

30. ニューラルネットとファジーによる 流体輸送式TBMの自動運転

(株)大林組：*風間 慶三・早淵敬太郎
川崎重工業(株)：豊田 正治・庵原 滋

1. はじめに

小口径断面のトンネル掘削では、熟練労働者不足、狭隘な場所での労働者の解放等が問題となっている。特にTBMによる掘削はオペレータの技量により、掘削精度、掘進速度等が左右され、良質なオペレータの確保が重要となる。

近年、シールド機においては、自動運転が可能となっているが、TBM工法においては、掘削機が3胴に分割されており、方向制御に係わるツール（方向制御ジャッキ・フロントグリッパ・メイングリッパ・スラストジャッキ）が多く、また土質による影響を受け易く、制御が困難であった。

このたび、測量システムからの情報をニューラルネットワークおよびファジー理論を用いて、使用ツールの選択、および制御量を演算処理し、制御する事により、熟練オペレータと同等の自動掘削が可能なTBM自動運転システムを開発し、西宮市の下水道工事に適用したので報告する。

また、同時に掘削土の流体輸送システムも自動化し坑内での運転に係わる作業を無人化した。

2. 工事概要

武庫川上流処理場（神戸市北区道場町）から武庫川下流処理場（尼崎市武庫川河口）まで汚泥を送るための管路布設工事である。このうち自動化を実現した工区は、(財)日本下水道事業団の発注である西宮市塩瀬町名塩から武庫川上流処理場までの延長4,230mのトンネル築造工であり、径2.0mの流体輸送式TBM工法で施工する。

図-1は、当工事に使用したTBMの構造図である。

なお、地質は中世代に、いわゆる火砕流により形成された有馬層群の溶結凝灰岩である。

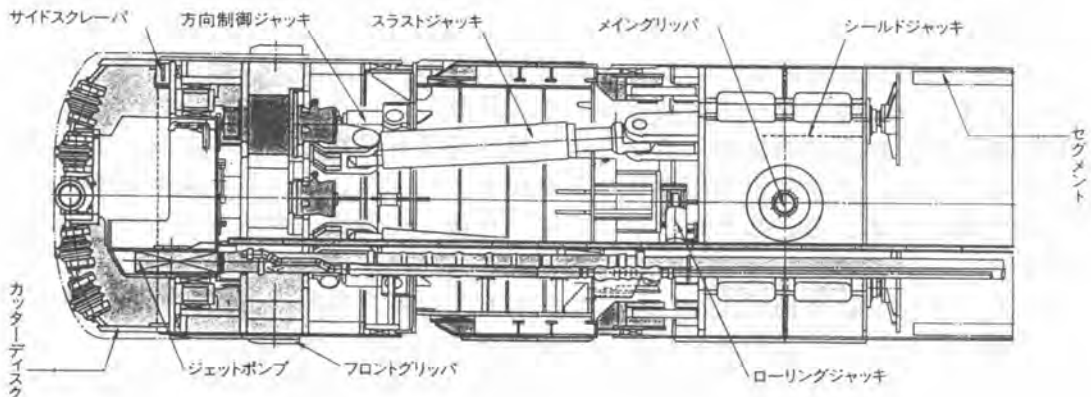


図-1 流体輸送式TBM構造図

3. システムの概要

本システムは、自動測量管理システム、自動方向制御システム、および流体輸送システムより構成されている。

自動測量管理システムは、ジャイロスコープ、レベル計およびマシンに装備された各種ジャッキのストローク、カッターの圧力等の情報をコンピューター（YEWMAC）で演算処理し、前ストロークの掘削情報および次ストロークの目標方位を自動方向制御システムに出力する。

これらの情報を受けて自動方向制御システムでは、ニューラルネットワークにより使用するアクチュエータを選定およびファジィ理論により制御量をコンピューター（FC-9801）で演算し、最適な掘削方法でマシンを自動コントロールする。

流体輸送システムは、マシンの運転状況を常に監視し、送排泥流量及び各種バルブの切換え等を全自動で行うものである。

ハードウェアの構成は、図-2に示すように、地上の中央管理室に地上運転盤および中央監視盤、坑内に坑内運転盤が装備されており、それぞれ光ケーブルで接続し、制御情報の送受信を行っている。

地上運転盤では、掘進管理用と方向制御用に、2台のコンピューター（YEWMAC、FC9801）と、No.1PLC（シーケンス制御装置 MELSEC）により、TBMの自動運転と流体輸送に関する情報処理、制御指令および監視をおこなう。一方、中央監視盤では、No.2PLCにより流体輸送の制御を行い、坑内運転盤では、No.3PLCにより各種センサーからの情報収集および手動時の運転操作を行う。

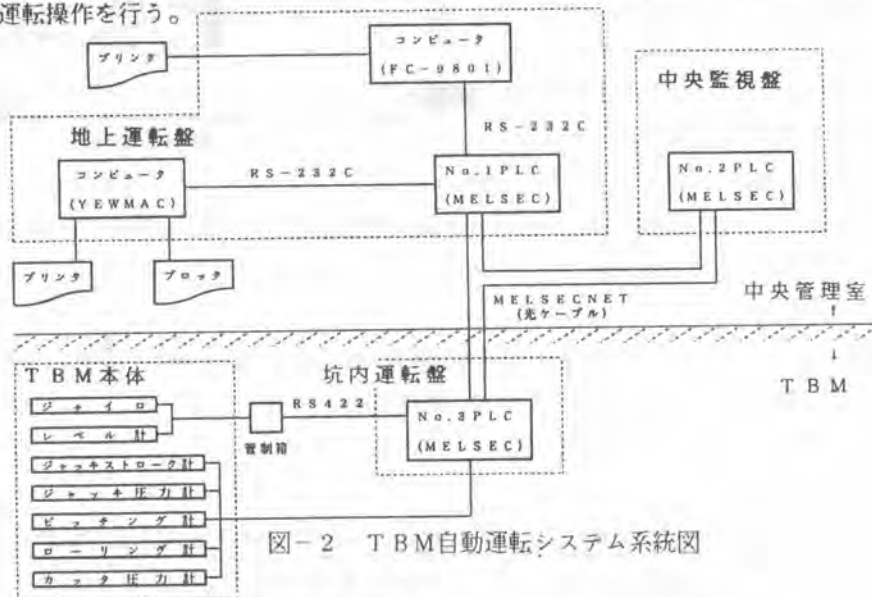


図-2 TBM自動運転システム系統図

各制御機器の機能分担は以下の通りである。

- ・ YEWMAC : TBM位置情報処理、掘進方位の決定、運転状態の表示
- ・ FC9801 : 掘進モードの選定、方向制御量の決定、レベル調整、工程と機器状態表示
- ・ MELSEC : TBMと流体輸送の自動運転制御、掘進速度の調整、警報に対する自動処理、運転開始と終了指令、各機器間の情報の送受信

4. システムの特徴

TBMによるトンネル掘削は、予め決められた計画線に沿って、より正確に効率よく行われなければならない。しかし、掘削対象地盤が均一であることは稀であり、またTBM自身にも機械の癖がある。加えて、方向制御に関わる手段としては、フロントグリッパ、方向制御ジャッキおよびメイングリッパと多く、いわゆるフィードバック制御のみでは制御が困難である。

そこで、過去2現場で収集した掘削データの解析結果と、熟練オペレーターのヒヤリングによる情報から、運転操作の規則性を見だし、ニューラルネットワークおよびファジィ理論を採用し、熟練オペレーターと同等のTBMの運転操作を可能にした。

次に、本システムの特徴であるニューラルネットワークおよびファジィ理論を用いた制御について概要を記す。

(1) ニューラルネットワークによる掘進モードの選択

ニューラルネットワークとは、生体の神経回路、神経細胞の機能をモデル化した工学的な演算回路である。その特徴としては、機械自身を与えられたデータをもとに、設定された条件の中で、考え得る最適の答を選択する方式であるつまり、この能力は、パターン認識、予測判断等の問題解決に適していると言える。これをTBMに応用した場合、掘進状況の変化に対し、選択が必要なフロントグリッパ、方向制御ジャッキ等、どのジャッキ操作を組み合わせ運転すれば良いのか、表-1のように5つのモードに分類した。

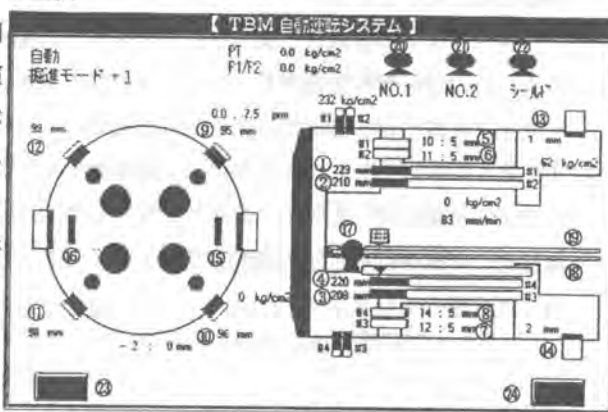


図-3 掘進管理画面

ニューラルネットワークの教師信号（入力信号に対する理想出力）は、過去2現場で収集した掘削データを解析し、結果のよいものを厳選して、次の項目を入力した。

- ①前ストロークの掘進モード --- 5種類（表-1）
- ②方向変更量差 --- （今回の掘削開始時の方位偏差）-（前回の掘削開始時の方位偏差）
- ③前ストロークの掘進結果 --- 曲げ過ぎ、良好、曲げ不足
- ④現ストロークの掘進モード --- 5種類（表-1）

表-1 掘進モード表（モード番号が大きくなるほど、前胴と後胴の折れの角度を大きく制御できる）

モード No	フロントグリッパ	方向制御ジャッキ	スラストジャッキ(1本当たりの圧力)	メイングリッパ
0	操作	操作しない	4本(125kg/cm ²)	操作しない
1	操作	操作	4本(125kg/cm ²)	操作しない
2	操作	操作	2本(250kg/cm ²) + 2本(125kg/cm ²)	操作しない
3	操作	操作	2本(250kg/cm ²)	操作しない
4	操作	操作	2本(250kg/cm ²)	操作

前ストロークの運転状況から、次のストロークの運転モードを決定する。なお、決定にあたり必要な項目としては、前ストロークの掘進モード、方向変更量差および掘進結果があり、過去のオペレータの操作結果をもとに、総合的に判断して、次の掘進モードを決定する。

当工区においては、過去2現場と掘削地盤が異なるので、過去の教師信号をそのまま当てはめることは危険である。そこで、自動運転を行いながら、掘削データの中から掘進結果のよいものを厳選し、コンピューターに入力して学習させ、より確度の高いものになっている。

(2) ファジイ理論によるジャッキの制御量の決定

ファジイ理論は、人間の定性的な考え方、すなわち、数値的に表現が難しい「〇〇ぐらい」といった、あいまいな考えを定量化する理論である。例えば、人間によって機械を操作する場合、「制御すべき値が少し大きくなる傾向にあるから、操作すべき値を少し増す」というようなファジイ的な考えに基づくことが多い。TBMの場合で考えると、方向制御において、フロントグリッパを方向修正の微調整に使用しているが、このときの操作の考え方がファジイ的であるので、ファジイ制御に適しているといえる。

ニューラルネットワークにより選択されたジャッキの操作量は、次のように定める。

掘進前には、掘進モードによって選定されたジャッキの操作量を、ファジイ理論により演算し、制御する。フロントグリッパは、方向制御ジャッキ操作前の前胴方向と、現ストロークで設定された掘進方向との差の大きさに応じて制御する。方向制御ジャッキの制御は、演算された値が、負(引き)の場合、カッター回転の前に行い、正(押し)の場合、カッター回転後に行う。

モード4を選択した場合、メイングリッパにストローク差をつける。

掘進中には、一定距離毎に、現在のマシンの方位を目標方位に合わせるため、方向制御ジャッキにて、マシンを目標方位に合わせ、またフロントグリッパのストローク値をファジイ理論で演算し、ストロークの制御を行う。フロントグリッパは、前胴方向を方向制御ジャッキにて掘進方向に向けられないとき、その方向差の大きさに従って、ストローク差の増減を行い、それでも困難な場合は、スラストジャッキの片押し等も併用する。

5. あとがき

TBMの運転はシールドとは異なり、刻々と変化する状況に応じ、多種のジャッキを機能別に選択する必要がある、かつそれらの圧力を制御しなければならない。このため、操作は場合によっては煩雑さをきわめ、オペレータの技量が出来形の良否を決定する大きな要因となっている。

オペレータそれぞれに経験年数、感性、体力に差があるように、十人十色の操作方法を身につけており、たとえば、掘進中に方位やレベルが微動する度毎、頻繁に操作する人もいれば、そうでない人もいる。このような場合、いずれの方法が正しいかは、地山条件等により異なり、一概に決めつけることはできない。

これらの諸条件に対処すべく開発した同システムは、従来から熟練工の技量に頼ってきたきらいがある曖昧な制御操作の中に、一定の規則性を見いだすことにより、さらに、マシン自身に操作感覚をうえつけようとするものである。今後も本システムの学習機能により、多くのデータを集積し、あらゆる岩質に適応できる全地質対応型の自動運転システムのグレードアップを、進める所存である。