



先進エクササイズマシンの開発

# Smart Training

クリーブランド州立大学の研究者は、スポーツの練習やリハビリ、さらには宇宙空間でのエクササイズなどに使用できる新しいタイプのエクササイズマシンを開発しています。ここでは、dSPACE MicroLabBox を使用して計測データを収集し、ユーザーごとに調整可能なマシンプロトタイプを操作しています。





エクササイズマシンの歴史は、少なくとも産業革命の時代にまで遡ることができます。それ以来、エクササイズマシンはさまざまな進化を経て洗練され、抵抗力、速度、および心拍数レベルなどの重要なインジケータを備えた電子ディスプレイまでを含むようになりました（図 1）。エクササイズマシンは、筋力を強化する場合のウェイトリフティングマシンや有酸素運動を行う場合のローイングマシンやトレッドミルなど、目的に応じて個別に設計されており、リフティングマシンではウェイトの量を選択でき、ローイングマシンでは抵抗力を調整できます。しかし、運動への抵抗という性質（機械インピーダンス）は常に同じです。

#### 目的：個別の用途に応じた機械インピーダンスの調整

クリーブランド州立大学では、機械インピーダンスが固定されていると最も効率的にトレーニングを行うことはできないという事実を解明するため、エクササイズマシンに関する研究プロジェクトを開始しました。たとえば、リハビリ用マシンの目的は、使用者に対して抵抗力を提供するだけでなく、その運動の支援となることであり、療法士や医師がマシンをプログラムしてカスタマイズし、単一の運動サイクル内、単一のセッション内、あるいは長期的なリハビリテーションプログラムの一環として、抵抗力と運動支援をバランス良く行えるようにすることが重要です。また、宇宙飛行士が宇宙空間での滞在中にウェイトリフティングマシンを使用する場合、浮遊する機材は厳しい質量および体積上の制約にさらされており、抵抗力を提供するには電力制御が必要です。これらのすべての要件が示しているのは、抵抗力を利用した運動の場合でも有酸素運動の場合でも同じハードウェアを使用する必要があるということです。クリーブランド州立大学の研究

&gt;&gt;





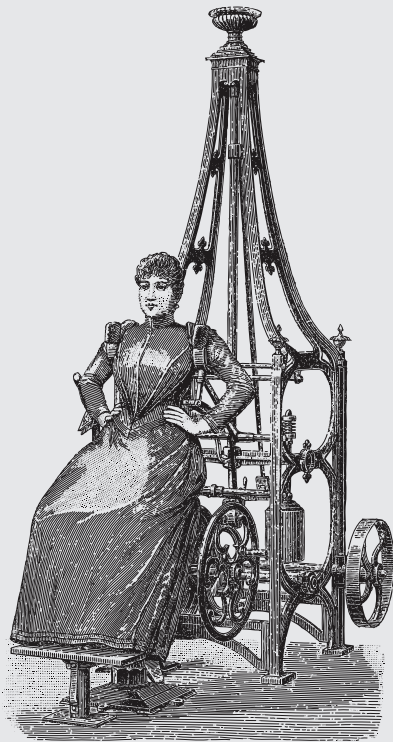


図1：エクササイズマシンは外観が洗練され、インタラクティブな操作性において進化を遂げましたが、大半のマシンの機械的機能は実質的に変わっていません。

チームはNASA グレン研究センターで行われているエクササイズ対策プログラムとの共同研究により、これらの厳しい仕様を満たすエクササイズマシンの設計を行いました。また、同チームはエネルギー再生制御に関する専門知識を活用して、ローイングマシンの機能的な拡張も行いました。このローイングマシンでは、機械インピーダンスをプログラミングすることができ、使用者の動作だけで完全に電力を供給することができます。この電力自給機能はさまざまな利点を提供します。たとえば、宇宙船の送電システムから電力供給を受ける必要がなくなり、場合によっては余剰エネルギーを船内に供給することもできます。

#### 先進エクササイズマシンの特性

モーターおよび制御システムによって継続

的に機械インピーダンスを調整できる先進エクササイズマシンを上述の用途で使用するためには、マシンに次のような特性が求められます。

- 直接感知方式を採用し、モデルベースの評価システムと組み合わせることで、人体の現状のパフォーマンスに関する詳細な情報をリアルタイムで生成できる
- 人体のパフォーマンスを表示するインジケータにより、マシン自体が機械的特性を修正し、事前に設定された目標を最大化することができる
- 使用者が最適なリアルタイムキューを生成して、機械的出力を調整できる
- 最優先の安全基準により、人と機械の目標間の矛盾に対して監視、管理、および解決を行うことができる（図2）

#### 課題

新たに開発したマシンでは、単一の運動サイクルや長時間の運動に応じて機械インピーダンスが変化しますが、開発者は、そのような変化により身体（特に筋肉の強化という測定ターゲット）に影響が出ることを十分に理解しておく必要があります。それを理解しないと、機械インピーダンスの変化により人体に有益な影響を与えるうえでの究極の基礎となるモデリングは実現しません。また、モデルを実装する際は、エクササイズ実施者およびマシンの現状に関する情報に基づいて最適なインピーダンス調整を行い、マシンの制御システムからモーターに適切な命令を出すことにより、これらの変更をマシン全体に適用できるようにする必要があります。



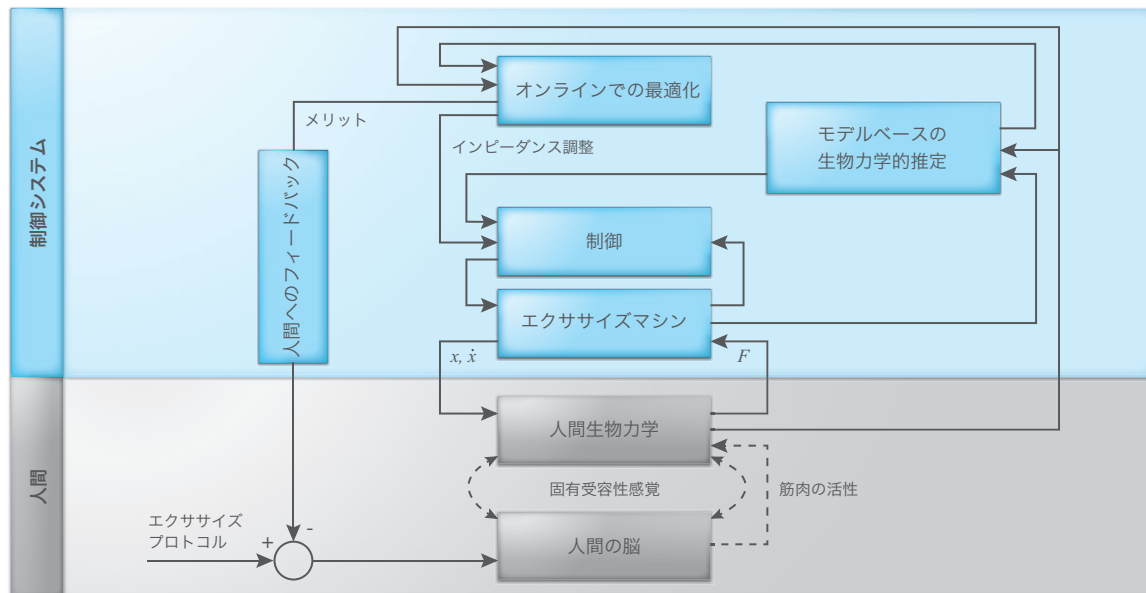


図2：先進エクササイズマシンの機能的コンセプトを示したブロック線図。システムがキューを生成して使用者の動作を修正します。これらの変化はシステムによって機械インピーダンスの変動として出力され、最適な性能を実現します。

**最適なエクササイズ**

エクササイズには、目標に応じた最適値があります。ダイエットの場合、可能な限り多くの筋肉に最適に負荷を分散させ、持久力が最大化されるようにするエクササイズが必要です。リハビリやボディビルディングでは、1つの筋肉群の強化が目標となる場合があります。ハムストリングなど、1つまたは複数の関節にまたがる筋肉の場合、最適なエクササイズをすぐに設計することはできません。また、トレーニングの刺激に対する反応には個人差があるため、個々のニーズに合わせて調整したエクササイズプログラムを作り出すことが重要です。アスリートであれば、個別の生理機能に適した負荷のみを提供して、怪我を排除しつつトレーニングの成果を最大化できるよう最適に制御されたエクササイズシ

テムを使用することが必要ですが、年配の方やリハビリ患者では、筋骨格系の問題を正すための安全なエクササイズが必要です。

**生物学的モデリング**

先進エクササイズマシンでは、制御システムによって運動と抵抗力が継続的に監視されます。このデータは、筋肉における運動と抵抗力を推定するのに利用され、エクササイズの評価や、トレーニングに関する使用者へのリアルタイムでのフィードバックに活用されます。エクササイズのパフォーマンスを評価する場合、筋骨格力学の詳細な数学モデルだけでなく、データが不完全でノイズを伴っていたりモデルに欠陥がある場合でも信頼性の高い結果を生み出せる十分に堅牢な状態推定技術

も必要であり、それらを組み合わせる必要があります。評価モデルの妥当性確認は、モーションキャプチャおよび筋電図検査 (EMG) 記録によって行います。

**状態の推定**

求められる成果を達成できるようにシステムを制御するには、まずシステムパラメータ、未計測の入力値、およびシステムの内部状況や状態といったシステムで観測できていない一部の数値をコントローラによって推定する必要があります。エクササイズマシンでは、これらの数値はユーザが印加する力、摩擦パラメータ、筋肉の活性信号など多岐にわたります。研究チームでは、カルマンフィルタを使用してこれらの数値をシステムで推定したり、無香カルマンフィルタおよびH無限大フィルタなどのさらに

>>

「dSPACE MicroLabBox を使用することで、初期データの収集とマシンプロトタイプの操作をリアルタイムで容易に行うことができました。このため、制御アルゴリズムの実装時の瑣末を気にすることなく、アルゴリズム自体に集中することができました」

Hanz Richter 氏、クリーブランド州立大学



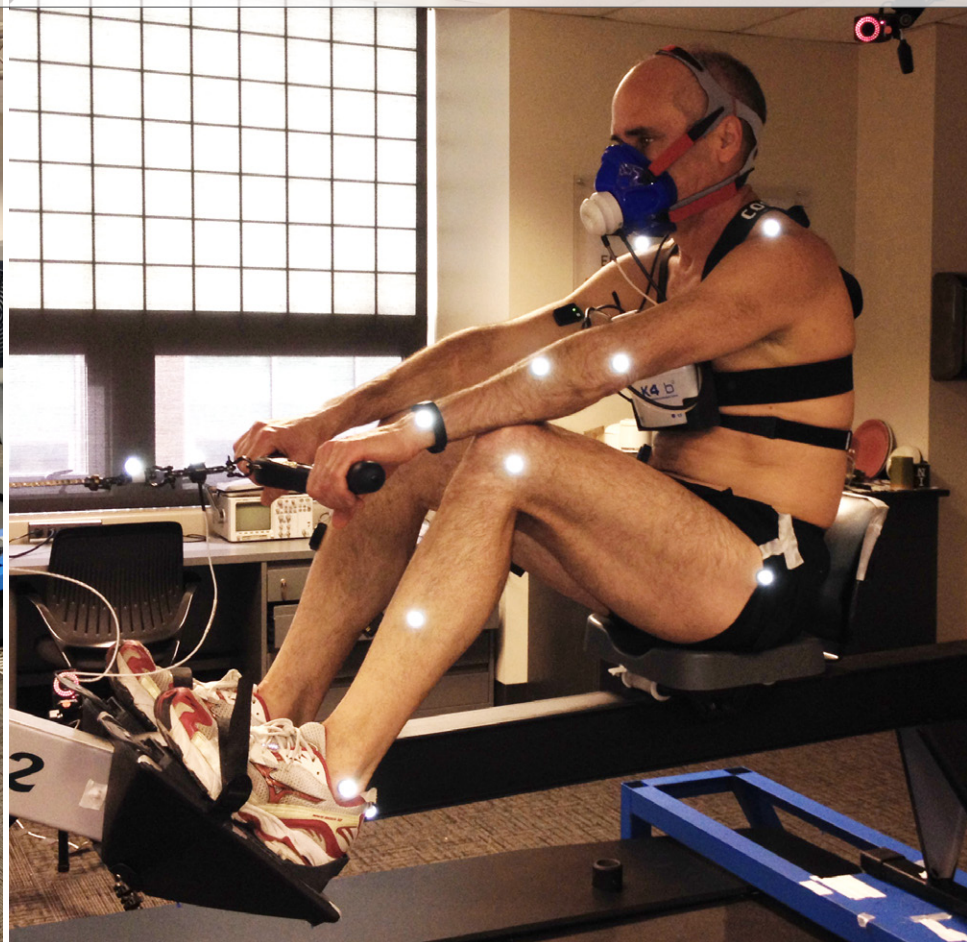


図3：試験中は dSPACE MicroLabBox (左図) により、16 チャンネルの筋電図検査 (EMG) データとマシンの機械的データが 1 kHz のサンプリングレートで収集されます。別のシステムでは、視認可能なマーカー (光の点) と代謝データを使用して運動データを収集します。すべてのシステムから取得したデータは、オフラインの後処理によって同期化されます。

高度な推定技術を併用したりすることも予定しています。

### 最適化

使用者が最も効率的に運動を行えるようにするには、マシンの設計自体、推定技術、制御アルゴリズム、および制御目標までも含む、エクササイズマシンの複数のコンポーネントの最適化が必要です。しかし、システムコンポーネントの多くが計測不能であったり、システムコンポーネントの一部が経年や外部環境要因によって変化したりする場合もあり、人体モデルを作成しても、マシンの使用者の変遷に伴い、そのモデルは確実に時間と共に変化していきます。研究チームでは、最適化に関わるさまざまな問題に対応するソリューションセットを搭載した進化した高速アルゴリズムを活用することで、モデルの最適化を行おうとしています。このアルゴリズムでは、可能性のある複数のソリューションをリアルタイムでテストおよび評価し、慎重に計画された方法に基づいてソリューション間で相互に情報交換を行うことにより、パフォーマンスを最大化できるようにします。

### MicroLabBox によるリアルタイム制御

新たなマシンの開発においては、使用者の安全を保証しつつ、最適な機械インピーダンスの変動を生み出すことができるモデルベースの制御アルゴリズムを特定する必要があります。そのため、研究チームは、受動性および極値探索制御を含む理論を開発フレームワークの一部として活用しました。これらの理論をリアルタイムで実装するには、高度なユーザインターフェースを提供しながら、高性能なデータ取得機能、および複数チャンネルのアナログデータに高速に対応できる制御システムが必要だったため、研究チームは dSPACE MicroLabBox を使用して初期データの収集と最終的な機械プロトタイプの実装をリアルタイムで行うことにしました (図3)。また、既存の MATLAB®/Simulink® シミュレーションモデルをリアルタイムインターフェースへと容易に変換できる試験用ソフトウェア ControlDesk を使用することで、データ収集とリアルタイム制御試験の準備を迅速かつ効率的に行うこともできました。このため、研究者達は制御アルゴリズムの実装時の瑣末を気にすることなく、アルゴリズム自体に集中することができました。

### ローイングマシンでの初試験

研究チームは、プロジェクトの第1段階において、ローイングマシンでのエクササイズに重点的に取り組み、従来のマシンを使用した場合のこのエクササイズについての幅広い知見を得ることにしました。ここでは、研究文献で入手できるデータだけでなく、エクササイズマシン固有のデータや人体固有のデータを収集することが必要でした。マシン固有の変数には、プルチェーンに対する力とマシン内部の回転コンポーネント、すなわちチェーンプロケットとフライホイールの速度が含まれます (図4)。人体固有のデータはさらに幅広く、運動、筋肉の活性、および代謝データという3つのグループに分類することができます。データ収集試験は、van den Bogert 博士のヒューマンモーションおよび制御ラボで行われました。ラボには Cortex ソフトウェアを搭載した10台のカメラによるモーションキャプチャシステム (Motion Analysis 社) が実装されており、筋肉の活性データの収集には16チャンネルのワイヤレス EMG / 加速度計システム (Delsys 社) を使用しています。筋骨格系のモデリングおよびシミュレーショ



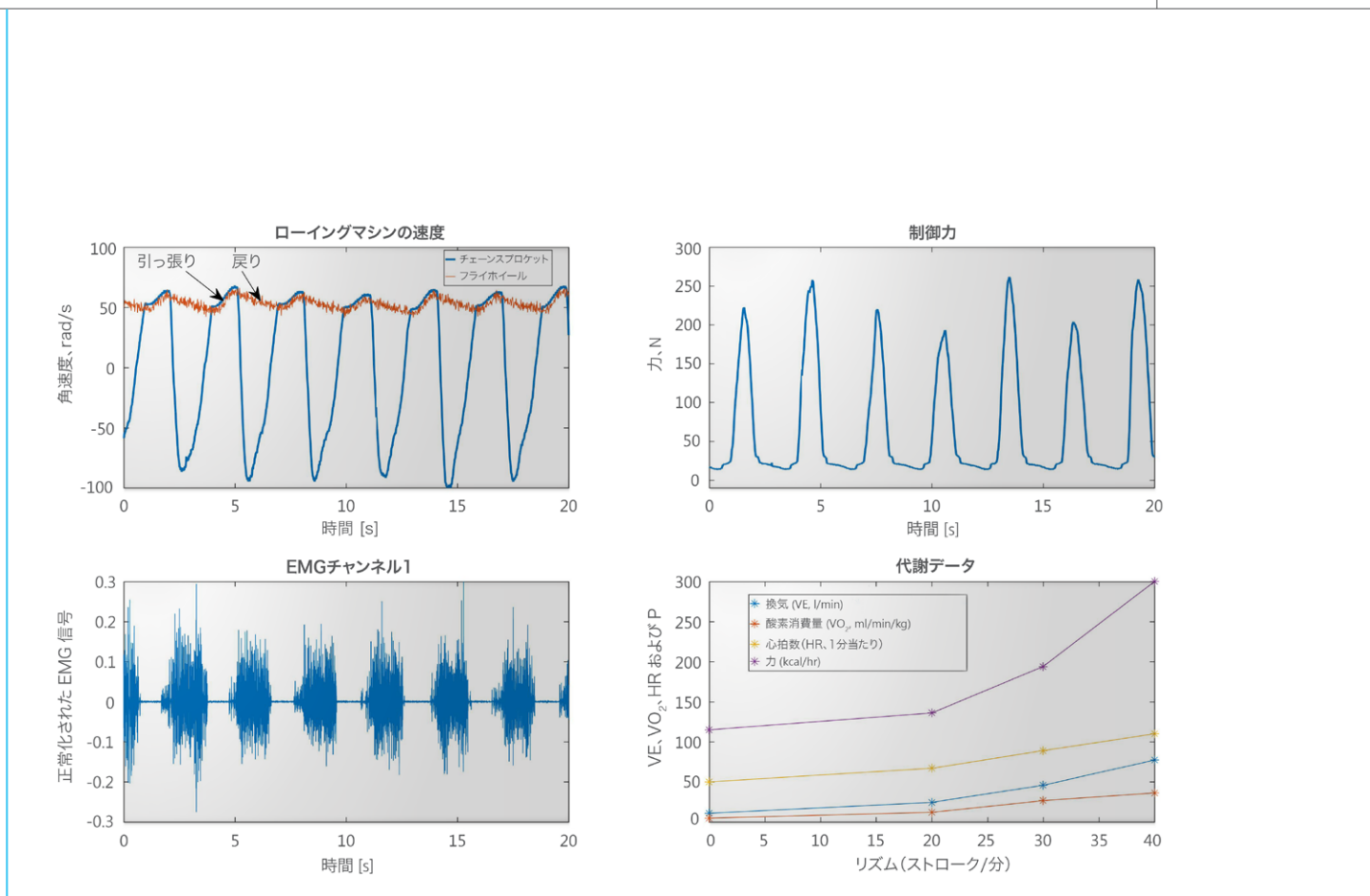


図4：サンプルデータセット（マーカーデータを除外）。チェーンズプロケットとフライホイールは引っ張り時に同じ速度となり、戻す際に分離されます。代謝データでは、さまざまなリズム（ストローク/分）と休止の試験がプロット表示されます。

用ソフトウェアツールには、OpenSim、Autolev、MATLAB、IPOPT、SNOPT、GPOPS、および内製コード（MATLAB および C++）が含まれており、筋骨格力学および最適化基準の直接転写を利用した予測シミュレーションを実行します。これらの試験から作成されたデータは、生物力学的モデルの構築および妥当性確認、モーター駆動型マシンの設計に活用されています。■

Hanz Richter 氏、クリーブランド州立大学



図5：研究チーム（左から）：Hanz Richter 博士（准教授、機械工学）、Antonie van den Bogert 博士（教授、機械工学）、Kenneth Sparks 博士（教授、人間行動学）、および Dan Simon 博士（教授、電気工学およびコンピュータ科学、大学の研究担当副学長）