|||||
講演
|||||

ヨーロッパにおけるファジィ技術の現状 (1) †

E.H.マムダニ*

正直なところ、お詫びをすることから私の話を始めなければなりません。今回私は、ヨーロッパにおけるファジィ集合の現状について、全てをお話できるとは思っていません。ファジィ集合の現状については、お話できることがあまりないからなのです。今回特に取り上げようと思ったテーマは、ファジィ集合を含めて、ヨーロッパの研究分野で何が起きているか、ということであります。確かに何かは進んでおります。しかしながら私はこれをファジィ制御の全般的な文脈の中に組み込み、ファジィ制御に的を絞って話を進めたいと思います。理由はいろいろありますが、先ずファジィ制御の歴史的な流れを簡単に説明することから始めたいと思います。ファジィ制御自体に関する限り、私が改めてここで説明しなくても、本日も

参加の皆様はよくご存知だと思いますので、敢えて説明は省きます。またスライドでも説明されていますので、そちらをご覧くださいましょう。

私は現在、クィーン・メリー・アンド・ウエストフィールド・カレッジで教えています。私がクィーン・メリー・カレッジで今まで教鞭を取ってきたことはご存知のことと思います。以前はクィーン・メリー・カレッジという名前でしたが、他の大学と合併したことによって、クィーン・メリー・アンド・ウエストフィールド・カレッジになったのです。ところで、私がファジィ制御の歴史に注目し興味深いと思うのは、私共が最初にファジィ制御に取り組むようになってから現在まででだいたい18~19年が経過したということです。これは約18年前にヨーロッパ用に用意されたスライドですが、最近ヨーロッパでこの時期になって見直されたものです。これが見直されたことによって、私共が18年間に行ったことの中に多くの優れた考え方があることが再発見されました。同時に良くない考え方も見つかりました。歴史を振り返って見ると、なぜファジィ制御の研究を1970年1971年から1974年にかけて行ったかがお分かりいただけるでしょう。

- Fuzzy control work is now about 18 years old
- This is the time period when ideas both GOOD and BAD get rediscovered
- In early 1970s (1971 to 1974) we were not concerned with applying Fuzzy Control
- Only 25% of Assilian's Thesis is on Fuzzy Control
- The main motivation was to study learning control of complex plants

† この講演は、平成4年6月9日に、国際ファジィ工学研究所において行われたもので、LIFE NEWS Vol.4, No.1(1992年11月発行)のpp.11-22に掲載されたものを研究所の許可を得て転載させて頂いたものである。

* E.H. MAMDANI
Queen Mary & Westfield University

その当時、私共はファジィ制御を応用することなど考えもしませんでしたし、私がやろうとしていたことでもありませんでした。1970年にはファジィ集合の応用など、ほとんど目にすることはありませんでした。当時発表されたファジィ集合に関する論文のほとんどが非常に技術的な内容であったり、かなり数学的な形式が使われていた、ということのを是非思い出していただきたいと思います。ですからそこには実際的な応用などはなかったのですが、私は応用に興味を持ったのです。最初の研究は、私の研究生であったシリア人の学生が行いました。私は講演の準備に彼の論文を読み返してみました。私共がその準備をしたのは1年前のことです。これはファジィに関する興味が高まっていたドイツから講演の依頼があったためです。その論文の中でファジィ制御に触れられていたのは、たったの25パーセントに過ぎませんでした。大部分は、研究を行った本当の理由が複雑な動作に対する学習制御であった、ということが述べられていたのです。もし複雑なプロセスを抱えたらどうなるか、もしプロセスに関しての数学的な記述がなかったらどうして制御するか、そしてどのように対処するかを述べていたのです。それが本当の動機だったのです。私共がどのようにしてファジィ制御に到達したかをお話しする前に、この研究が正確にどういうものであったかを説明したいと思います。

私共がしようとしていたのは、次のようなこと

でした。ここにプロセス、しかも動的なプロセスがあります。実験の便宜上、これを「複雑なプロセス」と呼ぶことにします。それがテーマでありました。入力操作されると、スライドのここに見えるものですが、これが制御装置です。そして制御装置の出力はある方法でデコードされます。ここでコーダ(符号発生装置)とデコーダ(符号解読装置)のことを頭に入れ、これをプラントに適用させます。理想はプラント用の制御装置を設計することにあります。

どのようにしてそのような制御装置を設計するかについて話し合うのが興味の中心だったのです。一つの方法は制御装置の訓練であります。訓練方法には何種類かあります。プラントを監視することができる人間のオペレータを教師にする方法、あるいはプラントを監視することのできる性能評価装置といったものによる方法です。どちらを採用するかによって、得られる学習制御体系も違ってきます。

これは一つの考えられる体系です。この体系では入力を接続し、このように行っています。これが示しているのは、閉ループ制御系で、すでに実用になっているものです。プラントが運転している間に貴方はまた、制御装置を訓練しているということです。入力を操作することによって、制御装置がすでにシステムを制御しているのです。これが私共が採用することができた一つの方法です。実際に使った体系はこういったものでした。

Closed loop control with simultaneous training by teacher

FUZZY Control

E. H. Mamdani
Queen Mary & Westfield College

Options for training methods in a learning controller

FUZZY Control

E. H. Mamdani
Queen Mary & Westfield College

私共が制御装置について学ぼうとした方法は、プラントがオープンの場合でした。このスライドがオープンの場合であって、制御装置がプラントの状況を見ることはできますが、実際にプラントを制御してはいません。と言うのもこれがオープンだったからです。その間教師もプラントの状況を見るができますので、制御装置と教師は両者とも同じ方法でプラントを監視していたことになります。しかし教師の方は修正動作をとりました。と同時に制御装置は教師がどのような修正動作を取っているかを理解することができたのです。制御装置が教師のしていることを理解できるわけですから、制御装置の役目は、監視しているプラントの状態と監視している教師の修正動作を関連付けることになります。つまり監視している状態－修正動作のペアを関連付けようとしたのです。この時、私は自分の研究テーマであるニューラルネットワークについて論文を書き上げたばかりでしたので、それを使うことができると考えたわけです。また、ニューラルネットワークは統計的パターン認識装置と数学的に非常によく似ていましたので、この中で私共が使用した正確な体系は、1971年当時標準であったベイジアン学習アルゴリズムでした。この時点での状態にはファジィ集合は入っていません。

さて、どういった計画を私共が選択したかをお話したいと思います。先ず自分達でこうした小さなスチームエンジンを製作したのです。これに

はボイラーとヒーターがあり、圧力を計ることもできます。ボイラーから蒸気をエンジンの内部に送り込むことのできる小さなバルブであるスロットルを制御することができ、スピードを計ることもできます。これは私共の研究所で作られたものであり、ボイラーの規模は極めて小型です。ボイラーの大きさが小さかったために、相互干渉の大きいシステムであったのです。スロットルを開けることによりエンジンのスピードを速くすると、圧力がたちまち下がり始めました。蒸気圧ループとスロットル・スピード・ループとの間に相互干渉が起こったのです。

これはそれほど複雑なシステムではありませんから、数学的にモデル化することができました。その数学的なモデルをお見せしたいと思います。しかし私共にとってポイントとなる点は、これが学習するには複雑なシステムだということです。従ってベイジアン制御装置を適用した時に何が起こったかを見てみましょう。

制御装置は教師の行動に基づいて、プラントの状態に与えられる修正動作の確率を学習しようと試みました。人が監督した訓練では、非常に悪い結果がでています。また制御装置の出来も芳しくなく、正しい修正動作がとれるまでの収束速度も大変に遅いことが発見されました。このシステムを分析して、私共が結論としたのは、過渡応答の制御において人間は非常に予想しにくい態度を取るのだ、ということでした。

つまりプラントに何かが起こったとし、その場

FUZZY Control

E. H. Mamdani
Queen Mary & Westfield College

The Steam Engine Plant

FUZZY Control

E. H. Mamdani
Queen Mary & Westfield College

合そこに人が目標とする状態、つまり現在の状態から到達したいと考える圧力、速度値があるとします。その人はそれに到達するための正しい方針を持っていません。現在の状態から目標の状態に至るまでの計画をそう簡単には立てられません。その人はある修正動作を起こし、そしてその人は今後取るであろう間違っただ修正動作を正す自らの能力をあてにしているのです。ですから一般的に言う、最終状態の目標がはるかかけはなれているため、自分が到達したいと思う目標の状態に対してとった修正動作の結果を予測することができないのです。従ってこの人は間違いを犯します。そして間違っただ時に、良い修正動作と悪い修正動作の両方をプラントに教えてしまいますので、それにより制御装置に相反する修正動作を教えることとなります。ですから、制御装置はそうしたシステムからは学習できません。

これをもう少し分析します。あるプロセスが二つの隣り合った状態にある場合、その状態における正常な修正動作が A 1、人が取る正常な修正動作が A 2、そしてこれがプラントを目標の状態にするための理想的な修正動作であるとする、時として人は間違いを犯し、別の修正動作であり間違っただ修正動作である A 3 を取ります。そしてこの間違っただ修正動作を訂正するために、A 4 の修正動作を取ります。ですから制御装置が学習するのは A 1 でなければ A 3 でもなく、A 1 と A 3 のほぼ平均値をとったものと了解することとなります。この結果判明するのが、人による監視から学

ぼうとするのは、決してうまく行かないということなのです。

私共が制御結果を分析した際、人間は制御状況を分析し、プラントをどのように制御したらよいかについて有効な指示が出せる、ということも判明しました。私共がどのようにして制御すべきかを示し、機械がそこから学習する代わりに、その人が機械に何をすべきかを教えられるなら、その方がいいわけです。人間は自分の能力を単に誇示することしか思い付かないので、機械に対して自分の能力を誇示してみてもどうしようもないのですが、時として、機械に何をすべきかを教える方が簡単なことに気付くことがあります。

これが 1971 年のことであつたのを思い出して下さい。その時私共も学んでいたのです。この時点で機械に何をすべきかを教える体系を発見した人はいませんでした。この当時に議論されていたのは、学習制御装置や適応制御装置についてだったのです。私共は、機械に何をすべきかを言語的に伝える何らかの方法が必要であるとの結論に達したのです。

私はファジィ集合に関する文献のことは知っていましたが、ファジィ集合がこの種の仕事に関係するとは思っていませんでした。むしろかけ離れたものであると考えていたのです。そんな時、多分 71、72 年あたりの 5 月頃だったと思うのですが、その頃に発表されたロットベソティの論文を読んだのです。あるいは 74 年の会報の中だったかも知れませんが、「人とシステムとサイバーネティ

Estimated mathematical model of the Steam Engine

RESULTS WITH A BAYSEIAN CONTROLLER

The controller attempted to learn the probabilities of action given the state of the plant, based on the teacher's actions.

- With human supervised training very poor results are obtained
- The convergence of the controller is poor and the rate of convergence is unacceptably slow.

The reasons are:

- The human when controlling the transient response has a very unpredictable behaviour
- He cannot assess the results of his actions on the goals he wants to achieve.
- He therefore teaches conflicting actions to the controller

FUZZY Control

E. H. Mandani
Queen Mary & Westfield College

FUZZY Control

E. H. Mandani
Queen Mary & Westfield College

ックス」という論文は、これまでとはまったく違った形式で書かれていました。それにはファジィ集合をいかに扱うか、どのように If~then…形式のファジィ制御規則に書き直すか、ということについて分かりやすく書かれていたのです。ロットベソティはさらにその論文の中で車の駐車方法などの例を取り説明していました。これを読み、私共は制御装置に何をすべきか教えるのになぜこの方法を使わないのか、と思ったわけです。

2日かけて制御装置を設計し、完成させました。議論を重ねました。忘れもしないある金曜日、私とセトロシリアンはこれを試してみよう、と言ったのです。でもどのようにやればいいのか。私はファジィ集合や圧力誤差が正負で大きいといったことについて先ず討論することにしたわけです。プラスの方に大きいとかマイナスの方に大きいとかいった実例がこの日から来ていることがお分かりいただけるでしょう。これを基に1日ですべてを設計したのです。土曜日にセトロシリアンがプログラムを書きました。私は日曜日に研究所を訪ね、試運転を見ましたが、それがうまくいっていたのです。2日間で良い成果を挙げられたことをここで強調しておきたいと思います。期間がこのような短かったことは驚きであります。これがうまく作動したという事実は、私共を驚かせたのです。現在でもこれはファジィ制御における課題になっています。つまり試みた人々にとっても、うまくいったことを発見したのは、驚きだったのです。

しかし彼らは仲間の科学者たちとこの概念について意見交換をすることはできませんでした。これは、彼らが数学的に示された結果をむしろ見たいと考えているからなのです。とにかく、このファジィ制御装置によって規則に基づいたシステムが確立できたのだ、と言うことができます。これはごく初期の規則に基づいたシステムの一つでした。エキスパートシステムという言葉が一般的になる以前の単純なエキスパートシステムでした。最も驚いたことは、非常に短期間のうちに、デンマークのある研究者がこれを言語的制御に応用したのです。

これはたいへん興味深い話です。私はここにブリティッシュ・カウンシルの基金で来ています。ブリティッシュ・カウンシルは長期に渡ってこの種の講演旅行に資金援助を行っています。1973年にもその資金でデンマークに行き、デンマーク工科大学でファジィ制御の結果について講演を行いました。73年か74年のことだったと思いますが、聴衆の中に博士課程を終了したばかりで以前にセメント会社に勤めていた、大学院在学の研究者がいました。私の講演を聴き、彼は上司にセメント制御にこのファジィ制御が応用できるのではないかと進言したのです。驚いたことに上司は了承し、その考えを実行に移したのです。

これによってまた別の驚きが生まれたのです。つまりそれが最初の実用化になったということです。これはたぶん76年のことで、皆様もご存知のことと思います。すでに78年には実用化されていたはずで、それ以後はすべての活動が静かにな

Problems encountered with human supervised learning

The human can analyse the control situation and provide useful instructions on how to control a plant

He only finds it difficult to demonstrate his competence faultlessly

We concluded that

the real obstacle is not having the means for a linguistic communication between man and machine

Zadeh's papers provided us with the answers we were looking for.

The fuzzy logic controller only took 2 days to implement and its good performance "surprised" us.

ったのです。その後日本においてあらゆる技術が復活して来るまで、大きな応用事例はさほど多くありませんでした。東京工業大学の人たちによって、その当時、ファジィ技術を産業に応用しようというハプニングが起きました。この時ヨーロッパではあまりたくさんの研究はなされていませんでした。

どうしてデンマークの科学者であるその PhD 学生が、ファジィ制御をセメントキルンに応用しようとしたのでしょうか。それはスチームエンジン制御に使用した規則が応用できたからです。彼には周りの仲間から読んだ方がいいという本が与えられていました。仲間から見れば彼は出たばかりだから、セメントキルンがどのように制御されているかが書かれている本を見せてあげよう、ということだったのです。それはオペレータ訓練マニュアルでした。訓練マニュアルの中には規則がありました。これは自動化されたセメントキルン用のものではなく、セメントキルンを制御する若い新人向けの簡単な訓練書だったのです。彼は規則が非常によく似ているように見えると言い、それを応用させましたが、それには時間がかかりました。でもうまくいったのです。

ここに私共の言いたいことがあるのです。これをどのように説明するかについては、充分注意しなければなりません。先ず第一に言えることは、数式でモデル化できない複雑なシステムでも、どうやってそれを制御するのが解っている専門家がいたら、制御できるということです。それを制御できる人々を専門家というわけで、制御のための規則を書くことができるなら、制御はできるのです。つまり、とにかくここで機能しているものは、ルールベース・システムであるということ

With the fuzzy controller we had built a simple expert system before that terminology was invented.

Within a very short period after our research a young graduate in Denmark joining his first company (Cement Kiln Company) had commercially exploited the technique.

す。これは自動制御に応用することができます。

二点目は、これは第一番目に来ることではなく、あくまでも第二点目となることですが、ユーザーが自分で動作するのだということに気が付く点です。私はこれを解析することによって、ルールベースがルールベース・システムの効率をより良く示すばかりでなく、ファジィ集合の効率についての良い例証も提供してくれる、と個人的に考えています。どこからファジィ集合がここに入ってきたのでしょうか。ファジィ集合の利点は何なのでしょう。言い古された表現で、ほとんどの人がご存知だとは思いますが説明しましょう。わかりやすくするために、二つのファジィ集合によって説明される状態空間があったとします。状態空間におけるファジィ領域を A と B で表し、もしあなたがやっていることが端的に言ってもし A であって B であるならば、あなたはファジィ集合を用いていることになります。ファジィ集合により状態空間を効果的に量子化しているのです。というのはごくわずかの規則によって状態空間を表現することができるように状態空間を量子化しているからです。第二点目に、この量子化はばらばらにできないので、隣合う二つの状態空間は重なっています。隣合った二つの状態の間に重なった領域があり、同様にこの状態のまわりにも他の状態と重なった部分があります。

修正動作を取ると決めた時、その修正動作に直接関連した量子化された領域に関係のある修正動作ばかりでなく、修正動作に寄与している点を受け持っているそれぞれの量子化された領域も関係

An example of linguistic instruction

From an experienced cement kiln controller to an apprentice:

- "1. When the burning zone temperature is drastically low:
 - (a) reduce kiln speed;
 - (b) reduce fuel.
2. When the burning zone temperature is slightly low:
 - (a) increase I.D. fan speed
 - (b) increase fuel rate"

The steam engine control rule examples:

"If the pressure error is positive big and the change in pressure error is not negative medium
Then make the heat change negative big"

してきます。このため非常に荒っぽく量子化したにもかかわらず、よりスムーズな制御が得られるのです。

例えば7段階のファジィ集合があるとして、正に大きい、正で中ぐらい、正に小さい、零、負に小さい、負で中ぐらい、負に大きい、とします。すなわち、7領域あることになります。従って 7×7 の状態空間があることになりますが、実際には 7×7 ではないのです。といいますのは、あなたが問題にしている大多数の点が重なっているからです。これが利用する時の利点となっています。

残念なことにこの概念は、大多数の標準的制御技術者を納得させるには至りませんでした。私共はルールベース・システムの使用について制御技術者たちを納得させなければなりませんでした。彼らはルールベース・システムを使ったことがなかったのです。彼らは常に数学的制御装置を使っていました。この次には、ファジィ集合の使用についても納得させなければならなかったのです。制御技術者たちはどうしてファジィ集合を使うのか、それは単なるからくり過ぎないのではないかと言うのです。遊びのためにただそれを使っているだけだろうと言ったのです。それはとんでもないことで、大変にしっかりとした理由があり、ファジィ集合を使うことによって非常に大きな効果が上げられるからだと説明したのです。残念ながら彼らを説得することはできませんでした。ということがこれまでのいきさつです。その後、私共は研究を続け、一部分の人達からは支持されましたが、産業への実際の応用はありませんでした。

現在、本当にたくさんの研究がヨーロッパで行われています。制御技術者たちの何人かが、興味を示すようになっていきます。ヨーロッパにおける制御技術者による立派な業績のうちいくつかは、ゲルトにおけるファノルタ・レムケ教授と彼の学生たちによって行われた研究で、大変に興味深いものでした。彼らは、コンピュータ・エンジニアである私と違って、生粋の制御技術者たちでした。これからお見せするスライドはそのレムケ教授からのものです。

彼の言わんとするところは、実際にファジィ制御応用の大多数が、閉ループまたは非常に単純な開ループだということです。ファジィ制御を応用しているといっているほとんどの場合、その人はこれ、あるいはこの非常に単純なルールベース制御装置を適用しているということを言っているのです。あなた自身がそれを書いて、応用します。これは非常に効果的で、大変にうまくいきます。レムケ博士は、他のあらゆる種類の体系にもあてはめることができると言っています。例えば、制御装置自体が常にファジィ制御である必要はなく、PID制御装置で充分なシステムでも、その上にファジィスーパーバイザーを置くことによって類似の全体システムにすることができます。そうすれば、ファジィ制御を実行するためのファジィ規則を書くことが出来るのです。あるいはそれ以上に似たこともできます。実際にファジィな挙動を示す対象があって、それは計測されていて、それにファジィスーパーバイザーがあるとしますと、似たような制御が出て来て、ファジィスーパーバイ

ザーが働いて、ファジィな挙動が変わってまいります。

ほとんどの制御技術者がファジィ制御を好まない、という理由が安定性の問題にあることにお気付きのことと思います。どうやって安定性を確認するのかと彼らはいつも尋ねます。なぜこういう質問をするのか私には解りません。ある安定しにくいシステムがあったとして、そのプロセスに実際に制御装置を据え付ける前に、その制御装置が効果的に作動することを確認したい、そうすればそのシステムが安定であるということは保証できるという事実から、安定性に興味を持たれるのでしょう。安定性を証明する最善の方法は、全体を数学的に表現することであり、安定性のあることが数式で証明されれば、安定性の数学的保証が得られたことになります。残念ながら、数学的証明が安定性を示すほとんど唯一の手段なのですが、実際にはそんな事例はありません。というのは、どんなプロセスに対しても制御装置に任せる場合、あなたがしたいことを明確にしなければなりません。保証しなければならないものが何であるか、仕様はどんなものか、どんなふうに制御したいのかということについてです。産業的見地から実際に考えると、あなたが確認したいと望んでいることは、安全性の分析ではなく、それも一つには違いありませんが、仕様書に書き出されている基準に見合っているかどうかといった製品保証なので

す。そしてほとんどの場合、こうした基準は性能基準であり、文章で表現されています。例えば、立上りの時間はこれこれしかじかのようにする、オーバーシュートはこれこれ、アンダーシュートはこうこうする、というように表現されています。一度文章で評価基準を表すと、性能評価基準の言語的表現と制御装置自体の性能がうまく一致するのです。そしてその間にお互いにフィードバックすることもできるのです。

安定性の問題についてここでふれなければなりません。安定性の問題がヨーロッパにおいてファジィ制御に出資をしぶる一つの理由となっているからです。私がヨーロッパに戻った時にはどうなっているでしょうね。その人達の安定性に関する数学的論理のほとんどがおとなしい動作をするシステムである線形または若干の非線形の対象に対してだけ実際に意味をもっているということは、注目に値します。こうした論理は、線形でない、老化していくものとか、何かに非対称性のあるようなシステムについては意味がありません。こういったものについては数学的解析をしようにもできなかったからです。ですから本当にしなくてはならないことは、容認された評価基準で性能を表現することなのです。そうすれば、ファジィ論理の制御装置を採用したとしても、容認された性能評価基準を満たしているかどうか解ります。

さて、研究していたこうした概念全てを諦めて

FUZZY Control

E. H. Mandani
Queen Mary & Westfield College

Fuzzy Supervisory Control

FUZZY Control

E. H. Mandani
Queen Mary & Westfield College

しまう前に、興味を引く話をしましょう。制御に関する研究をしていた時、私共はルールベース制御の研究を行いました。ルールベース制御を見る時、それが開ループ制御装置であろうと閉ループ制御であろうと、ほとんどの規則が人間の経験、それも熟練オペレータの経験から来ていることがわかりました。人工知能という面からみると、浅い知識を持つものと思われるかも知れません。あ

る意味でそれは、プラントに関して十分に理解していないオペレータが持つ知識のことにになります。一方オペレータは専門家です。にもかかわらず、オペレータはいかにプラントが稼働するかについては話しません。そこなのです。私共は深い洞察力を備えた AI(人工知能)システムについても興味を持っていましたし、いくつかのそれに関するプロジェクトもありました。 (次号に続く)