

アジア・太平洋地域の社会・産業インフラ整備に貢献する計測・制御システム技術

Technologies for Measurement and Control Systems Contributing to Development of Social and Industrial Infrastructure in Asia-Pacific Region

垂石 肇 深井 英五 堀江 一宏

■TARUISHI Hajime ■FUKAI Eigo ■HORIE Kazuhiro

経済成長が著しいアジア・太平洋地域では、社会・産業インフラの整備・拡充に必要な土木建設機械や各種製造ラインなどの計測・制御システムに、旺盛な需要がある。このような市場ニーズに応えるには、計測・制御機器を含むシステムの総コストを低減するとともに、システムの操業生産性を向上させる差異化技術が求められる。

このような中、東芝グループは、シールドマシン制御システム及び高機能繊維スパンデクス (Spandex) の製造ライン制御システムを継続的に受注している。今回、東芝インフラシステムズ (株) は、インバーター直結プログラマブルロジックコントローラー (PLC) とその他の機種との直接接続が可能なビルトインアプリケーションを開発し、コスト低減を実現した。また、複数モーターの同期トルクブースト^(注1)やリミット制御といった差異化技術によって、シールドマシンの生産性を向上させた。更に、操業生産性の向上に貢献するソリューションとして、モーターの故障予知診断技術及びアドバンスプロセス制御 (APC) 最適化技術の開発にも取り組んでいる。

Accompanying the recent economic growth in the Asia-Pacific region, demand has been growing for civil engineering and construction machinery as well as various production lines for the development and expansion of social and industrial infrastructure. In order to fulfill these market needs, both the reduction of total system costs including those of measurement and control systems and the improvement of operational capabilities through the use of differentiated technologies are essential.

Under these circumstances, the Toshiba Group has received a succession of orders for control systems for tunnel boring machines (TBMs) and for production lines for spandex synthetic fiber. These systems incorporate several innovative technologies including a newly developed built-in application that allows a directly inverter-connected programmable logic controller (PLC) to be connected to other devices to realize cost reduction, and a synchronous boost and limit control technology for multiple motors to improve productivity. Furthermore, we are developing a motor failure prediction and diagnosis technology and an advanced process control (APC) optimizer as solutions to improve operational capabilities.

1 まえがき

アジア・太平洋地域は、世界の経済成長の60%を占めており、経済成長率は、2016年の5.3%に対して2017年は5.5%に増加すると予測されている⁽¹⁾。このため、アジア各所での社会・産業インフラ整備に関連した計測・制御システムにおいても、旺盛な需要が見込まれている。

土木建設機械や産業プラントの現場では、モーターとドライブ装置の適用範囲が拡大している。例えば、石油掘削プラントでは、石油を地下からくみ上げる油井 (ゆせい) や、遠隔地に搬送するためのポンプのモーターとドライブ装置、工場や自動倉庫での部品や荷物を運ぶ搬送機に組み込まれたモーターとドライブ装置など、多くの適用事例が見られる。これは、モーター機器自体の高効率化、及びドライブ装置による可変回転数制御と省エネ効果が広く認識されるとともに、支持された結果と考えられる。

(注1) モーターに過電流を流すことで、定格以上の大トルクを一時的に発生させること。

モーターとドライブ装置の規格化や量産化が進んだことから、単体機器はコモディティ化し、大幅なコスト低減と更なる適用範囲の拡大が促進された。その結果、社会・産業インフラ市場におけるニーズは、システムの総コストの低減及びシステムの操業生産性を向上させる差異化技術に移行しつつある。これを受けて、世界の計測・制御機器ベンダー及びシステムインテグレーターは、新たなプロジェクトの獲得を目指して、より活発な技術提案や受注競争を展開している。

このような中、東芝グループが継続的に受注しているシステムとして、トンネル掘削に適用されるシールドマシン制御システム及び高機能繊維スパンデクスの大規模製造ライン制御システムがある。ここでは、これら二つのシステムの低コスト化を実現する技術として東芝インフラシステムズ (株) が開発した、インバーター直結PLCとその他の機種との直接接続を可能にしたビルトインアプリケーションと、シールドマシンの操業生産性を向上させる差異化技術である複数モーターの同期トルクブーストやリミット制御について述べる。更に、操業生産性を向上させる差異化技術として、モーターの故障予知診断技術と、APC最適化技術についても述べる。

2 シールドマシン制御システムの事例

シールドマシンは、地中を掘削する土木建設機械の一つで、マシンの先端にカッターヘッドと呼ばれる面板が取り付けられている。そして、この面板を定速で回転させながら地盤に押し付けて掘削する機能に加え、掘削した土砂と地下水を地表に排出する機能を持つ。東芝グループは、地下鉄のトンネル掘削に用いられるシールドマシンのメーカーから、モーター・ドライブ制御機器を継続的に受注している。その市場概況とシステムの特徴を、以下に説明する。

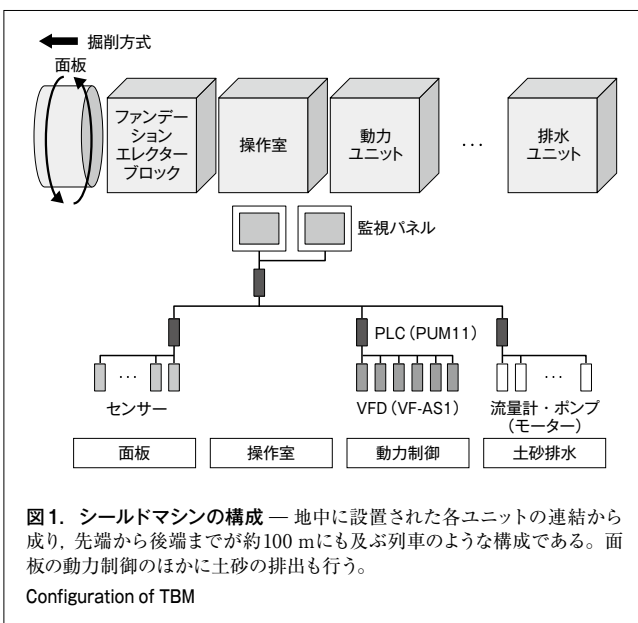
2.1 世界の土木建設機械の需要

世界的に、土木建設機械の需要が拡大している。人口増加や経済発展が著しいアジア・太平洋地域でも増加しており、特に中国では、2007年の58.5億円に対して2017年は213.1億円にまで市場が拡大すると予測されている⁽²⁾。土木建設機械の中でも、シールドマシンは道路や鉄道などのトンネル掘削に用いられることから、今後も成長が見込まれる。

2.2 シールドマシンの特徴

シールドマシンの構成を図1に示す。上位監視系、排水系、動力系など複数の設備から構成される。シールドマシン全体は地中に設置されて運用され、面板の先端から後端までが約100mにも及ぶ列車のような構成である。掘る場所によって地質や、石、礫(れき)などの状況が異なり、また、用途に応じて面板のサイズが異なるため、掘り進めるサイトごとに機器構成が異なる。掘削中も、土壌の地力によって掘削用水冷モーターの制御方式を変更する必要がある。動力制御部は、PLCでVFD(可変周波数ドライブ)インバーターの制御方式を切り替えながら面板を回転させる。

実際の事例では、シールドマシン1式当たり、PLC(CPUモ



ジュール:PUM11)4台、ポンプ用モーター20台、VFD(VF-AS1)及び掘削用水冷モーター各6台が搭載される。特に水冷モーターを可変速制御するVFDとPLCを用いた動力制御盤には、特段のコスト競争力とともに、掘削時における障害からの回復力に強い差異化技術が要求されている。これを受けて当社は、インバーター直結PLCと同期トルクブースト/リミット制御技術を開発した。

3 スパンデクス製造工程の事例

スパンデクスは、ポリウレタン系繊維の一種で、伸縮性に優れ、下着から水着、紙おむつ、スポーツ・レジャー衣料に至るまで、用途が拡大している高機能繊維である。

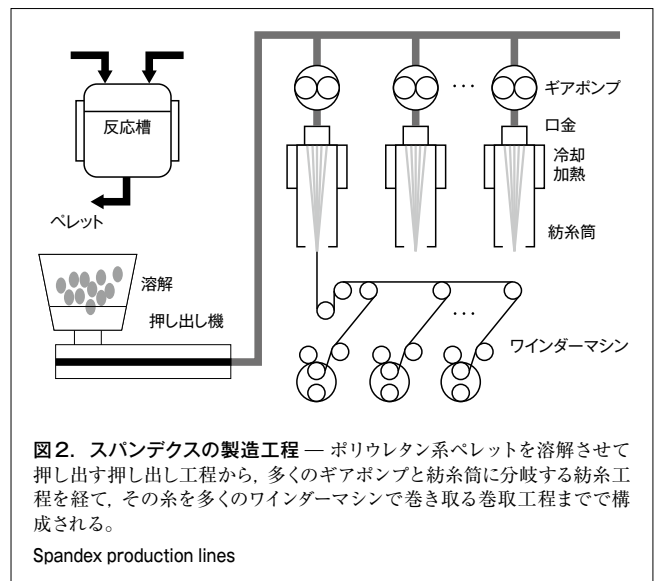
東芝グループは、スパンデクス製造工場を世界展開している大手の化学メーカーから、計測・制御システムを継続的に受注している。以下に、その市場概況とシステムの特徴について説明する。

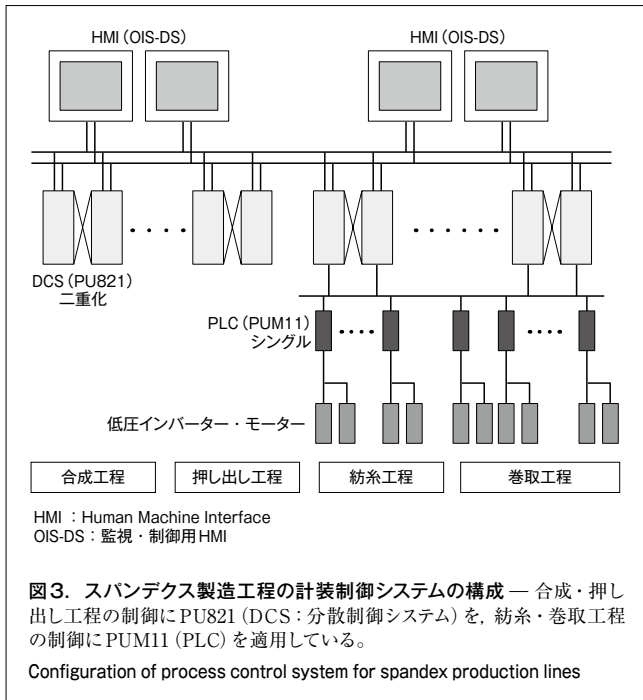
3.1 世界の繊維需要

世界の繊維需要は、8年連続して増加している大きな成長市場である。中でも、計測・制御システムを必要とする合成繊維は、需要全体の62.6%を占める。国別の合成繊維生産量は、中国が69.1%、インドが8.4%、ASEAN(東南アジア諸国連合)が5.3%と続き、人口増加や経済発展を背景に成長が著しい⁽³⁾。

3.2 スパンデクス製造工程の特徴

スパンデクス製造工程の概要を図2に示す。上流工程は、ポリウレタン系原料の合成工程と、溶解された糸原料の押し出し工程から成る。また、下流工程は、温度制御された紡糸筒を通す紡糸工程と、ワインダーマシンによる巻取工程から成る。上流工程の制御対象機器は、幾つかの反応槽と押し出し





機から構成され、制御点数としてはそれほど多くない。一方、下流工程の制御対象機器は、非常に多くの紡糸筒、ワインダーマシン、及び低圧モーターから構成されるという特徴がある。

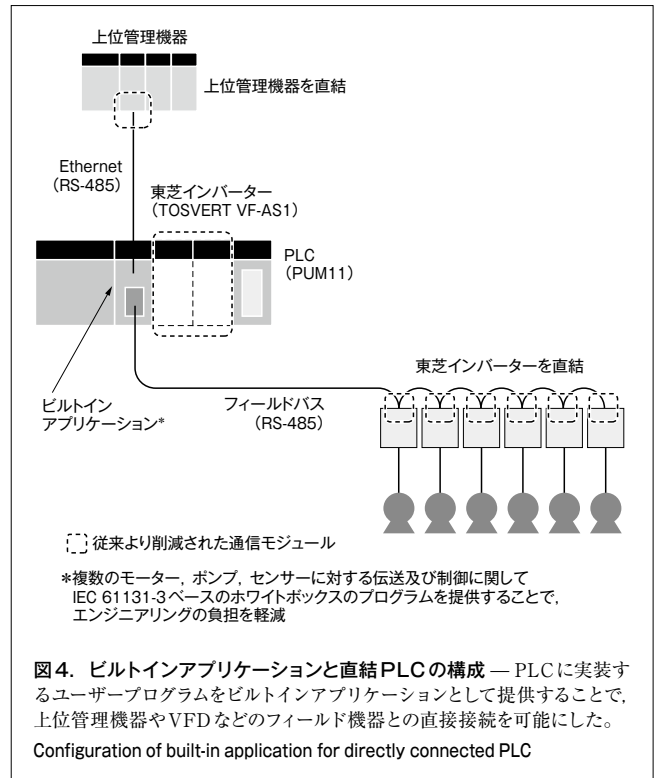
スパandex製造工程の計測・制御システムの構成を図3に示す。特に巻取工程は、制御対象機器の点数が多く、低圧モーターを可変速制御するVFDとPLCに、コスト低減の要求がある。これに応えるため、当社は、インバーター直結PLCを実現するビルトインアプリケーションを開発した。

4 コスト低減と操業生産性向上を実現する技術

前述のシールドマシン制御システム及びスパandex製造工程制御システムに適用された、低コスト化及び操業生産性向上を実現する差異化技術について述べる。

4.1 ビルトインアプリケーション

一般に、異なる機種 of 計測・制御機器間で通信するとき、同じプロトコルを使ってデータ伝送するには、何らかのインターフェースが必要になる。計測・制御システムにおける伝送プロトコルの国際標準は、IEC 61784 (国際電気標準会議規格 61784) に約20種類が定義されているが、これらに従うことが必ずしもコスト競争力のあるシステムを提供することにつながるケースがある。それは、計測・制御機器メーカーのオプション品である通信モジュールやサードパーティーのゲートウェイ製品を多数使用することになり、その結果、システムの部品コストが増大するからである。特に、小型のPLCと多数のVFDを用いて伝送接続するシステムでは、PLCとVFDの双方に追加するオプション品が、システム機器のコスト全体の50%に達



するケースもある。

これを解決するため、当社は、以下の要件に沿ってビルトインアプリケーションを開発し、顧客に提供した。

- (1) 物理層は、RS-232C/RS-422/RS-485/Ethernetを対象とする。
- (2) 下位プロトコルは、TCP (Transmission Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol) とする。
- (3) 開発対象の上位プロトコルは、Modbusなど、各社の公開プロトコルで、機能が十分に使いやすいものを選定する。
- (4) 開発対象の上位プロトコルは、ファームウェア開発を伴うブラックボックスではなく、IEC 61131-3のプログラム、すなわちホワイトボックスのアプリケーションとして提供する。
- (5) ユーザー側のシステムの視点から見た伝送形態 (サイクリック伝送やメッセージ伝送など) を備えたアプリケーションを提供する。

具体的な例として、当社のPLC (PUM11) を用いたシステム構成を図4に示す。PUM11は、RS-485ポートとEthernetポートの両方を組み込んだPLCであり、これに各種の伝送プロトコルを可能にするビルトインアプリケーションを実装することで、インバーター直結PLCを実現した。また、上位管理機器との直接接続を可能にし、従来必要であった伝送オプションモジュールやゲートウェイを一切不要にした。これによって、低コスト化を実現した。

4.2 複数モーターの同期トルクブーストとリミット制御

シールドマシンは、掘削中に掘削面との摩擦により負荷トル

クが発生するが、それよりも大きなモーター駆動トルクで掘削を行う。もし、より堅い掘削面が現れて、負荷トルクが駆動トルクよりも大きくなれば、掘削・前進ができなくなり、モーター焼損を避けるために停止させる。この場合、この状態から掘削作業を再開するには、面板を掘り起こして脱出させる必要がある。

今回、この状態から脱出させるため、複数のモーターとインバーターを同期制御して面板に一時的に大きな駆動トルクを発生させる制御技術を、当社と協業ベンダーとで共同開発した。シールドマシンの面板部の駆動トルクは、面板部の後端に分散して取り付けられた複数台の掘削用水冷モーターによって得られる。シールドマシンの面板に対してトルクブーストを行うには、全ての掘削用水冷モーターを同じタイミングで制御することが必要になる。

PLC (PUM11) を用いて、各水冷モーターに対して駆動トルクのピークを出すタイミングを合わせることで、面板部に最大トルクを発生させた。一方トルクブースト時には、掘削用水冷モーターに定格の1.5倍程度の過電流を流すことから、発熱によるモーター焼損のリスクが発生する。この対策として、トルクブースト時間に制限を設けるだけでなく、モーターを空転させて機器が故障しないように、PLC (PUM11) にトルクリミットを設ける制御も組み込んだ。

5 操業生産性の更なる向上への取り組み

電気機器及び計測・制御機器はコモディティー化が進み、もはや単体のカタログスペックだけで優位性を訴求することは難しく、多くの顧客は、システムの総コストやシステム特有の操業生産性を向上させるための差異化技術に注目している。この差異化技術として、当社が取り組んでいるモーターの故障予知診断技術、及びAPC最適化技術について述べる。

5.1 モーターの故障予知診断技術

東芝グループは、電力会社の事業用発電所や、化学・製紙プラントなどの自家発電所で稼働しているタービン発電機に対して、回転数や振動といったデータのリモート監視・診断を行ってきた実績がある^{(4), (5)}。

このタービン発電機の回転体の故障診断・解析技術を、東芝グループが提供する高圧・低圧モーターに適用するための実証を行っている。

モーターは、システム内の機器ブロックごとに搭載されることから、モーター及び被回転体の消費電流、温度、回転数、振動などを監視している。そして、機器ブロックごとの劣化度合いを数値化し、適切な時期にモーターを交換することで、システム全体の稼働率を飛躍的に向上させる取り組みである。

5.2 APC最適化技術

計測・制御システムの主な役割は、対象のプロセスを自動的に制御して、計画している生産量を効率的に実現することであ

る。実際のプロセスに適用される制御技術は、今なおPID (比例、積分、微分) 制御が90%、2自由度PID及びモデルベース制御などの古典的APCが9%、モデル予測制御などの現代的APCが1%との調査報告がある⁽⁶⁾。操業現場に受け入れられやすいPID制御の最適化や古典的APCの適用により、プロセスの性能を引き出すことが可能と考えている。

東芝グループは、2自由度PID制御や、ダブルクロスリミット制御、アドバンスドフィードフォワード制御、モデル駆動PID制御⁽⁷⁾などを業界に先駆けて提供し、各プロセスの操業生産効率、エネルギー効率の向上に貢献してきた実績がある⁽⁸⁾。

一方、APCは、「実際のプロセスへの適用効果が、事前に把握しにくい」とか、「従来のPID制御に比してパラメーターの数が多く、操業現場での調整が難しい」などの声が多く、普及・展開を妨げている要因の一つと考えられる。これまでも、2自由度PIDのオートチューニングへの取り組み⁽⁹⁾や、最適化ツールの提供⁽¹⁰⁾はあったが、当社に対して「APC全体をカバーして欲しい」とか、「具体的なプラントでの実績を示して欲しい」などの要求がある。

このような状況を踏まえ、当社は、以下の取り組みを進めている。

- (1) 従来の2自由度PID制御を含め、モデル駆動PID制御の最適化手法を確立する。
- (2) 上記フィードバック制御にフィードフォワード制御を組み合わせたときの最適化手法を確立する。
- (3) 当社におけるアドバンスド制御の得意分野の一つは、ボイラー、工業炉、加熱炉の燃焼制御にあることから、実際のプラントでの最適化に参画して、制御性の改善だけでなく省エネ効果などの実証を行う。

6 あとがき

経済成長が著しいアジア・太平洋地域で、東芝グループが継続的に受注している計測・制御システムの事例として、シールドマシン制御システム及びスパンデクス巻取機械システムについて述べた。システムの総コストと差異化技術が重要なポイントとなっており、今回の事例では、インバーター直結PLCとその他の機種との直接接続を可能にしたビルトインアプリケーションや、トンネル掘削操業時の課題に応えた複数モーターの同期トルクブーストやリミット制御がその役割を果たした。いずれのシステムも操業中で、導入した顧客から高い評価を得ている。

更に、東芝グループの経験や実績を生かし、当社は、モーター及び機械の劣化診断技術やAPC最適化技術の開発にも注力している。今後も、顧客の操業に更なる付加価値をもたらすソリューションを提供していく。

文 献

- (1) 国際通貨基金. “アジアのダイナミックな経済は引き続き世界成長のけん引役”. 国際通貨基金 ニュース記事. <<https://www.imf.org/ja/News/Articles/2017/05/08/NA050917-Asia-Dynamic-Economies-Continue-to-Lead-Global-Growth>>, (参照 2017-09-19).
- (2) 経済産業省 産業構造審議会 環境部会 地球環境小委員会. “建設機械の世界市場規模と日本からの輸出額”. 経済産業省 地球環境小委員会 電子・電機・産業機械等ワーキンググループ (2013年度 第2回). 参考資料 2, 2013, 8p. <http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004645/pdf/2013_02_s02_00.pdf>, (参照 2017-09-19).
- (3) 日本化学繊維協会. (世界)世界の繊維需要, 8年連続で拡大ー2016年. 日本化学繊維協会 業界ニュース, 2017, 4p. <<http://www.jcfa.gr.jp/mg/wp-content/uploads/news/industry/2017/07/12295/1099news.pdf>>, (参照 2017-09-19).
- (4) 林 真司, ほか. 海外火力発電所のリモート監視・診断サービス. 東芝レビュー. 2004, 59, 12, p.49 - 51.
- (5) 小坂秀則, 山口健二. 小型化と長寿命化を実現したタービン監視計器モニタPE6シリーズ. 東芝レビュー. 2010, 65, 2, p.52 - 55.
- (6) 加納 学. 高度プロセス制御に関するアンケート調査結果報告書. 日本学術振興会 プロセスシステム工学第143委員会ワークショップ No.27. 2009, 53p. <http://ws27.pse143.org/files/WS27_APCsurvey2009_public.pdf>, (参照 2017-09-19).
- (7) 馬場 泰, ほか. モデル駆動PID制御. 東芝レビュー. 2003, 58, 10, p.38 - 41.
- (8) 藤山道博, ほか. モデル駆動型PIDによるボイラ主蒸気安定化と省エネルギー. 紙パ技協誌. 2007, 61, 6, p.666 - 673.
- (9) 重政 隆, ほか. 2自由度PIDコントローラのオートチューニング方法. 計測と制御. 1988, 27, 4, p.305 - 311.
- (10) 柴宮 理, ほか. 高度化するユーザーニーズに応える産業用コントローラの新技術と展開. 東芝レビュー. 2013, 68, 10, p.14 - 17.



垂石 肇 TARUISHI Hajime

東芝インフラシステムズ(株)
産業・自動車システム事業部 産業システム事業開発部
計測自動制御学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



深井 英五 FUKAI Eigo

東芝インフラシステムズ(株)
産業・自動車システム事業部 産業システム事業開発部
計測自動制御学会・日本リモートセンシング学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



堀江 一宏 HORIE Kazuhiro

東芝インフラシステムズ(株)
産業・自動車システム事業部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.