

13. シールド総合管理システムの開発

村上 譲二

要 旨

近年、シールド工事の自動化・ロボット化にはめざましいものがみられるが、当社においても今回、これまで熟練したオペレータ・技術者によって行われていた掘進管理業務に代わるシールド総合管理システムを開発したので、そのシステムの概要と特徴について報告する。

キーワード

シールド／施工管理／自動掘進／ファジィ制御

目 次

1. はじめに
2. システムの概要
3. 自動掘進システムフロー
4. ファジィ推論法
5. あとがき

13. DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED OPERATING SYSTEM FOR SHIELD TUNNELING

Joji Murakami

Abstract

In recent years, outstanding developments have been made in automation and robotization of shield tunneling works. This paper reports the development of an integrated operating system for shield tunneling that until now was managed by experienced operators and technicians.

1. はじめに

近年、建設現場においては労働力が不足し、熟練技能者の不足や作業員の高齢化により、また危険・苦渋作業などによる作業環境の悪化により作業管理を自動化、省力化しようという風潮が強まってきている。

シールド工事もその例外ではない。この工法は、定められた空間内での類型的な繰り返し作業であるため、土木分野では機械化・自動化を図るための代表的な工事とみなされているが、未だに人間の能力に依存する部分が多く残されており、切羽土圧制御、方向制御等の掘進管理が熟練オペレータや技術者の勘により、行われているのが現状である。これは、シールド工事が、挙動を把握するのが困難な地盤を対象としているため、制御系全体が非線形なものとなり、従来の制御方法によっていたのでは自動化が困難であったからである。

このような非線形な制御系を簡単に扱う手法として、近年ファジィ理論を用いた制御方法が注目されるようになり、既に数社で、ファジィ制御を用いた掘進管理システムが開発され、良好な実証実験結果が報告されている。しかし、未だに実用性や使用勝手の点で難点があり、普及していないのが実状である。

今回、開発したシールド総合管理システムで採用しているファジィ制御は、新しい推論法を用いて土質などによって掘削条件が著しく変わった時にも掘削しながら即座に対応でき、また現場での微妙なチューニングも簡単に行うことのできる、またあらゆるシールドマシンに対しても使用できるように構築したものである。以下に、本システムの概要と特徴について述べる、

2. システムの概要

本システムは、①掘進管理システム②自動測量システム③自動方向制御システム④切羽土圧自動制御システムの4つのサブシステムで構成されている。

シールド機の掘進状況の監視、データ管理、掘進方向制御及び切羽土圧制御等、従来、熟練オペレータが行っていたシールド機の掘進開始から終了までの運転操作をすべて自動化しようとするものである。

本システムの構成は、各サブシステムがパソコンでそれぞれ独立されており、RS-485通信により各システム間のデータ転送を行う。

シールド機からの自動掘進に関するデータは、リアルタイムで、多重伝送装置によって転送する。

システムの全体概要図を図-1に示す。

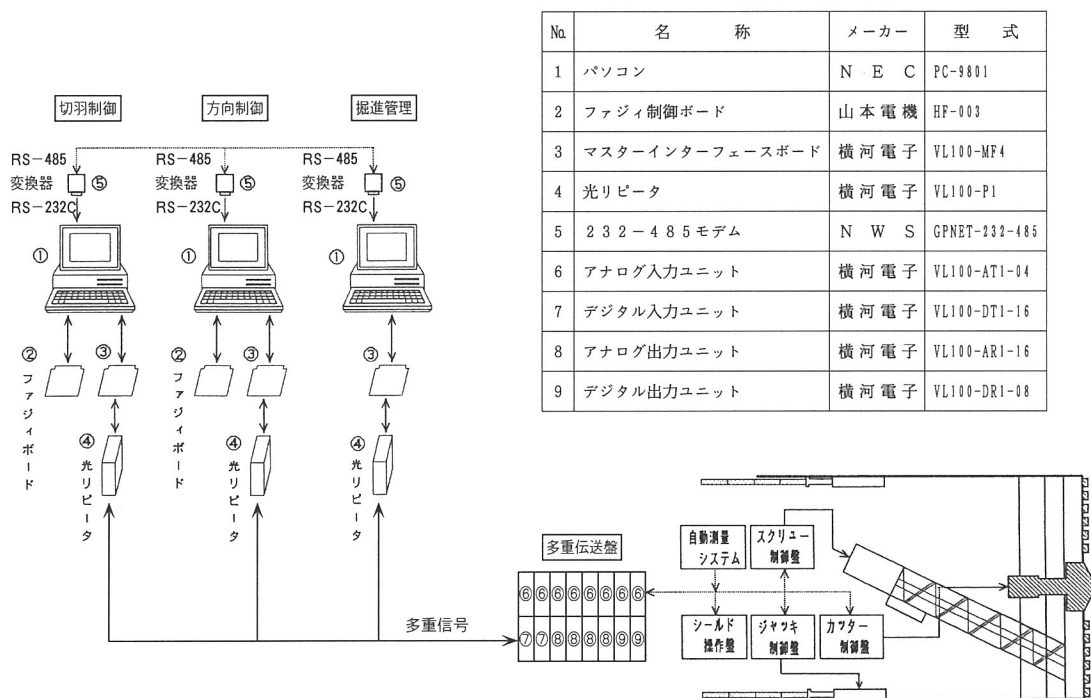


図-1 システム全体概要図

①掘進管理システム

掘進機に作動している諸機器のデータをシステム内に取り込み、作動状況、作動値をシステムの画面上でリアルタイムに表示する。システム画面例を図-2に示す。また、各装置の状態を正常値と比較することにより、異常発生を監視する。装置のトラブルや異常が発生した場合には、異常を画面上に表示し、警報をだして作業員に知らせ、適切な処置を行う。なお、各リングの掘進データがディスクに保管され、後処理として各種管理図、管理表、及び日報等が自動的に作成される。

②自動測量システム

本自動測量システムは、計測ロボットによる自動トラバース測量システムである。この計測ロボットは、

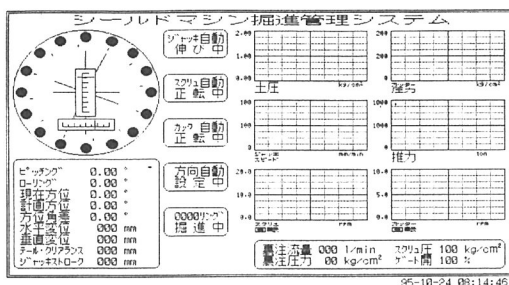


図-2 システム画面例

自動追尾式トータルステーションを走行台車に搭載したものであり、自動で走行、停止、測量などを行うことができる。

原理は、あらかじめ測量してある2点以上の基準点プリズムを視準することで、計測ロボットの位置を演算によって求めた後、坑内に取り付けた盛替え点プリズムを視準し、そのプリズム位置の座標を求める。この動作を終了すると移動し、新しく座標が求められた2点以上のプリズムにより再び計測ロボット自身の位置を決定する。この動作を繰り返し、最後に掘進機に設置したプリズムを視準し、その位置座標を求める。

このシステム概要図を図-3に示す。

掘進中のリアルタイム計測に関しては、掘進機にジャイロコンパスを搭載し、ジャッキストローク計の移動量情報と併せて掘進機の現在位置姿勢を算定する。

位置の算出は、掘進距離と姿勢角（方位）から演算して求める。下図において、既知点 I_1 より θ_1 の方向に微小距離 ΔL だけ掘進したとすると、演算により I_2 の座標が求められる。同様に順次 I_3 、 I_4 …… I_N 点の座標を求める。

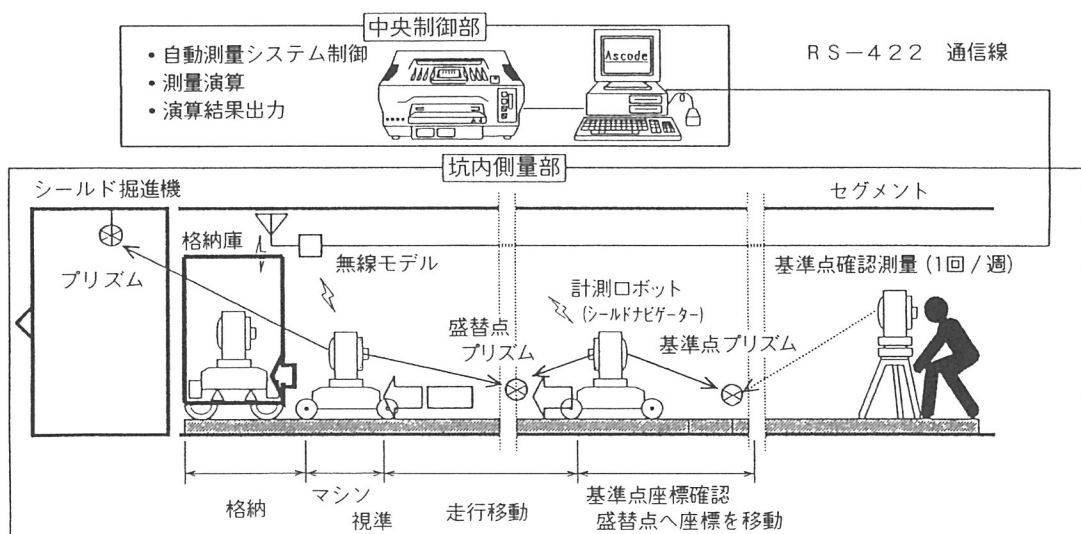
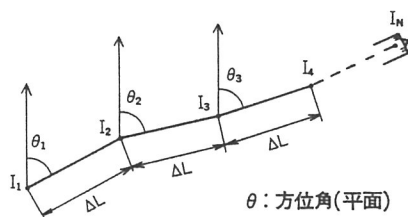


図-3 シールド自動測量システム概要図

③自動方向制御システム

本サブシステムは自動測量システムによって得られたデータに基づいて、与えられた計画路線にのるように、自動的にジャッキを選択し、掘進を行うシステムである。

制御アルゴリズムとしては、図-4に示すようにシールド機の水平、上下方向の蛇行量・蛇行変化量及び計画線形に対するシールド機のずれ角・ずれ角変化量を入力変数として、第1段階のファジィ推論によって、水平・上下方向の必要な修正量（片押し度）を求める。

第1段階のファジィ推論から得られた片押し度を新しい入力変数として、第2段階ファジィ推論により、現在の必要なジャッキパターンを決定する。

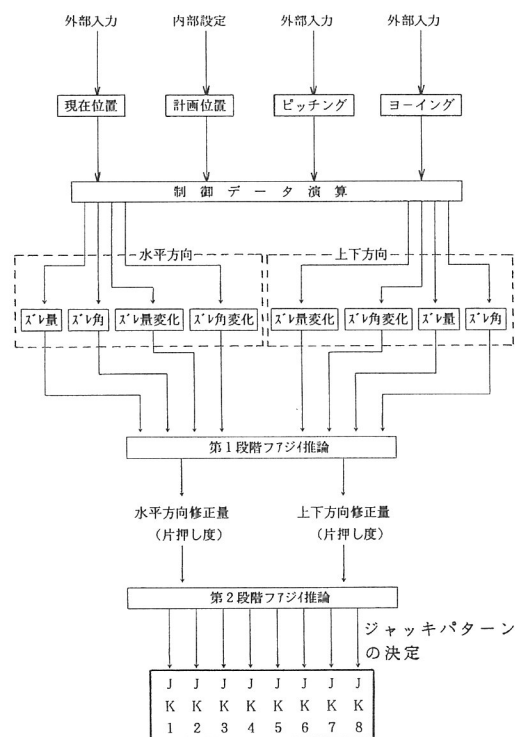


図-4 自動方向制御演算構成図

④切羽土圧自動制御システム

本サブシステムは、多重転送装置VITTY-LINERにより、シールド機掘進開始信号を受け、自動的にシールド機の掘進を開始させ、ストップ信号を受けるまで、切羽の安定を図りながら、スクリュー回転数、ジャッキスピードを自動コントロールするシステムである。尚、このシステムは、二つの制御ブロック（掘進速度と切羽土圧）で構成され、この二つの制御ブロックが並列に、ファジィ演算を行う。

切羽土圧制御演算構成図を図-5に示す。

(1) 掘進速度制御ブロック

シールド機のジャッキ速度、カッタートルク及び推力のセンサー情報に基づき、ファジィ推論によって、ジャッキ速度をコントロールする。

(2) 切羽土圧制御ブロック

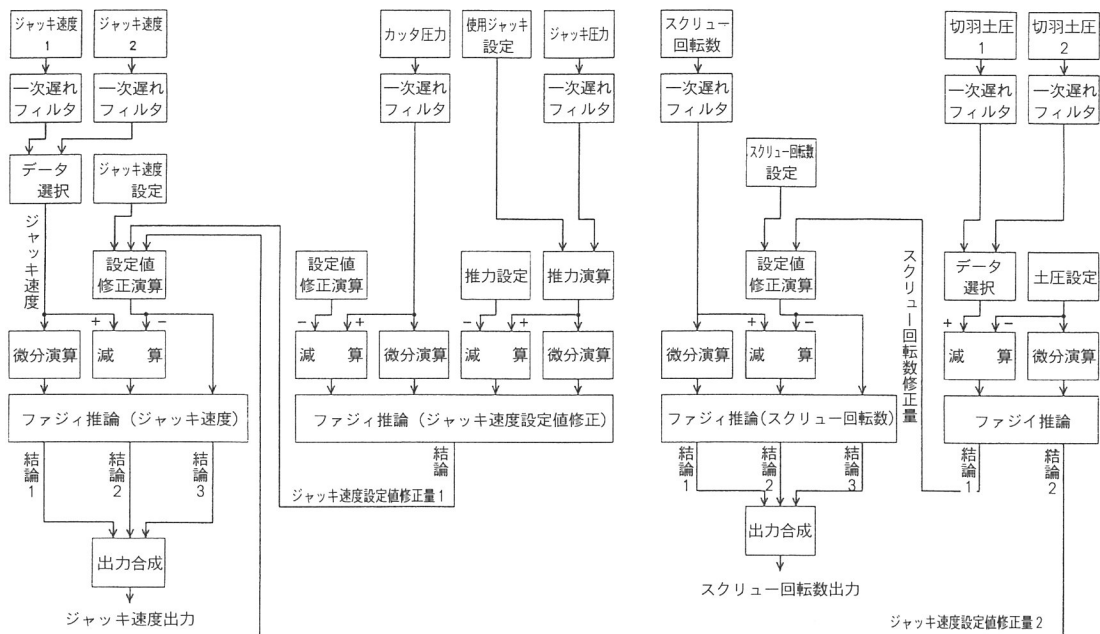
シールド機チャンバー内土圧及びスクリューコンベアの回転数を入力変数とし、ファジィ推論によりスクリュー回転数を調整することによって、チャンバー内土圧を設定された土圧にコントロールする。

(3) 掘進速度制御と切羽土圧制御との関係

スクリュー回転数調整のみで、土圧制御ができない場合、ファジィ推論によって、ジャッキ速度の設定値を自動的に修正する。

今回、開発したファジィ制御システム（切羽土圧制御、方向制御）の特徴として

- (1) 位置型制御^{*1}＋速度型制御^{*2}を採用しているので現場での微妙なチューニングが容易である。
- (2) エミュレーション画面でリアルタイムに入出力を監視出来、異常動作などが発見されたら、シミュレーション画面へ転送し、ファジィルールとの関係を時系列的に確認することが出来るので、ファジィルールの修正が容易である。
- (3) ファジィルール群を最大10個使用出来るので、土質など掘削条件が著しく変わった時などは、ルール群を切り替えながらの掘削が可能である。
- (4) ファジィ推論方法に代数積－加算－重心法をさらに進化させた推論法（ファジィシングルトン型推論法）を使っているので、出力ゲインの調整が簡単におこなえる。
- (5) 汎用性があるので、入出力信号を統一すればどのマシンにも使用できる。



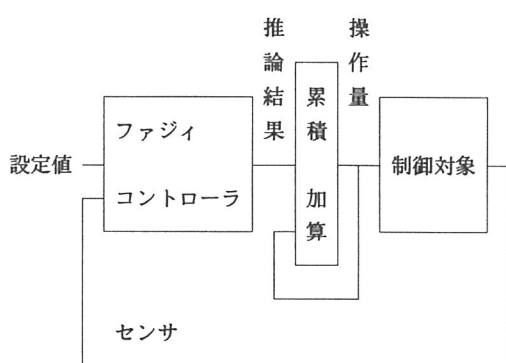
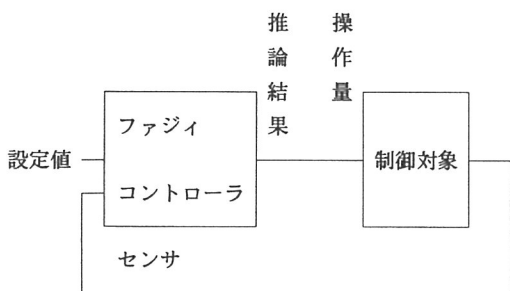
図－5 切羽土圧制御演算構成図

* 1 位置型制御

制御装置の出力を、対象の操作部の動作範囲内の絶対値とする方式。
対象との関係が明確なので理解しやすい。

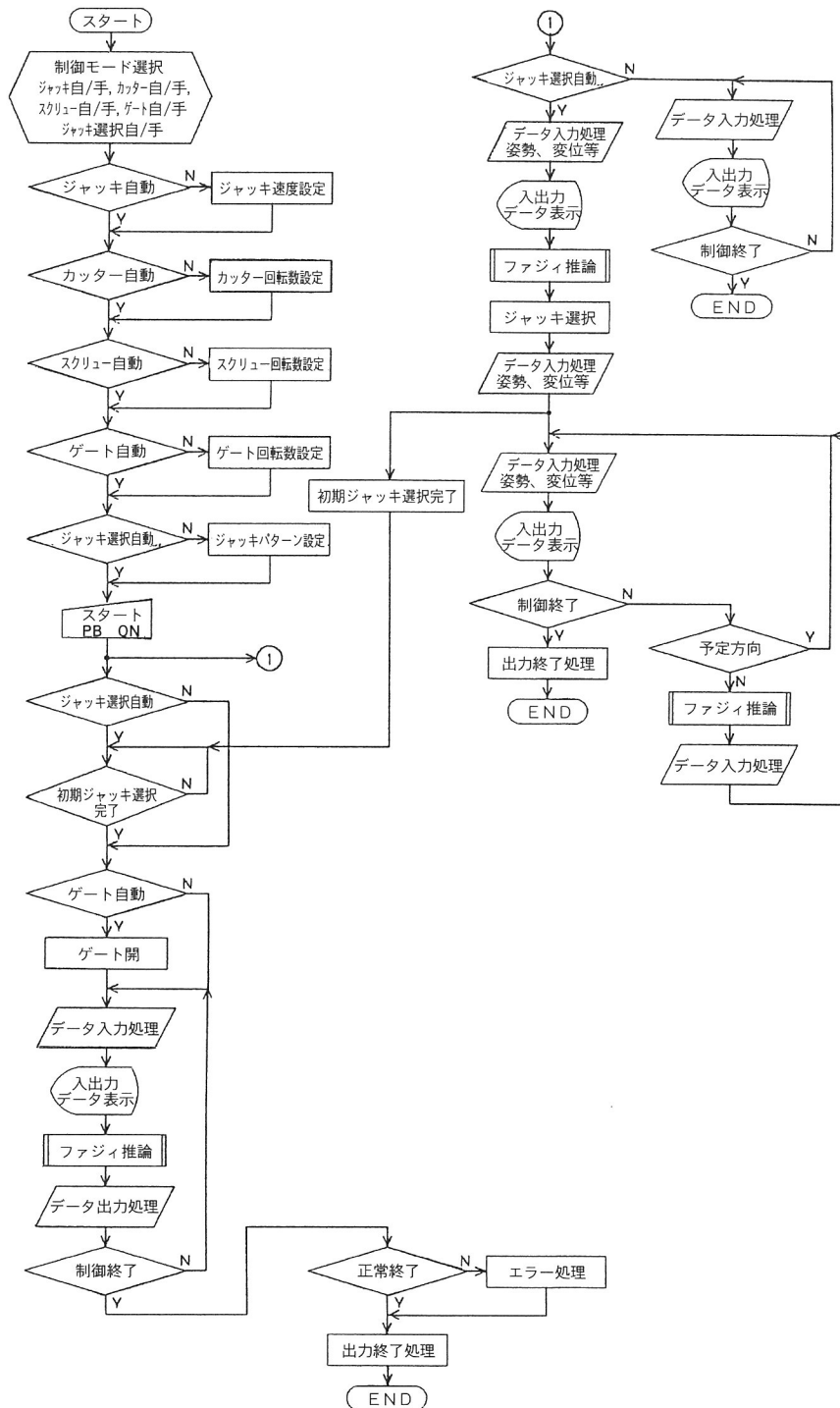
* 2 速度型制御

制御装置の出力を、対象の操作部の変動量とする方式。
前回の値からの変化分を与えるだけなので、計算が簡単であり、多数の演算結果を加え合わせ易く異常時に操作部の位置が保持される。



3. 自動掘進システムフロー

図－6 に本自動掘進システムの概略フローを示す。



図－6 システムフロー図

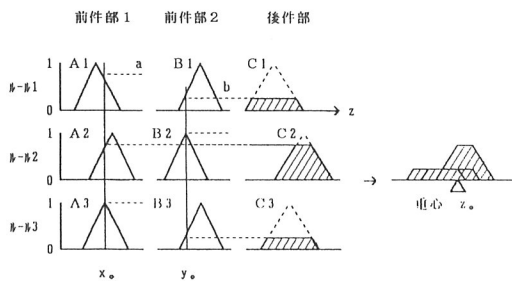
4. ファジィ推論法

(1) min-max-重心法

マムダニの提案によるファジィ推論法でハードウェア構成が簡単のため、ファジィ制御法としてよく使われており、他社のファジィ制御用ソフトウェアツールやハードウェアの大半がこの推論法を採用している。

しかし、この推論法は推論過程で直感に合わない場合が多く、また推論結果の解析も非常に困難である。

下図に示す通り、max法の使用により、本来有効な推論結果が無視されたり、ファジィの特徴である多入力情報がmin法を使用するためミニマム値を決定させる入力のみが有効となり、他の入力情報が意味を持たなくなるため、結果として制御感度が悪くなったり、入出力の関係がminとmaxという非線形性の強い演算を使用するため、ファジィルールのチューニングを困難にさせる結果となっている。



$\mu_{\#1}: A1 \text{ and } B1 \rightarrow C1$
 $\mu_{\#2}: A2 \text{ and } B2 \rightarrow C2$
 $\dots$
 $\mu_{\#n}: An \text{ and } Bn \rightarrow Cn$
 事実 $x_0 \text{ and } y_0$
 結論 C'

$$\mu_{Ci}(z) = \mu_{Ai}(x_0) \wedge \mu_{Bi}(y_0) \wedge \mu_{Ci}(z)$$

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C1'}(z) \vee \dots \vee \mu_{Cn'}(z)$$

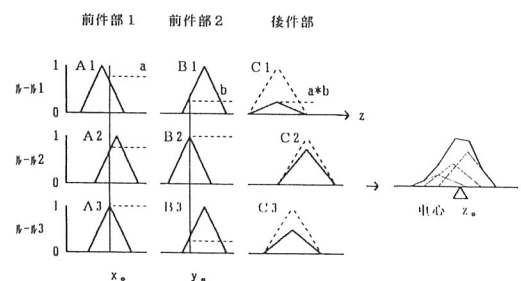
$$z_0 = \frac{\sum z \cdot \mu_{C'}(z)}{\sum \mu_{C'}(z)}$$

$$\wedge = \min \quad \vee = \max$$

(2) 代数積-加算-重心法

min-max-重心法の持つ不合理性を改善する方法として提案された推論法である。

minを代数積に、maxを加算に置き換えたもので、minを代数積に置き換える事によりファジィの特徴である他入力の情報変化が全て有効に機能し、min-max法のように入力情報が無視されることがない。また、maxを加算に置き換えることにより、後件部が無視されることはなく、直感に合った推論結果が得られることになる。その上、加算法の使用はmax法とは異なり、入出力の関係に線形性が得られる点においても優れており、max法では不可能な、同じルールの複数回の使用も可能となりルールに強調効果を持たせることができる。同一ルールの複数回使用で入出力の線形性を非線形性にすることも可能になる。



$\mu_{\#1}: A1 \text{ and } B1 \rightarrow C1$
 $\mu_{\#2}: A2 \text{ and } B2 \rightarrow C2$
 $\dots$
 $\mu_{\#n}: An \text{ and } Bn \rightarrow Cn$
 事実 $x_0 \text{ and } y_0$
 結論 C'

$$\mu_{Ci}(z) = \mu_{Ai}(x_0) \cdot \mu_{Bi}(y_0) \cdot \mu_{Ci}(z)$$

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C1'}(z) + \dots + \mu_{Cn'}(z)$$

$$z_0 = \frac{\sum z \cdot \mu_{C'}(z)}{\sum \mu_{C'}(z)}$$

(3) ファジィシングルトン型推論法

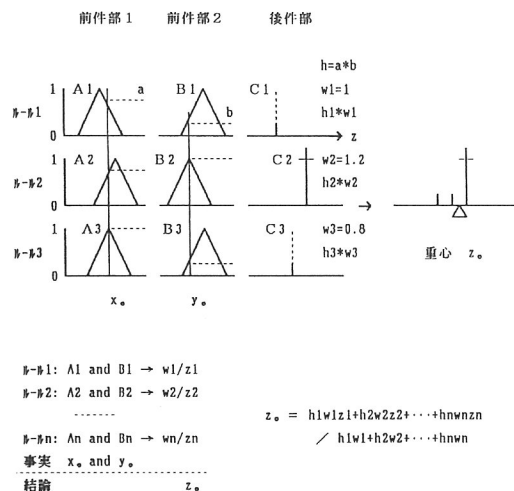
前述の代数積－加算－重心法には、同じファジィルールを複数回使用し、そのルールに強調効果を持たせる特徴があるが、 n 倍の強調効果をもたらすには n 回同じルールを使用する必要がある。これを避けるには後件部の高さを 1 でなく最初から n にしておけばよいことになる。

下図の記号の w/z の意味は、 w の重みを持つ後件部重心位置 z のメンバーシップ関数であり、この場合の後件部形状は図の通り棒状のファジィシングルトンが使用される。

ルール毎の後外部形状は本来任意の形状でも良く、その重心位置を z で表現しその面積（重み）を w で表現したのと同じ事になり、また前件部のメンバーシップ関数の高さ（グレード）は通常 1 だが、後件部重みを予め 2 倍にしておけば、前件部高さが 2 であると同じ扱いになる。

このように後件部の重みにあらゆる情報を含ませる事が出来、ファジィルールの微妙な調整が可能なファジィ制御法が、ファジィシングルトン型推論法である。

そこで本シールド総合管理システムでは、このファジィシングルトン型推論法を採用している。



5. あとがき

以上、本シールド総合管理システムの概略ならびに特徴について述べた。

現在はシステムの基本的な動作をダミー・データのファイルを作成してシミュレーションを行い確認している段階であるが、何ら問題無く完成できるものと考えている。

今後、実際のシールド工事現場にこの総合管理システムを導入し、

- ①各システムの作動と機能のチェック
- ②制御に必要な掘進データの収集と解析
- ③オペレータからのヒアリング
- ④人力操作による掘削と自動掘進との比較
- ⑤システムの操作性のチェック

などを行い、実用化に向けての準備を進めていく予定である。

尚、この総合管理システムの中の自動測量システムについては、測量や建設工事の自動化技術の研究開発を目的として設立された自動測量研究会（アスコード）において、ゼネコン 13 社が共同して開発したものである。