

Smoothing the Tension

dSPACE プロトタイピングシステムに
ウェブテンションの最適制御 (ミュン



による
 ン工科大学 / PTS 社)



図 1 : VESTRA ペーパーコーティングシステム - パイロットコーティングシステム
 (PTS 社、ミュンヘン)

紙は、コーティングシステムで仕上げるときに、その表面を光沢かマットに仕上げることが出来ます。コーティングを施された加工紙は、最高の印刷品質基準を満たします。しかし、コーティング紙は製造中にウェブ切れを起こしやすく、生産性を低下させます。ウェブテンションを安定させる高性能のウェブ制御システムはウェブ切れのリスクを最小化します。

現在のコーティングシステムは、ペーパーウェブがさまざまな製造セクションで連続して処理される製造プラントです。紙は複数の処理ステップを通して、弾性変形や塑性変形に耐えなければなりません。個々のサブシステムは、それを通過するペーパーウェブ自体によって互いに連結されています。これは、コーティングシステム全体にわたって、ウェブの安定性にかかなりの影響を与え、そのためにウェブ切れ、遊休時間、操業停止が発生する場合があります。ウェブテンションの変動は、コーティング中のペーパーウェブの物理パラメータまたは工場内の操業速度の変化、故障、またはブレードの接触/離脱によりシステム全体にわたって発生し、その影響が重なり合って、ウェブによりコーティングシステム全体に伝わることになります。従来のテンションコントローラは、これらの変動に十分には対応できません。ウェブテンションがある程度

の範囲内に収まらない場合（特にコーティングシステムの起動時と停止時）は、十分な製造品質が得られないことや、出荷できない品質に劣化することさえあります。したがって、私たちの目的は、生産設備とウェブの電気的および機械的な動作を考慮し、安定したウェブテンションで動作する、より高性能のウェブ制御システムの開発でした。

パイロットコーティングシステムのシステムモデル

最適なコントローラを設計し、それをパイロットコーティングシステムに実装するために、ウェブの最適な動作に関し、システム全体の物理的および技術的特性を徹底的に理解する必要があります。私たちは、収集したプラントデータと、既知の非線形物理システムの記述（流体力学と弾性理論）を使用して、システム全体のモデル化、シミュレーション、および分析を行

うことができました。そして、ペーパーウェブにより連結されている次のサブシステムを、システムの最重要コンポーネントとして特定しました。

- 駆動システム（モーター、ギア、シャフト、クラッチ）
- ニップセクション（ウェブのガイドローラー）
- ペーパーウェブ（テキスタイルウェブ）

これらのコンポーネントでは、紙とウェブテンションの動作が、駆動ユニット（モーターとガイドローラー）および、コーティング装置での摩擦やコーティングナイフの作動により発生する負荷の関数として説明されます。このシステムモデルを使用すると、コーティングシステムの処理をオフラインで観察して、新しい制御方式を簡単にテストし、分析することができます。

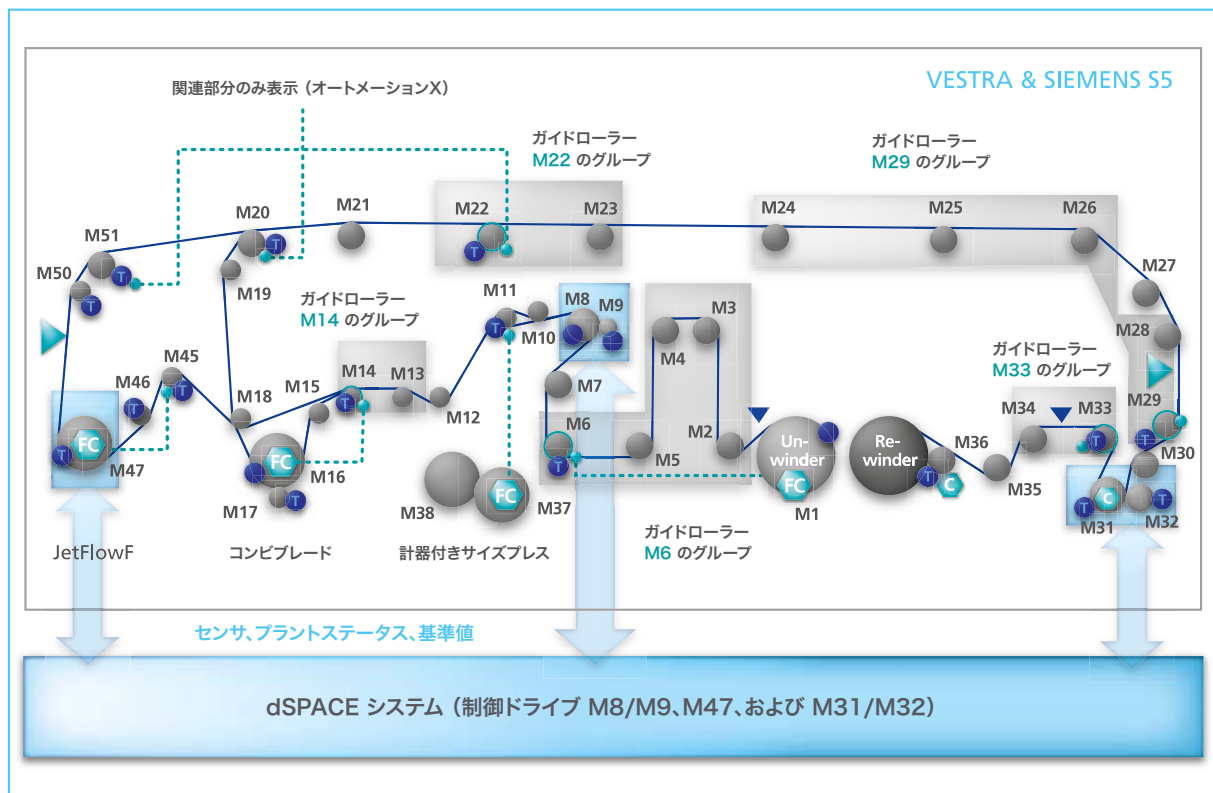


図2：新しい制御構造のテストおよび検証を行うために dSPACE システムへのインターフェースを備えた VESTRA コーティングシステム

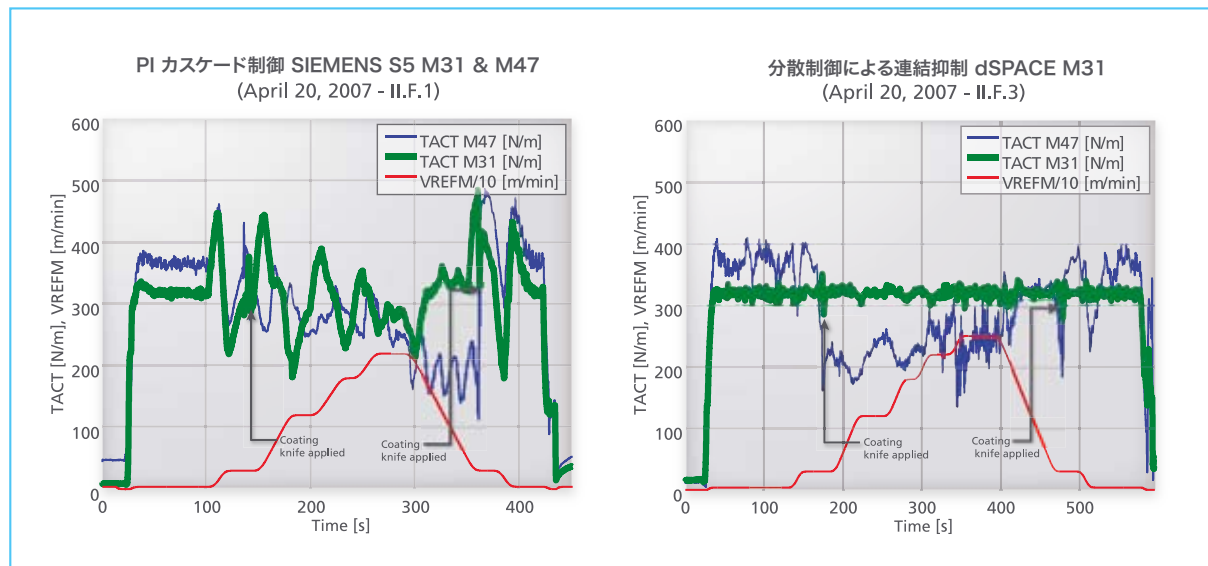


図3：ニッププレス M31/M32 での異なる速度における、従来の PI カスケード制御 (SIMATIC S5) と「分散制御による連結抑制」(dSPACE) の比較

強化された制御構造の特性

ペーパーウェブが多くの子システム内に搬送される連続的な製造プロセス全体において、ペーパーウェブに関わるプラントの動作は複雑です。個々の処理セクションやニップセクション（ニッププレスまたはローラー）は、ペーパーウェブを介して互いに連結されています。ウェブテンションに望ましくない変動が発生すると、まず、発生元のサブシステムが影響を受け、次に、その前後のサブシステムに影響が及びます。したがって、制御構造には次の特性が必要です。

- 良好な追従性（遷移時間が短く、オーバーシュートが小さい）および制御ループの外乱耐性
- ロバスト性（パラメータの不確実性と変動に対応）
- サブシステムの分離性（連結による影響の最適な抑制）

VESTRA コーティングシステムに新しい制御構造を実装するために、私たちは dSPACE システムでラピッドコントロールプロトタイピングを使用することにしました。dSPACE システムを、特別に開発された電子インターフェース（図 2 を参照）

経由で VESTRA に接続し、M8/M9（ニッププレス 1）、M47（アプリケーション装置 JetFlow-F）、および M31/M32（ニッププレス 2）の各駆動ユニットを直接制御できるようにしました。

分散制御による連結抑制

ウェブの動作を安定させるために私たちがとった最初のアプローチは、「分散制御による連結抑制」でした。シミュレーションにより、従来の PI カスケード制御 (SIMATIC S5 の制御構造) と「分散制御による連結抑制」を、制御性能、ロバスト性、および分離特性に関して効率的に観察し、比較することができました。Profibus による低速なサイクル時間と通信の遅延を考慮すれば、PI カスケード制御でシミュレートされたプラントの動作は、実際のプラントの質的、そしてほとんど量的な動作を反映していました。最初に、標準的な PI カスケード制御が Siemens SIMATIC S5 と dSPACE システムを使ってテストされました。両システムのコントローラの構造と設計は同じものを使用しました。しかし、dSPACE システムでは、高速なサイクル時間（マイクロプロセッサがプログラム実行に要する時間）と通信遅延がほとんどないこと

(SIMATIC S5 とは異なり、dSPACE システムはインバータに直接接続) により、制御性能が明らかに向上していました。また他方では、ペーパーウェブによる連結の影響は両システムでほぼ同じでした。dSPACE システムに実装されたニッププレス M31/M32 での「分散制御による連結抑制」は、コーティングブレードの接触/離脱や基準機械速度 (VREFM) の変化によるテンション変動の伝播などのイベントに対して、反応速度の向上は顕著で、より効果的に反応します。ニッププレス M31/M32 でのウェブテンションを示す TACT M31 は、非常に均一です（図 3 を参照）。

従来の PI カスケード制御に比べ、「分散制御による連結抑制」は「非常に高い」制御性能レベルを実現します。つまり、さまざまな製造条件での良好な追従性、外乱耐性、および優れたロバスト性を備えています。

アプリケーションローラーのフィードフォワードトルク制御

紙のコーティング処理で発生する最も重要な状況の 1 つは、コーティングナイフ（ブレード）で余分なカラーコーティン

グ剤を拭き取るときです。ブレードにより、コーティング装置の圧力ローラーに負荷がかけられ、ブレード接触時にパルス状に負荷トルク M_{Li}^* が生成されます。カラーコーティング剤を加えると、紙の特性（ヤング率 $\Delta E_{i-1,i}$ ）と、ブレードと紙の間にある一定量の「潤滑油」の役割を果たすコーティング剤の量が変わります。このために、ほぼ一定の値を保つ有効なトルクが減少します。望ましい速度および張力（ウェブテンション）を維持するには、コーティング動作中に圧力ローラー駆動ユニットが、この値を継続的に補正する必要があります。アプリケーションローラーのフィードフォワードトルク制御を使用しない場合は、圧力ローラーへのこの動的な負荷トルクにより、速度が著しく低下するため、ウェブテンションがニップセクションでは減少し、それ以降のサブシステムでは増加します。TACT M47 では、このような張力の大規模な変動により、望ましくない危険なウェブ切れを引き起こす場合があります。したがって、私たちの 2 番目のアプローチは、特定のアプリケーションローラーにモ

ジュールとして実装でき、コーティング装置が使用する設定済み制御アルゴリズムにはまったく影響しないフィードフォワードトルク制御です。ブレードの接触/離脱の各時点（つまり、コーティングの開始と終了）が分かっている場合は、私たちが開発したフィードフォワードトルク制御により負荷トルクがほぼ完全に補正されます。これは、フィードフォワードトルク MFFC_Blade を使用して行われます。その特性は、経験主義的に決定でき、ルックアップテーブルに保存できます。アプリケーションローラーのフィードフォワードトルク制御が実装され、その実用性は、VESTRA でのシミュレーションと実験により検証されました。得られた補正結果はほぼ完全でした（図 4 を参照）。

結果

私たちは、個々のニップセクション（駆動ユニット、ローラー、ペーパーウェブ）および VESTRA 全体のための複数のモジュールで構成されるシミュレーションツールボックスを開発しました。このツールボックスにより、「分散制御による連結抑制」と

フィードフォワードトルク制御という新しい制御構造の両方に対する効率的なテストとオフライン検証が容易になりました。この新しい制御方式は、dSPACE システムと VESTRA 間の拡張電子インターフェースを介して、実際のプラントに実装されました。

「分散制御による連結抑制」は、連続的な製造プロセスにおける連結されたサブシステムの制御設計に適した、シンプルで効率的な自動化ツールを提供します。非常に高い制御性能レベルを実現しており、多様な製造条件においても、良好な追従性、外乱耐性、および優れたロバスト性を提供します。ウェブをより円滑に動作させるには、「分散制御による連結抑制」を、定義された各ニップセクションに実装する必要があります。

アプリケーションローラーのフィードフォワードトルク制御により、ウェブ切れのリスクが大幅に低下します。コーティングナイフ（ブレード）が接触および離脱した影響は、ほぼ完全に補正できます。制御コンセプトとシミュレーションツールボックスは、いずれも、連続的な製造プロセス

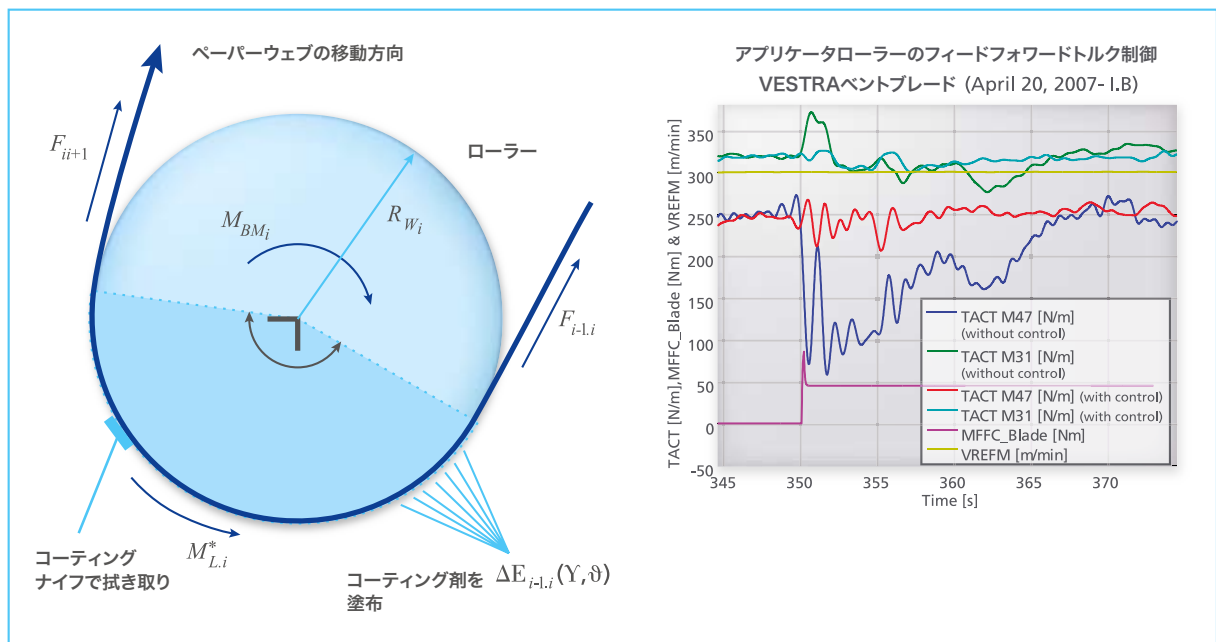


図 4：コーティングナイフ（ここではベントブレード）を備えたコーティング装置 M47（JetFlow F）- アプリケーションローラーのフィードフォワードトルク制御を使用した場合と、使用しない場合の比較



用語解説

カスケード制御 –

ネストされた制御ループ。制御設計を単純化し、それぞれを実装するために、プラント全体がより小さい制御対象システムに分割されます。

分散制御による連結抑制 –

特別に設計された状態空間制御で、特定のサブシステムが連結によってシステムの残りの部分に及ぼす影響を最小化します。

ニップセクション –

モデルでは理想的な状態として、各サブシステムで、ウェブが動作中に滑ってずれることなく、横オフセットは必要がないものと仮定しています。

「サイクル時間が高速な dSPACE システムを使用することで、制御パフォーマンスを著しく改善することができました」

Christoph Hackl、ミュンヘン工科大学

ス（製紙およびフォイル製造業など）での使用に適しています。このテストの結果は、安定したウェブテンションによる非常に円滑なウェブ動作を示しているため、従来の制御方式の不利な点が克服され、ウェブ切れのリスクとそれに関連する遊休時間が最小限になります。■

Christoph M. Hackl
Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme (EAT)
(電気駆動システム研究所)
ミュンヘン工科大学
ドイツ

Beatrix Mair
Papiertechnische Stiftung
(ペーパーテクノロジスペシャリスト、PTS 社)
ミュンヘン
ドイツ