ集合をA、専門家から得られる知識ベース内のファジィ集合をB、両集合の共通ファジィ集合をCとする。図3はこれらの集合のメンバシップ関数を表す。図3においてA, BおよびAとBの共通部分の面積をそれぞれ S_A , S_B および S_C とする。本研究では評価測度として、二つの集合A, Bのファジィ関数の交点の高さを表す一致度(cd_{AB} ; Consistency degree)および交わりの面積を表す照合度(md_{AB} ; Matching degree)を採用する。一致度はファジィ概念の拡張原理として次のように定義される⁽²⁾。

$$\begin{aligned} cd_{AB} &= \sup_{x=y} \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \\ &= \text{hgt}(A \cap B) \\ &= \text{hgt}(C) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、hgtはファジィ関数の高さを表す。

照合度はファジィ集合Cがファジィ集合A, Bにどの程度含まれるかを表し、次式のように、区間[0, 1]内の実数で表される。

$$md_{AB} = \frac{S_C/S_A + S_C/S_B}{2} \dots\dots\dots (3)$$

図4の太実線は専門家の知識を表すメンバシップ関数の一例であり、細実線は設計者の要求仕様をベグネス値が同一である五つのメンバシップ関数として表したものである。

図4からわかるとおり設計者の要求仕様のベグネス値が増大すれば、式(2)に示す評価測度は単調に増加する。これは設計者の要求にあいまいさが増せば検索の幅が増加することを表す。また要求仕様のメンバシップ値が増加すれば、式(3)に示す評価測度(○印を頂点とする三角形の面積に対応)は単調に増加することがわかる。

なお、本選定過程では、設計者の要求仕様と専門家の知識それぞれがもつ情報の主要部分を表すメンバシップ値に近いほど、設計者の要求が満足されと考え、まず、式(2)に示す一致度で機構選定を行い、一致度が同一の場合には要求の程度の不確実さを表すベグネス値により機構の候補の選定の幅を広げることを見て、式(3)に示す照合度により機構選定を行うこと

図4 メンバシップ値と評価測度の関係

図5 機構系の自動生成結果の一部

にする。

式(2)、(3)で表される二つの評価測度は機構の選定過程において重要な役割を果たす。

4. 機構系の自動生成

機構系の概念設計を支援するCADシステムの一つの過程である機構系の自動生成の処理結果の一例を図5に示す。

図5に示す各記号の意味は表2に示すとおりである⁽¹⁾。図5は基本機能として入力に往復直線運動(LR)、出力運動に間欠往復直線運動(LRI)および間欠回転運動(RI)を与え、入出力運動軸の位置関係を直交(Or)とし、入出力部を除く機構の数を2としたときの生成結果の一部である⁽¹⁾。図5において、Inは入力、Outは出力を表し、 $\square$ は一つの機構を意味し、機構内の一および⊥はそれぞれ入出力運動軸が平行および直交していることを意味する。

5. 機構選定過程

2章で述べた要求仕様に基づく機構選定について述べる。この機構選定は3章で述べた評価測度(一致度および照合度)を用いて行う。いま、図5の機構系に含まれる一つの機構が持つ副機能Iが「平行2軸間で回転運動を伝達する」である場合の機構選定を考える。知識ベースには以下に示すフレーム表現で記述された専門家が定めた機構に関する知識が収納されている。

(歯車

- (伝達効率 大きい CT R)
- (振動 小さい ML R)
- (騒音 小さい ML R)
- (サイズ 小さい ML R)

(歯付ベルト

- (伝達効率 大きい VT V)
- (振動 小さい TR R)
- (騒音 小さい TR R)
- (サイズ 小さい VT R)

(Vベルト

- (伝達効率 大きい TR R)

表2 機械運動の種類

Rotation group	R:Rotation	RI:Intermittent rotation	ROT:Other rotation
	RO:Oscillation	ROI:Intermittent oscillation	ROO:Other oscillation
Linear motion group	L:Linear motion	LI:Intermittent linear motion	LOT:Other linear motion
	LR:Reciprocating motion	LRI:Intermittent reciprocating motion	LRO:Other reciprocating motion

(振動 小さい TR C)
(騒音 小さい TR C)
(サイズ 小さい TR R))

(平ベルト

(伝達効率 大きい ML R)
(振動 小さい VT C)
(騒音 小さい VT C)
(サイズ 小さい TR R))

(サイレントチェーン

(伝達効率 大きい VT C)
(振動 小さい ML R)
(騒音 小さい ML R)
(サイズ 小さい VT C))

(ローラチェーン

(伝達効率 大きい VT R)
(振動 小さい ML R)
(騒音 小さい ML R)
(サイズ 小さい VT C))

この知識を用いて、要求仕様として動力伝達効率、振動およびサイズを考慮した場合の機構の選定例を以下に示す。要求仕様を

- ・伝達効率がとても大きい
- ・振動が多少小さい
- ・サイズが小さい

とすれば、これらはフレーム表現を用いて、

(要求仕様

(伝達効率 大きい VT R)
(振動 小さい ML R)
(サイズ 小さい TR V))

のように表される。

伝達効率に関してシステムとの応答例を次に示す。必要とする程度について、とても大きい(4)すなわち

VTを入力し、その要求の程度として、だいたい(2)すなわち R を入力する。この入力をファジィ関数に変換し、先の知識ベース内のファジィ関数と比較し、一致度、照合度を評価測度として機構選定を行う。その過程を示せば次のようになる。

=> 必要とする副機能IIの程度を入力して下さい。

=> 伝達効率、どの程度大きいですか？

=> (1. 大きくない 2. 多少大きい 3. 大きい 4. とても大きい 5. 絶対大きい)

>4

=> 要求をどの程度の自信をもって答えましたか？

=> (1. はっきりと 2. だいたい

3. わからない)

>2

=> ****推論 実行結果****

=> だいたいだが 伝達効率が とても大きい

=> 第(1-1)候補：ローラチェーン

第(1-2)候補：歯付ベルト

第(1-3)候補：サイレントチェーン

第(2-1)候補：Vベルト

第(2-2)候補：歯車

第(3) 候補：平ベルト

=> ****候補選定 終了****

実行結果のうち、“第($m-n$)”とある場合、 m は一致度による選定順位であり、 n は一致度が等しいときの照合度による選定順位を表す。この結果、第一候補としてローラチェーンが選定される。これは要求仕様と先の知識ベース内のローラチェーンのメンバシップ値およびベグネス値がともにそれぞれVTおよびRであるので、一致度、照合度がもっとも大きくなることによる。

要求仕様の副機能IIが複数の時には各機構について

一致度、照合度の総和を求める。その結果を示せば、表3となる。先の伝達効率に関しては一致度のもっとも大きいものが複数あるので、さらに照合度を求めて、ローラチェーン、歯付ベルト、サイレントチェーンの順に機構を選定する。振動、サイズについても同様に行う。最終的に評価するためには、各副機能IIの一致度、照合度それぞれの総和の平均を用いる。表3から、ローラチェーン、サイレントチェーンの順に機構の候補が選定される。

以上から、専門家の知識と設計者の要求仕様を一致度および照合度で表される評価測度により比較し、設計者の要求をほぼ満足する

表3 一致度と照合度による機構選定結果

	cd md	Trans. Effic.	Mag. Vib.	Size	Sum.	Sum./3	Select. Order
Gears	cd	0.600	1.000	0.714	2.314	0.771	2-1
	md	0.429	1.000	0.602	2.031	0.677	
Synchronous Belts	cd	1.000	0.600	0.714	2.314	0.771	2-2
	md	0.745	0.500	0.607	1.852	0.617	
V Belts	cd	0.600	0.333	1.000	1.933	0.644	3
	md	0.447	0.500	0.745	1.692	0.564	
Flat Belts	cd	0.333	0.000	1.000	1.333	0.444	4
	md	0.156	0.500	0.745	1.401	0.467	
Silent Chains	cd	1.000	1.000	0.500	2.500	0.833	1-2
	md	0.500	1.000	0.500	2.000	0.666	
Roller Chains	cd	1.000	1.000	0.500	2.500	0.833	1-1
	md	1.000	1.000	0.500	2.500	0.833	

結果が得られた。

なお、本機構選定システムはC言語を用いて作成している。

6. 結 言

概念設計段階における機構選定を可能にするために、設計者の持つあいまいな要求と専門家から得た機構に関する知識をファジィ理論を用いて表すことにより、両者の類似度を判定する評価法を提案し、機構選定が効率的に行えることを具体例により示した。本研究で得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 要求仕様を機構のもつ機能としてとらえ、これを基本機能、副機能ⅠおよびⅡに分け、これを階層的に体系づけて要求仕様のコンピュータへの入力を可能にした。

(2) 機構選定のために要求仕様のうち副機能Ⅱならびに専門家が有する知識をファジィ概念のメンバシ

ップ値とベィグネス値により表現し、両者の類似度を表す評価測度に一致度ならびに照合度を採用し、この二つを用いた要求仕様に適合する知識ベース内の専門家の知識を検索する対話形機構選定システムを提案した。

(3) このシステムにより、機構選定を具体的に実施した結果、概念設計段階で設計者の要求が与えられた場合に、設計解が効率的に得られることがわかった。

最後に、本研究の一部は東京工業大学・知能化機械研究設備を用いて行われたことを付記する。

文 献

- (1) 堀江・舟橋・荒井, 機論, 56-525, C (1990), 1331.
- (2) 寺野・浅居・菅野, ファジィシステム入門, (1987), 164, オーム社.