

# Electronics Take Off

Moog 社における最新アクチュエータシステムの  
Real-Time Testing



現在、航空機アクチュエータアプリケーションは、油圧システムから電動アクチュエータ方式へと移行しつつあります。このような技術進化により、これまで機械装置が主流であった業界に、複雑なエレクトロニクスと組み込みソフトウェアが導入されました。このような変化に伴い、機械装置のシステム開発には、高い信頼性と性能ならびに運用中の安全性を保証できる、より効果的なテスト戦略が求められています。Real-Time Testing は、複雑な最新アクチュエータシステムの開発において重要な役割を果たしています。



Moog社は、従来技術である油圧アクチュエータの制御エレクトロニクスから、冗長電動アクチュエータシステムのセーフティクリティカルなフライトソフトウェア認証用リアルタイムシミュレータまで、幅広い用途で dSPACE Real-Time Testing ソリューションを使用しています。Moog社は、航空宇宙産業向けの主要サプライヤとして60年の実績を有しており、ハイテクコンポーネントのメーカーから飛行制御アクチュエータ統合システムのトップサプライヤに成長しました。Moog社の信頼性の高い飛行制御システムや特殊制御製品は、世界中の航空機市場に供給されています。Moog Aircraftグループは、飛行制御統合システム（プライマリ/セカンダリ飛行制御、高揚力装置、機動飛行な

どの最先端システム）から、重要制御アプリケーション（エンジン制御、アクティブ制振制御、兵器格納ベイ、航法、誘導など）まで、幅広く製品を展開しています。Moog社は、製品を統合型システムソリューションとして提供するとともに、単独のコンポーネントとしても提供しています。Moog社は飛行制御コンピュータおよびソフトウェア、コックピット制御、制御エレクトロニクスとパワードライブシステム、アクチュエータ、センサ、関連コンポーネントなどの重要制御製品の開発能力を有しています。航空機の運用に極めて重要となる幅広い製品をサポートし、かつ継続的に技術革新を図るには、厳しい設計およびテスト要求に対応できる最先端の開発環境が必要です。





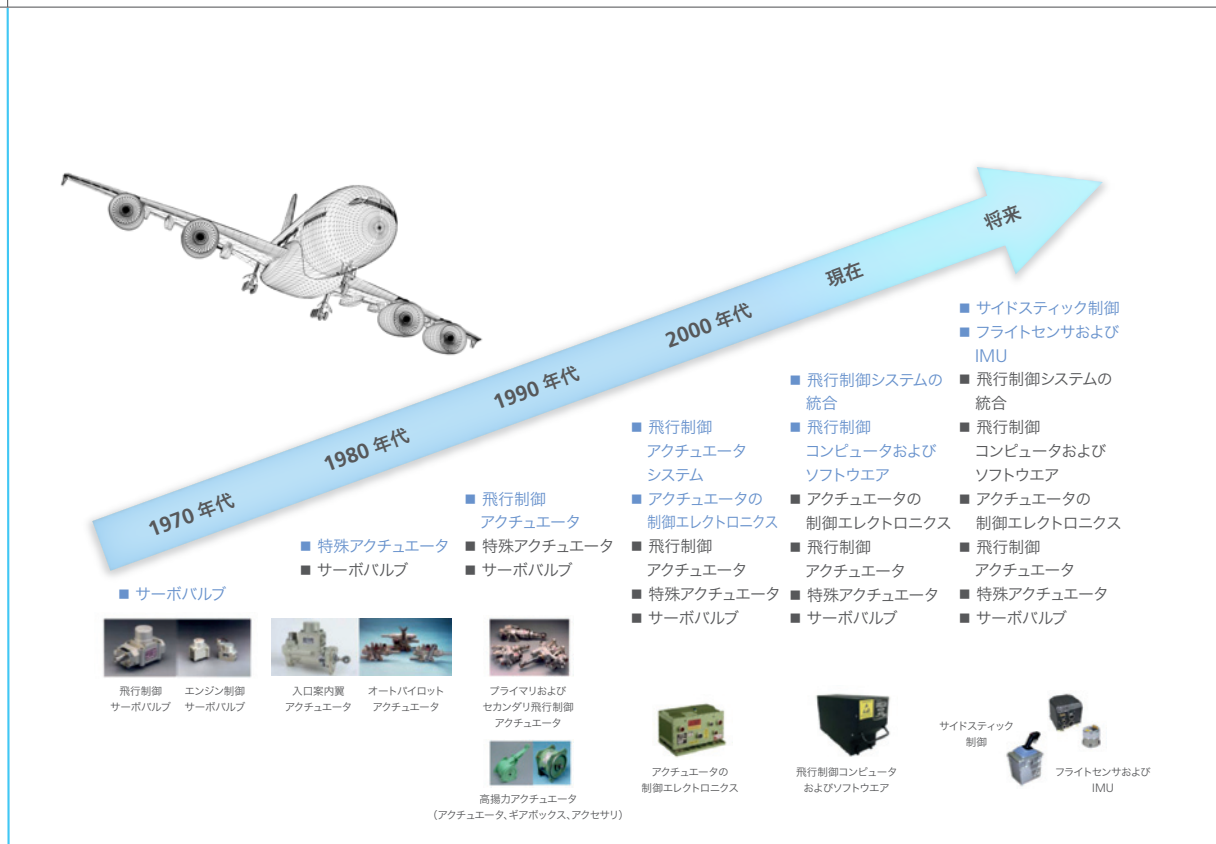


図 1 : Moog 社のコンポーネントサプライヤから統合システムサプライヤへの変遷

### 飛行制御アクチュエータの進化

現在の高性能航空機にとって飛行制御アクチュエータシステムは極めて重要です。人類が初めて飛行に成功して以来、これらのシステムは常に重視されてきました。初期の航空機では、機械的なリンクを介してパイロットが直接操縦翼面を動かしていました。航空機が進化するにつれて操縦翼面の負荷が大きくなり、パイロットからの操舵入力を補助するために油圧駆動が追加されました。これらのシステムは、パイロットの操舵入力に連結した油圧機器によって、操縦翼面の操舵力を補強します。時代が進むと、完全に油圧で操縦翼面を駆動するシステムへと進化します。これらの駆動システムは、パイロットからの機械的操舵入力に応じて操縦翼面を動かします。機械式油圧システムからの大きな飛躍は、フライバイワイヤシステムの導入によってもたらされました。これらのシステムでは、パイロットの操舵は飛行操縦系に直接入力されるのではなく、飛行制御コンピュータに入力され、油圧アクチュエータはコンピュータからの電気信号によって制御されます。これは大きな変革でした。この種のアクチュエータシステムは、現在運用中の多くの航空機で使用されています。アクチュエータシステムの次なる進化は、パワーバイワイヤ技術への移行によってもたらされます。パワーバイワイ

「Moog 社は、従来型油圧アクチュエータの制御エレクトロニクスから、セーフティクリティカルなフライトソフトウェア認証用リアルタイムシミュレータまで、幅広い用途で dSPACE システムを使用しています。」

David Cook 氏, Moog 社

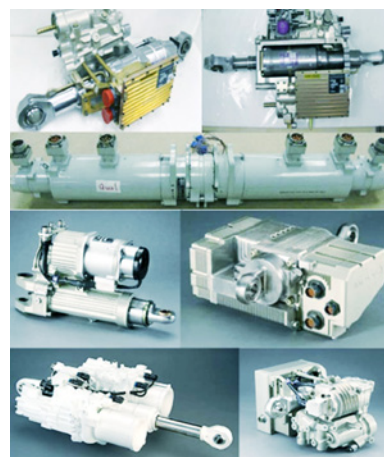
ヤシステムでは、制御と駆動の両方を電氣的に行います。パイロットの操舵は飛行制御コンピュータに入力され、コンピュータは電動アクチュエータを制御します。命令信号は、通信バス (ARINC 429、MIL-STD-1553、IEEE 1394b など) を介する電気信号または通信メッセージとして直接アクチュエータシステムへ伝達されます。アクチュエータコントローラは、飛行制御コンピュータからの命令に応じてアクチュエータの位置を制御します。以上の技術的進化に加えて、技術的および商業的レベルでの 2 つの重要な変化が、アクチュエータシステムに大きく影響しました。第 1 の変化は、航空宇宙産業が、1 社のサプライヤからコントローラとアクチュエータを含む統合されたアクチュエータシステムを調達する方向に向かったことです。その結果、システム統合の責任はサプライヤ側に移行しました。このためサプライヤは、コンポーネントサプライヤから高度なシステムエンジニアリ

ング技術を有する大規模システムのサプライヤへと、自らを変革する必要に迫られました。第 2 の変化は、アクチュエータコントローラをアクチュエータと一体化するモジュール型分散システムへと流れが向かったことです。これにより、従来はすべてが機械的であった製品に、よりいっそうの電子技術とソフトウェア技術が導入されました。これらの変化とアクチュエータの技術革新の結果として、電気機械アクチュエータ (EMA)、電子油圧制御アクチュエータ (EHA)、電気バックアップ式油圧アクチュエータ (EBHA)、制御エレクトロニクス内蔵油圧アクチュエータなどの製品が生まれました。電動アクチュエータは航空機の非与圧部で使用されるため、アクチュエータサプライヤは高高度対応の高出力電子制御システムに関する技術を開発する必要がありました。これらの動向によってシステムとコンポーネントは大幅に複雑化し、高度な開発プロセスとテスト能力が要求されるようになりました。

### 最新アクチュエータシステムの開発プロセス

前述の通り、アクチュエータ単体から統合システムへの変革は、開発プロセスに新たな課題を突きつけます。特に要求管理、システムの解析と設計、システム統合、システムの検証と妥当性確認といった領域が課題となります。以下では、アクチュエータシステムの開発に関連するいくつかの課題の要点を示します。システムが複雑化するにつれて、要求管理とトレーサビリティが重要となります。このプロセスにおいては、システムレベルの要求を個々のコンポーネントレベルの要求に落とし込み、それらを各開発チームに適切に割り当てることが重要です。統合システムの要件を満たすには、各システムコンポーネントが必要とするすべての機能を備える必要があり、そのためには要求を各チームに適切に割り当てて指示を伝達することが不可欠です。また、すべてのシステムおよびコンポーネントの要件を適正に検証するために、要求トレーサビリティが重要なツールとなります。システムが複雑になると、システムレベルの解析と設計もより困難になります。シ

ステムの各コンポーネントを安全に動作させるには、効果的なシステム設計が必要です。多くの場合、これには故障を検出するためのシステムモニタ、システムの健全性を判定するためのビルトインテスト (BIT)、および冗長システムエレメントの動作を管理するためのロジックが必要です。設計および解析プロセスにおいては、個々のシステムコンポーネントの最適化だけでなく統合システムとしての最適化が図られるように統制が必要となります。システムが複雑化するほど、各コンポーネントをシステムレベルに統合した状態で正しく機能させるための工数が増大します。システムレベルの統合では、各システムコンポーネントをどのようにアクチュエータシステム全体に統合するのか、そしてアクチュエータシステムをどのように他の航空機システムと統合するのかといったことを定義し、テストします。ハードウェアおよびソフトウェアコンポーネントは、相互に作用することでシステムの安全性を確保しながら必要なシステム機能を実行する必要があります。システム統合では、設計プロセス全体を通してシステムの相互作用を管理し、最終的に



リモートエレクトロニクスを備えたアクチュエータ

ロータリー型のプライマリ EMA

リニア型のプライマリ EMA

EHA と EBHA

図 3 : 航空機のアクチュエータシステム

ラボ環境で実際のシステムを統合します。システム統合では、システムを動作可能な状態に構築するだけでなく、システムが不適正または危険な挙動を示さないことを確認するためのテストを実施する必要があります。システムに問題が見つかった場合、それらを解析して原因を追跡し、システムが安全に動作してシステム要件を満足できるよう対策する必要があります。システムを構築して統合した後は、システムが所定の要件を満たしていることを検証する必要があります。プロジェクトによっては、FAA (アメリカ連邦航空局) または EASA (欧州航空安全局) の航空機認証に対応するためのテストが必要です。認証においては、一般的にソフトウェアは DO-178 を順守する必要があり、複雑な電子ハードウェアは DO-254 を順守する必要があります。航空機アクチュエータシステムの開発プロジェクトでは、目的とする動作環境下でシステム性能と安全性を検証するために、広範囲に及ぶテストが必要です。システムが複雑化するほどテストも複雑になります。コンポーネント主体のテストでは、システム要件を十分に検証できません。システム挙動を検証するためにシステムにスティミュラスを与えてシステム応答を計測するには、複雑なラボ設備が必要です。検証および認証プロセスを完全に実施するには、正しい要件に対して正しいシステムを正しい方法でテストするための厳密な文書管理が必要となります。

図 2 : アクチュエータシステム開発におけるプロセス課題





「Moog 社は、1991 年から dSPACE Real-Time Testing システムを商用航空機、ビジネスジェット、無人航空機などの開発に活用しています。」

David Cook 氏、Moog 社

#### リアルタイムテストの用途と利点

前述の課題領域のシステム統合とシステム検証では、自動化したリアルタイムテストシステムの使用が効果的です。このため、Moog 社は開発プロセス全体を通して、これらのシステムをさまざまな用途で使用しています。リアルタイムシステムの用途として、いくつかの例を下表に示します。モデルベースのリアルタイムシミュレーションシステムによって、Moog 社のテストシステムの柔軟性が向上しました。Moog 社は、リアルタイムテストシステムを使用して、アクチュエータのテストではコントローラをエミュレートし、制御ソフトウェアのテストではアクチュエータをエミュレートし、統合システムのテストではシステム入力をエミュレートしてシステム応答を計測しています。さらに、自動化テスト

では、複雑なテストシーケンスを再現性の高い厳密に定義された方法で実行できます。これにより、システムの変更とバリエーションに関する回帰テストを短時間で実施できます。自動化され厳密な定義が可能なリアルタイムシステムでは、再現困難なテスト条件をラボ環境で実現することもできます。これは特に、より完全かつ綿密な FMET (故障モードとその影響のテスト) を可能にします。例として、アクチュエータの不具合条件をシミュレートすることで、コストのかさむテストハードウェアを必要とせずに、アクチュエータ関連の故障検出アルゴリズムをテストできます。これらの特長により、総合的なテスト能力が向上し、結果としてコストを大幅に節減できます。Moog 社は、1991 年から dSPACE の Real-Time Testing システムを活用し

ています。Moog 社は、大型商用航空機向けアクチュエータ製品の開発に初めて dSPACE テストシステムを導入しました。それ以来 Moog 社は、dSPACE Real-Time Testing システムをさまざまなプロジェクトにおいて幅広い用途で活用してきました。Moog 社は現在 20 ~ 30 のテストシステムを保有し、それらの適用範囲をさらに拡大しつつあります。dSPACE Real-Time Testing システムは V-22、F-117、B-2、X-35、F-35、A400M、KC-46、787、A350、無人航空機、ビジネスジェット、商用航空機などの開発プログラムで使用されました。

#### 適用例

Moog 社が複雑なアクチュエータシステムの開発に dSPACE ベースの Real-Time

テスト目的	用途	例
アクチュエータコントローラのエミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ アクチュエータ受入れテスト</li> <li>■ アクチュエータ認証テスト</li> </ul>	■ アクチュエータ受入れおよび認証テスト向け FCC アクチュエータ制御規則のエミュレーション
テストシステムの制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各種形態のテスト</li> </ul>	■ アクチュエータまたはシステムテスト用の動的負荷システムの制御
コントローラプロトタイピング	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ コンポーネント開発テスト</li> <li>■ アクチュエータ開発テスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ バルブテスト用制御ループの提供</li> <li>■ アクチュエータ開発用の制御プロトタイピング</li> </ul>
アクチュエータのシミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ コンポーネント開発テスト</li> <li>■ ソフトウェアおよびシステム統合と検証テスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ コンポーネントレベルテスト (EHA ポンプ) 用のアクチュエータシミュレーション</li> <li>■ システムまたはソフトウェアテスト用の機械的および電気的エレメントのシミュレーション</li> </ul>
外部システムのシミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ システムおよびソフトウェア統合と検証テスト</li> </ul>	■ 統合および検証テスト用の飛行制御コンピュータのシミュレーション

図 4 : Real-Time Testing の用途と利点





図 5 : dSPACE を使用してテストされた Moog 社製アクチュエータシステムを搭載した航空機

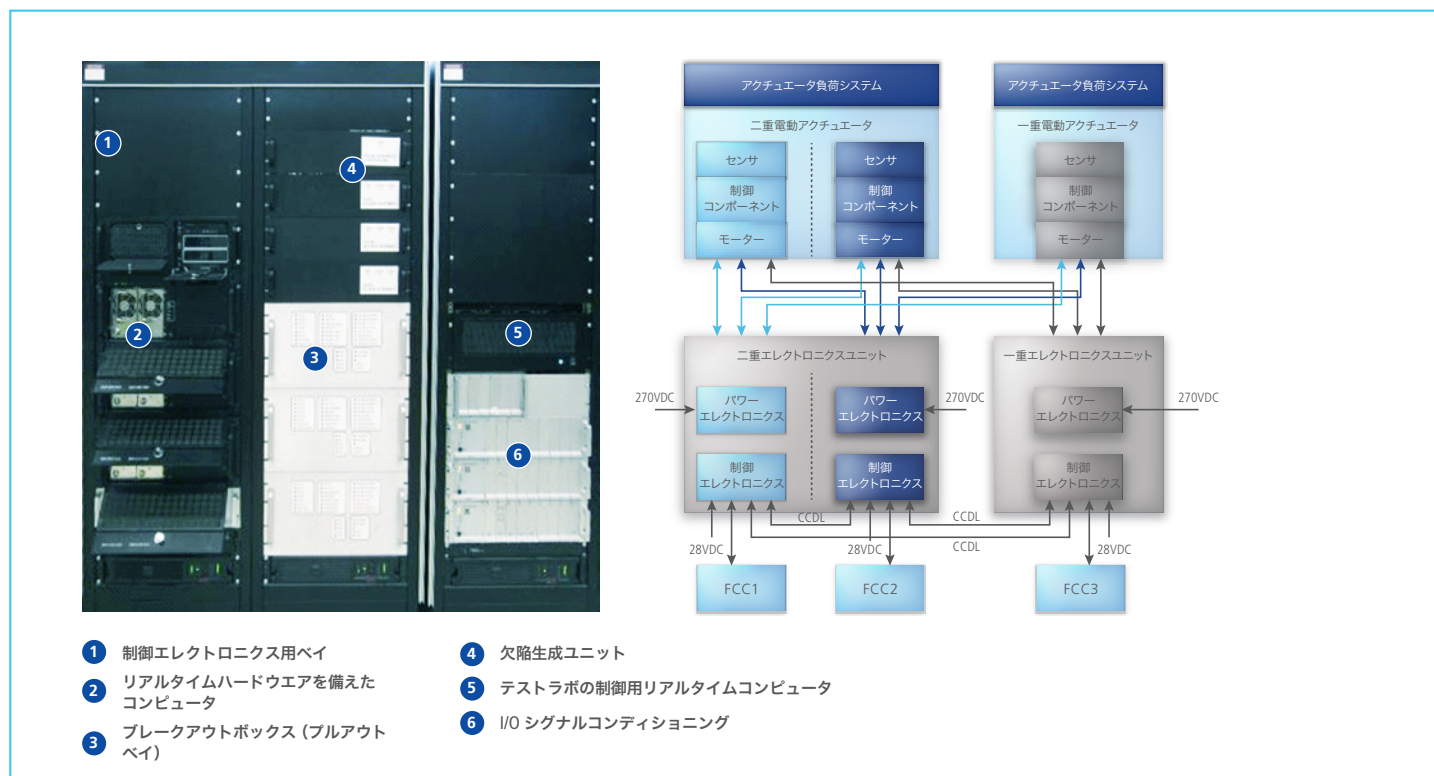


図 6 : 左 : 電動アクチュエータシステム向けのシステムソフトウェアワークステーション  
右 : 三重冗長電動アクチュエータシステムのテストにおけるワークステーションの使用

Testing システムを採用した 3 つの事例を以下に挙げます。

### 1. 電動アクチュエータシステム向けのシステムソフトウェアワークステーション

最初のテストシステム (図 6) は、三重冗長電動アクチュエータシステムのテストに使用されています。このテストシステムでは、ソフトウェアの検証と統合システムのテストが可能です。このシステムは、ソフトウェアテスト向けに HIL (Hardware-in-the-Loop) プラットフォームとして機能し、統合システムテストには計測、制御、およびデータ収集機能を提供します。ソフトウェアテストでは、三重冗長システムのパワーエレクトロニクスとアクチュエータのリアルタイムシミュレーションが可能です。

このテストシステムは、5 台のラックマウントシャシーに実装されたマルチプロセッサ構成の 7 枚の DS1005 プロセッサボードを含みます。ハードウェアには、欠陥生成機能を備えた 3 つの IEEE 1394 バスと、3 つの専用 CCDL バスも含まれます。モーター制御ソフトウェアにリアルタイムフィードバックを提供するために、高性能モーターモデルは 30kHz を超えるレートで実行されます。このシステムは 780 余りの I/O チャンネルを備えています。シミュレータ機能はソフトウェアテストと、再現困難な故障条件でのシステムテストに使用されます。これらのテストは自動化されており、バッチ方式で実行できるため、無人または遠隔監視によるテストが可能です。プラントをシミュレートすることで、

クローズドループ環境でソフトウェアをテストできます。このテストステーションにおける高忠実度シミュレーションは、システムラボでの問題解決に要する時間も短縮します。自動化ソフトウェアテスト環境を活用することで、システム構成あたりのソフトウェア検証に要する時間が 2 週間から 2 日に短縮されました。

### 2. 商用航空機制御システム向けのシステムソフトウェアワークステーション

2 つめの適用例 (図 7 ~ 9) は、商用航空機の飛行制御システム用のテストシステムです。最初の適用例と同様に、このテストシステムでも、統合システムのテストとソフトウェアの検証を 1 つのプラットフォームで実行できます。このテストシステムでは、

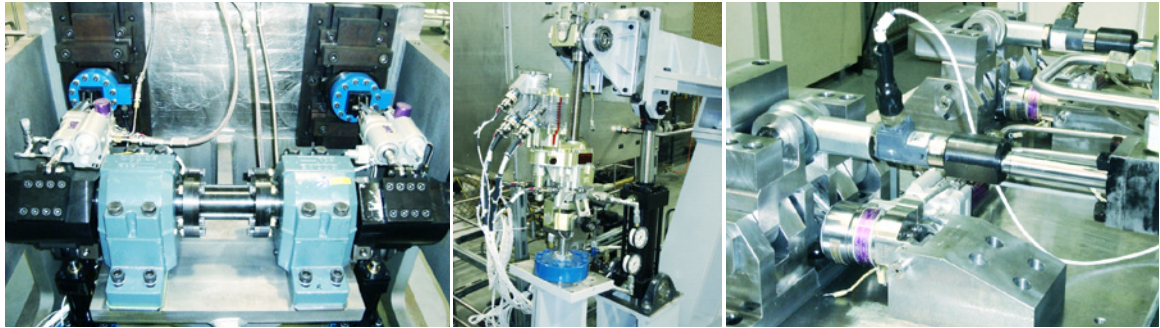


図7：商用飛行制御システム用アクチュエータのテストリグ（左：ラダー用アクチュエータのテストリグ、中央：HSTA テストリグ、右：スポイラ用アクチュエータのテストリグ）

実際のコンポーネントのテスト、個々のコンポーネントのシミュレーション、システム全体のシミュレーションを実行できます。このシステムでは、実際のパイロットからの操舵入力を使用することも、シミュレートした操舵入力を使用して同一条件のテストを繰り返し実行することもできます。テストラボは各種のアクチュエータハードウェアと、それらに対応するアクチュエータテストリグを備えています。さまざまなアクチュエータテストリグがテストシステムに接続されます。テストシステムは、それらのアクチュエータテストリグを制御および監視します。テストハードウェアとテストリグの例を下に示します。この適用例の飛行制御システムは、高揚力装置の操縦翼面も制御します。高揚力装置のテストリグ

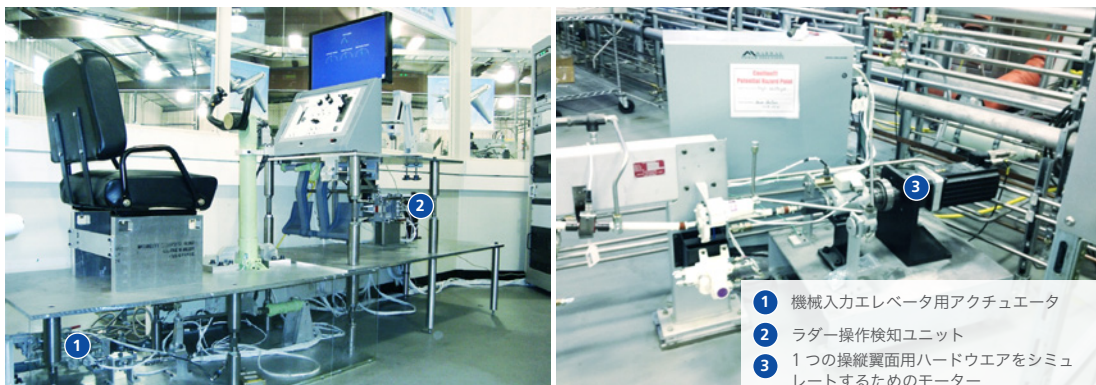
は、下に示すように、1つの操縦翼面を駆動するためのハードウェアを備えています。他の操縦翼面は、負荷モーターとリアルタイム制御を使用してシミュレートされます。このような構成により、ラボ内のテスト装置の設置スペースを削減できます。また、実際のハードウェアでは再現困難な複雑な不具合発生シナリオをテストすることも可能です。このシステムは、マルチプロセッサ構成の7枚のDS1005プロセッサボード、16 Tx/RxチャンネルのARINC 429、シミュレーションと実際のハードウェアの切り換え用リレー、約400チャンネルのI/Oを収めた2台のPX20シャーシで構成されます。このシステムは欠陥生成機能を備えており、テスト環境内の各種テストリグを単体またはシステムとして使用

できます。自動化テストにより、ソフトウェアおよびシステム要件の公式な検証が可能です。このクローズドループ環境は、統合システムと組み込みソフトウェアに効果的な開発および認証プラットフォームを提供します。

### 3. ポンプテスト用の仮想電子油圧制御アクチュエータ (EHA)

このシステム（図10）は、飛行制御EHA用ポンプの開発向けに優れたテスト能力を提供します。飛行制御EHAの油圧ポンプには、断続使用、動作と負荷の反転、高加速度といった特異な要求が課せられます。アクチュエータレベルのデューティ比からポンプのデューティ比を導出することは、大幅な不確実性を伴います。そのた

図8：左：等価制御と飛行制御ハードウェアを備えたパイロット操縦ステーション  
右：商用飛行制御システム用高揚力装置のテストリグ



- ① 機械入力エレベータ用アクチュエータ
- ② ラダー操作検知ユニット
- ③ 1つの操縦翼面用ハードウェアをシミュレートするためのモーター





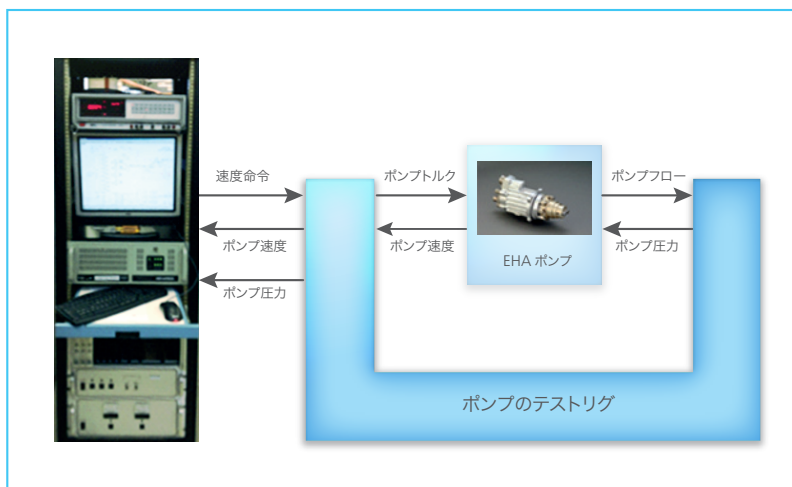
- ① 高揚力装置用モーター制御のシミュレーション
- ② シミュレータ I/O のコンディショニング
- ③ dSPACE PX20 拡張ボックス
- ④ リレーコントローラ
- ⑤ テストリグ用負荷制御
- ⑥ FIU/ 切り換えリレー
- ⑦ シミュレータ負荷
- ⑧ ARINC 相互接続

図 9：商用飛行制御システム用テストシステムのハードウェア

め、ポンプ寿命テスト用のテストシステムとして仮想 EHA がモデル化され、新型 EHA ポンプのリスク緩和テストに使用されました。このテストシステムは、アクチュエータ内で動作中のポンプに生じる条件と等価なテスト環境を提供します。仮想 EHA を組み込んだリアルタイムテストシステムを使用することで、寿命期間を通してのポンプ特性に関連する多くの不確実性が取り除かれ、正確で有意な結果が得られました。■

David Cook 氏,  
Moog Aircraft Group

図 10：電子油圧制御ポンプ用のテスト環境



## まとめ

現在のアクチュエータシステムは、アクチュエータ装置とエレクトロニクスおよびソフトウェアの統合によって、大幅に複雑化しています。電動アクチュエータ化の動向により、アクチュエータシステムの開発にはモーター制御技術が不可欠となりました。これらの技術進化により、飛行制御アクチュエータシステムの開発に新たな課題がもたらされました。dSPACE テクノロジに基づく Real-Time Testing システムが備える優れたテスト能力により、Moog 社は複雑なアクチュエータおよび飛行制御システムの開発に伴う厳しいテスト要求を満たすことができました。

David Cook 氏  
Moog Inc.  
(米国、ニューヨーク州、イーストオーロラ)  
システムエンジニアリングマネージャ

