

Menu
▼ Home
自己紹介
実績
マラソン記録
リンク
▼ Welcome to my home page (English)
Career
Publication
▼ OpenSim Tutorial
▼ 入門編
1. チュートリアル I - 筋骨格モデル入門
2. チュートリアル II - 腰移行手術のシミュレーションと解析
3. チュートリアル III - スケールリング、逆運動学、逆動力学
4. サッカーキック
5. 足関節損傷予防シミュレーション
6. 運動代謝コスト
7. ダイナミックウォーキングチャレンジ
8. 静的最適化
▶ 中級編
▶ 上級編
サイトマップ

8. 静的最適化

このページは [Working with Static Optimization](#) に対応しています
 OpenSim3.3以降のバージョンを用いてください。
 古いバージョンを使用している方は [ホームページ](#) から新しいバージョンをしてください。

概要

静的最適化は動作の姿勢、速度、加速度、外力（床反力など）と力学的に一致するモデルの筋活動や筋張力を計算する方法です。「静的」としているのは動きを時間積分するのではなく、時間フレームごとに計算を行うためです。積分を行わないため、静的最適化では計算速度が速くなりますが、筋活動ダイナミクスと腱のコンプライアンスは無視されます（[Hicks et al](#)の文献で詳細を読むことができます。）。このチュートリアルではサンプルモデル（gait10dof18musc）を用いた歩行解析により静的最適化の使い方を学び、腓腹筋の活動と発揮張力を調べます。他の解析やシミュレーションと同様に、静的最適化の結果は用いるモデル・動作・外力のデータによって大きく変わります。測定から得られたデータを元にして身体質量、長さ、筋力をモデルに入力することはできますが、関節自由度、筋の走行は解析内容に合わせて適切な状態へ変更する必要があります（例：上肢運動の解析では上肢筋や上肢の骨格情報が必要）。動作解析には身体の加速度や加わる外力の情報が必要であり、正確に計測した値をモデルに与えることが重要です。生体内部に仮想の力（reserve actuator や residual force or actuator）が必要になることもあります。このチュートリアルでは下記内容を行います。

- エラーメッセージやクラッシュなく静的最適化を実行する。
- 修正した動作データにより筋活動や力解析データの質を上げる。
- リザーブアクチュエーター、リジデュアルフォース、リジデュアルアクチュエーターの発揮出力を減少させる方法を学ぶ。
- 足部スプリングを追加し、筋活動の変化を調べる。

始める前に

(1) 下記ユーザズガイドやチュートリアルを参照して理解を深めてください。

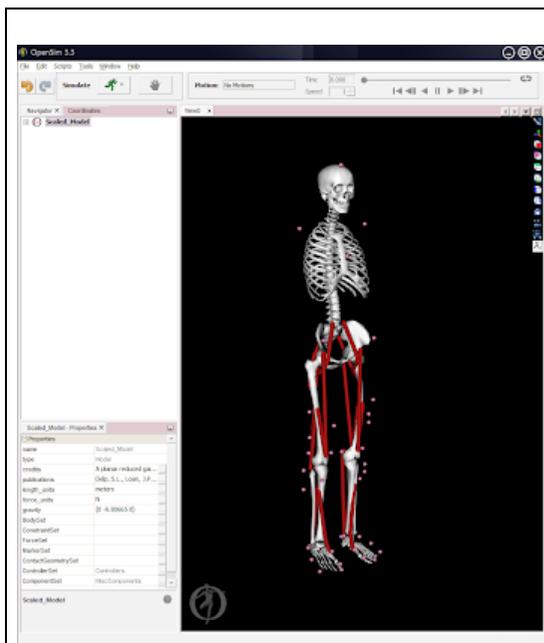
ユーザズガイド	チュートリアル	その他
静的最適化 逆運動学 Residual Reduction Algorithm グラフィックユーザーインターフェース (GUI) 外力の追加	チュートリアル 1 , 2 , 3 運動代謝コスト 足関節損傷予防シミュレーション	Is My Model Good Enough? Best Practices for Verification and Validation of Musculoskeletal Models and Simulations of Movement

(2) オープンシム3.3以降のバージョンをダウンロードしてください。

(3) WorkingStaticOptimizationExampleフォルダのモデル、セットアップ、データファイルを探してください(ダウンロードは[こちら](#))。このフォルダにはスケーリング後のモデル、外力、動作(逆運動学解析後)、筋活動テンプレートファイルとRRAの結果が保存されています。

Study 1: 静的最適化でエラーメッセージが出る!

Study1ではモデルを読み込み、セットアップファイルを作成して、静的最適化を行います。そして、その次に静的最適化処理に出るエラーに対する対処方法を学びます。



オープンシム立ち上げ、StaticOptimizationTutorialフォルダからsubject01.osimを読み込んでください。

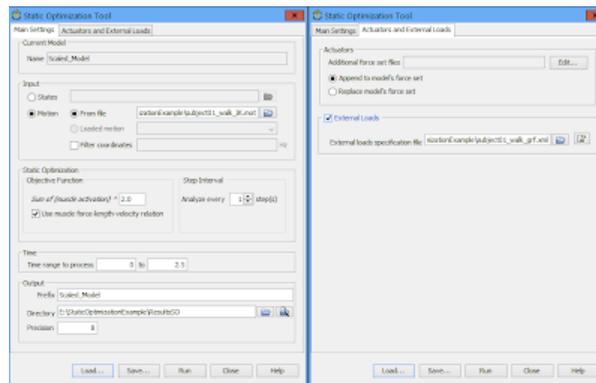
このモデルは二次元の簡易モデルであり、矢状面上を動く関節と筋を有します(内側腓腹筋と外側腓腹筋は一つの腓腹筋にするなど簡素化しています)。

ドロップダウンメニューのTool > Static Optimizationから静的最適化ツールを開いてください。

静的最適化の実行には (i) モデル (ii) 動作 (iii) 床反力などの外力の3つの項目を入力する必要があります。

ツールではカレントモデルを操作します。モデルは決まっており、残りの動作と外力を指定する必要があります。

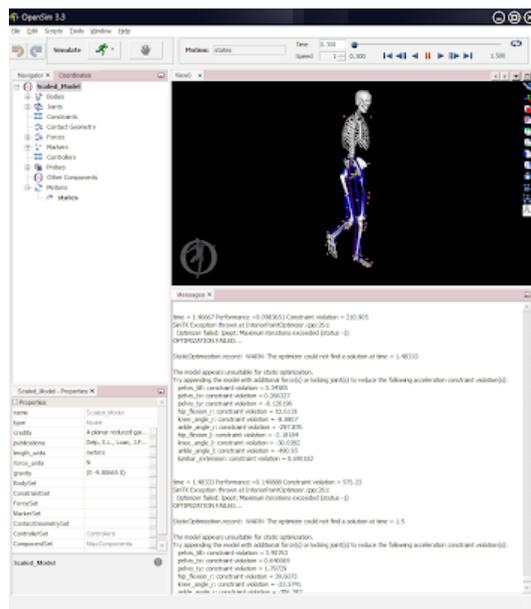
・フォルダ内のsubject01_walk_IK.motは逆運動学計算後のファイルであり、この動作データを用います。MotionのFrom fileでフォルダをクリックしてファイルを選択してください。Filter Coordinatesはそのままにしてください。(Study 2で行います)



詳細は画像をクリックしてください

- ・解析区間は0.3秒から1.5秒とします。Time range to processボックスに数値を入力してください。
- ・カレントフォルダの下に新しくResultsSOフォルダを作成して結果を保存します。OutputのDirectoryでファイルボタンを選択し、ResultsSOフォルダを作って出力フォルダを選択してください。
- ・ツールボックス上のActuators and External Loadsタブをクリックすると外力を選択することができます。External Loadsボックスをオンにしてから、subject01_walk_grf.xmlを指定してください。ボックス右の鉛筆をクリックすると外力ファイルの詳細を確認できます。外力データファイル、フィルター、外力の生じるセグメント等を指定できます。詳細は[このページ](#)を参照してください。
- ・SaveからセットアップファイルをStaticOptimization_Setup.xmlとして保存してください。その後Runをクリックして解析を実行しましょう。Closeからツールボックスを閉じてください。

入力した動作の時間フレームごとに解析が行われます。
時間ごとにモデルの関節角度、外力、筋出力、筋活動が計算されます。

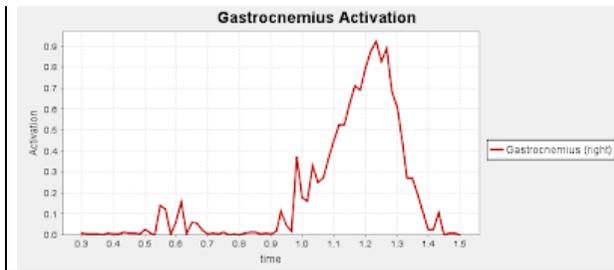


詳細は画像をクリックしてください

解析の実行中GUIのMessageウィンドーに右図のような出力「StaticOptimization.record: WARN- The optimizer could not find a solution at time = 1.46333」が表示されます。最適化計算に時間がかかるため、解析速度は遅くなります。

最適化が終了すると結果がResultsSOフォルダに保存されます。

- ・ドロップダウンメニューからPlotを開いてください。
- ・Scaled_Model_StaticOptimization_activation.stoファイルを解析します。
- ・Y-QuantityのLoadFileからResultsSO内の_activation.stoファイルを選択してください。
- ・右足の腓腹筋 (Gastrocnemius) をプロットするため、gastroc_rチェックボックスをオンにしてOKを押してください。



- ・ X-QuantityはTimeとし、Addを押すとグラフが表示されます。
- ・ プロットを最小化してください。後ほど使用します。

何が起きているのでしょうか？

エラーメッセージ "Optimizer Failed..." は最適化処理において時間内に適切な解を求めることができなかったことを意味しています。静的最適化では骨格モデルの加速度に応じて筋活動や筋出力を計算します。モデルの加速度を発生させる力を求めることができない場合は、このエラーが表示されます。静的最適化ツールはトラブルの対処の必要性を表示しています。解析結果はファイルに出力されますが、これは正しい値ではありません。修正する必要があります。

今回使用した低駆動モデルは、外力に対して十分な力を出力できない筋があったり、もしくは筋やアクチュエーター持たない関節があったりします。腰椎の屈曲伸展を制御する筋はなく、下肢筋が体幹運動を制御しようとしませんが、十分に補うことはできていません。

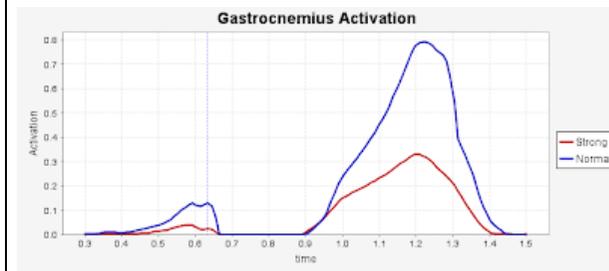
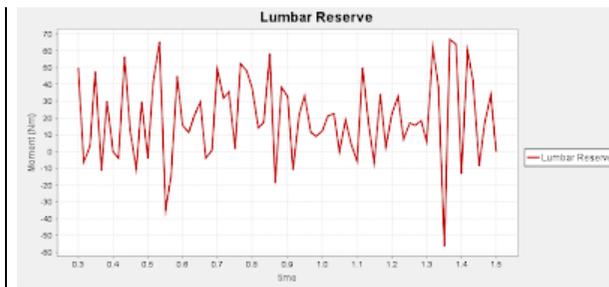
この問題を解決するため、腰部関節に新たな筋を作成します。このチュートリアルでは腰部に筋を作成することで、腓腹筋の活動がどのように変化するかを調べます。今回は腰部筋を追加する代わりに、腰椎に回転力を与えるトルクアクチュエーターを作成します。

まず、モデルにリザーブアクチュエーターとリジデュアルアクチュエーターを追加します。リザーブアクチュエーターは筋が十分な加速度を発生できない時に追加的にトルクを発生する機能を持ちます。リジデュアルアクチュエーターは $F=ma$ の力学的平衡性を保証するために、モデル・計測動作・外力の力学的不一致を修正します。本来は生じていない力を仮想的に発生させるため、いわば「神の手」による力と言えるでしょう。詳細は [RRA](#) を参照してください。

これから腰椎にアクチュエーターおよび骨盤にリジデュアルアクチュエーターを作ります。そしてその後には解析を再度行います。：

- Static Optimization ツールを再度開き、保存したセットアップファイルを読み込みます。
- Actuators and External Load タブを選択し、表示される Actuators 入力ボックスからアクチュエーターを追加することができます。Edit, Add を順にクリックし、フォルダから gait10dof18musc_Strong_actuators.xml を選択して OK を押してください。アクチュエーターファイルは各身体部位にあるアクチュエーターの設定を保存したファイルです。（このファイルではリザーブアクチュエーターとリジデュアルアクチュエーターがセッティングされています。リザーブアクチュエーターは骨盤、リジデュアルアクチュエーターは腰部、股、膝、足関節に追加します）
- 現在ある筋のセットに新たにアクチュエーターを追加するので、Append to model's force set を選択しましょう。
- 結果を上書き保存しないように、出力フォルダを ResultsSO_StrongActuators に変更します。Output, Directory から新しいファイルを作成して保存先を設定してください。
- 新しいバージョンのセットアップファイルを保存してから解析を行ってください。GUI のメッセージウィンドウを見るとエラーメッセージが消えています。モデルが十分な力発揮できたことがわかります。

始めに、Scaled_Model_StaticOptimization_force.sto ファイルから腰部のリザーブアクチュエーターの出力トルクをプロットしましょう。ファイル_actuation.sto を開いて lumber_extension_reserve を選択し、プロットを作成してください。



次に、先ほど作成した腓腹筋活動と比較をするため、新しく腓腹筋活動のプロットを作成してください。

図からは腓腹筋活動が減少していることがわかります。

新たに作成したアクチュエーターがトルクを発揮したことで、筋活動は減少しています。

右足関節のリザーブアクチュエーターが出力するモーメントをプロットしてください。また、リジデュアルアクチュエーターのFx, Fy, Fzを別の図で表示してください。

これで、静的最適化が実行できました。今回の解析で、正しい結果を出力できたわけではありません。むしろ、これで結果の精度を改善する準備が整った段階にあります。これからより精度の高い結果を得るために、入力データの質を高めることをに挑戦します。Questionを読んで、現在の解析結果の問題を理解してください。

Questions:

- 活動量と発揮筋力はスムーズな曲線ではなく、ノイズがのったギザギザした曲線になっているはずですが。なぜこのようになると思いますか？ Study 2で解説します。
- リジデュアルアクチュエーターのMz（横断面上で骨盤に生じる仮想の回転トルク）は $\pm 50\text{Nm}$ にあります。FxやFyはどうでしょう？床反力のピーク値と比較してどの程度の大きさになりますか？どの入力データ（モデル、動作、外力）がこの値を減らして、解析の精度を改善できるでしょう？ Study 2で解説します。
- 逆動力学解析では足関節のピークモーメントは 120Nm でした。足関節のリザーブアクチュエーターが出力するトルクは足関節モーメントと比較してどの程度（%）になりますか？リザーブアクチュエーターの出力はどのように大きくてもいいでしょうか？どのように解決しますか？ Study 3で解説します。

Study 2: 運動学データの改善

入力する動作データの改善によって、静的最適化で計算される筋活動と発揮筋力がどのように変わるかを調べるのがStudy2の目的です。ノイジーな加速度データを入力値として用いた場合、筋活動や発揮筋力もノイジーな結果となります。このため、Study1でノイジーな筋活動と筋出力はノイジーな動作データの結果と考えられます。今回は2つの方法で動作データの質を改善します。

- (i) 動作データのフィルタリング
- (ii) Residual Reduction Algorithm (RRA)を使ったスムージング

加速度のノイズを減らすため運動学データにフィルターをかけると、動作データはスプライン曲線を描き、関節角度にもフィルター処理がかかります。静的最適化の入力値として逆運動学データを用いる際に、オープンシムのフィルター機能や他のソフトウェア (MatlabやPythonなど) を使うことでフィルターをかけられます。

順動力学シミュレーション (加速度の時間積分で生成される動作シミュレーション) でRRAを使う場合、出力される動作は静的最適化で用いた動作の加速度にほぼ一致します。RRAの結果を用いる場合にはフィルターをかける必要はありません。RRAを用いると「動的に一致した」モデル・動作・力を作成できるメリットがあります。このチュートリアルではRRAの詳細な説明はしていませんので、RRAを詳しく知りたい場合は [User's Guide](#) を参照してください。また、RRAの使い方を知るには、チュートリアル中級編 *The Strength of Simulation: Estimating Leg Muscle Forces in Stance and Swing* を行ってください。

これから下の2つの静的最適化を行います；

(i) 始めにStudy1で用いたセットアップ・動作データ・アクチュエーターを用いますが、今回は以下の手順で行ってください。

- セットアップファイルを読み込みます。リザーブアクチュエーターとリジデュアルアクチュエーターが追加されているファイルであることを確認してください。
- フィルターFilter coordinatesボックスにチェックを入れ、デフォルトの6Hzをカットオフ周波数としましょう。
- output directoryをResultsSO_StrongActuators_Filterに変更して (新たにフォルダを作成)、逆動力学解析を行ってください。

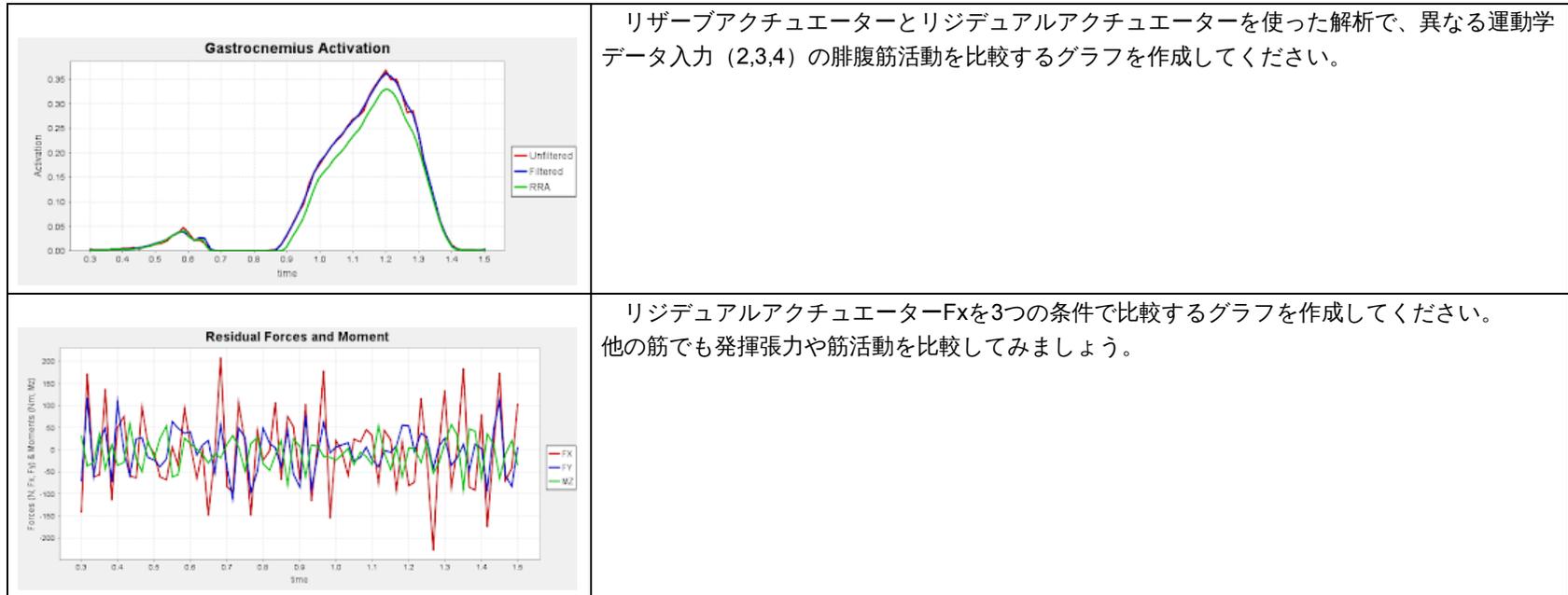
(ii) 次に、RRAを使って動作を作成します

- 静的最適化ツールを再度開き、セットアップファイルを読み込みます。リザーブアクチュエーターとリジデュアルアクチュエーターが追加されているファイルであることを確認してください。
- RRA後の動作ファイルを使うのでInputのfrom file にsubject_adjusted_Kinematics_q.stoを入力してください。Filterのチェックは外してください。
- step intervalを10に変更してください。
- 解析区間は0.3から1.5秒として下さい。
- 出力フォルダはResultsSO_StrongActuators_RRAとします。
- セットアップファイル名をStaticOptimization_SetupRRAとして保存してください。

これで4つの静的最適化の結果が別フォルダに保存されています。

1. ResultsSO: Static Optimization, フィルターがかかっていない運動学データから計算した静的最適化 (Study 1より)

2. ResultsSO_StrongActuators: アクチュエーターを追加したフィルターがかかっていない運動学データから計算した静的最適化 (Study 1より)
3. ResultsSO_StrongActuators_filtered: フィルターをかけた運動学データから計算した静的最適化
4. ResultsSO_StrongActuators_RRA: RRA後の静的最適化



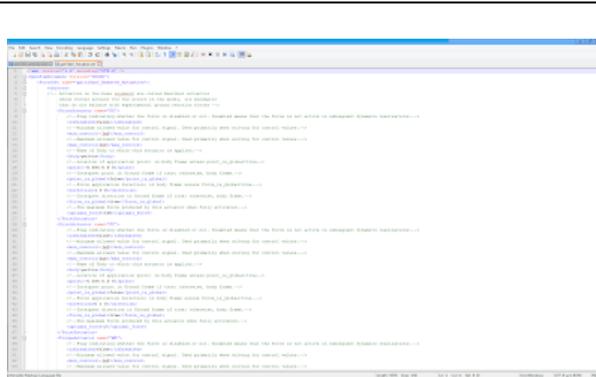
Questions

- 3条件で筋活動はどのような違いがありますか？
- フィルターをかけない条件よりフィルターをかけた条件でリジデュアルフォースが低下したのなぜですか？RRA後のデータを用いるとさらに低下するのはなぜですか？
- 静的最適化にはどの運動学データを用いるべきだと思いますか？その理由は何でしょう？

Study 3: リザーブアクチュエーターとリジデュアルアクチュエーターの調整

Study1ではモデルに関節運動を補助するアクチュエーターを追加しました。しかし、筋が発揮すべきトルクの大部分をリザーブアクチュエーターが担っていました。ここではリザーブアクチュエーターが発揮するトルクを減らして、リザーブアクチュエーターと腓腹筋の活動変化を調べます。

現在のアクチュエーターファイルでは関節のアクチュエーターは100Nが最適出力 (optimal force) となっています。筋活動の二乗和を最小とする最適化処理では筋活動をできる限り低く抑えようとしています。最適出力が100Nとすると0.5の活動度で50Nが発揮されます。最適筋力を1など小さく設定すると、最適化処理では高い活動を使う計算結果が出力されます。1Nのような非常に小さな最適筋力に設定した場合、筋骨格モデルが持つ筋では十分な筋出力が発揮できず、足りないトルクをリザーブアクチュエーターの活動で補助することになります。しかし、本来リザーブアクチュエーターは必要な分だけ補うべきです。

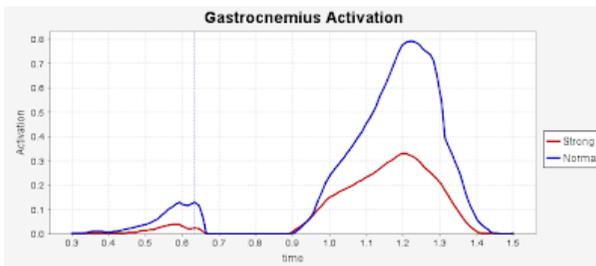


<optimal_force>100</optimal_force>

詳細は画像をクリックしてください

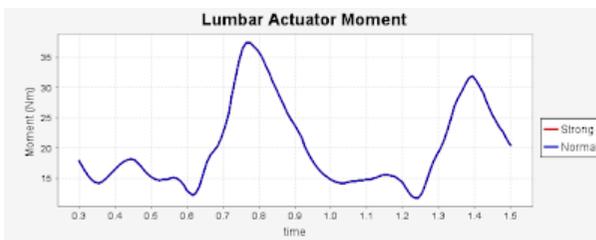
アクチュエーターファイルを修正して、各アクチュエーターのoptimal forceを100から1に変更してください。Notepad++のようなテキストエディターでファイルを修正するのが簡単です。([ダウンロードサイト](#)) .

- ・アクチュエーターファイルgait10dof18musc_Actuators_Strong.xmlを開いてください。
- ・XMLタグの<optimal_force>を見つけ、100を1に変更してください。(FX, FYはリジデュアルフォース、MZはリジデュアルトルク、~_reserveはリジデュアルアクチュエーターです。)
- ・gait10dof18musc_Actuators_Normal.xmlに名前を変更して保存してください。

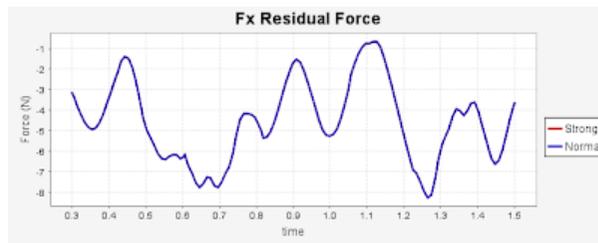


- RRAで調整した動作ファイルを用いて静的最適化を再度行います。
- ・先ほど作成したRRAセットアップファイル (StaticOptimization_SetupRRA) を開きます。
 - ・出力ディレクトリーを/ResultsSO_NormalActuators_RRAに変更してください。
 - ・Additional force set filesを変更します。Editを押して表示されているファイル>Deleteで削除してください。Addから先ほど作成したファイル (gait10dof18musc_Actuators_Normal.xml) を選択してください。"Appending to model's force set"が選択されていることを確認してください。
 - ・セットアップファイルをStaticOptimization_Setup_addNormalActuators.xmlとして保存してください。
 - ・Runをクリックして解析を行ってください

解析が終了すれば、最適筋力変更前後の腓腹筋活動を比較してください。



腰部アクチュエーターや足部リザーブアクチュエーターのモーメント、リジデュアルアクチュエーターの力 (Fx) を比較します。



Questions:

- 強いアクチュエーター（最適筋力100）と通常のアクチュエーター（最適筋力1）を用いた解析で腓腹筋の筋出力はどのような違いがありましたか？足部のアクチュエーターが発揮するモーメントの違いは？
- 最適筋力の違いで腰部リザーブアクチュエーターの出力モーメントはどのように変わりましたか？なぜこのような結果となるか説明してください。（Hint:腰部進展を制御する筋が2つの条件で変わりますか？）
- リザーブアクチュエーターの出力するFxのピーク値はどうでしょう？なぜ同じ結果となるのでしょうか？（Hint:前のセクションでなぜリジデュアルフォースとモーメントが必要になるか学んでいるはずです。）

Study 4: パッシブな出力要素を持つモデルでの静的最適化

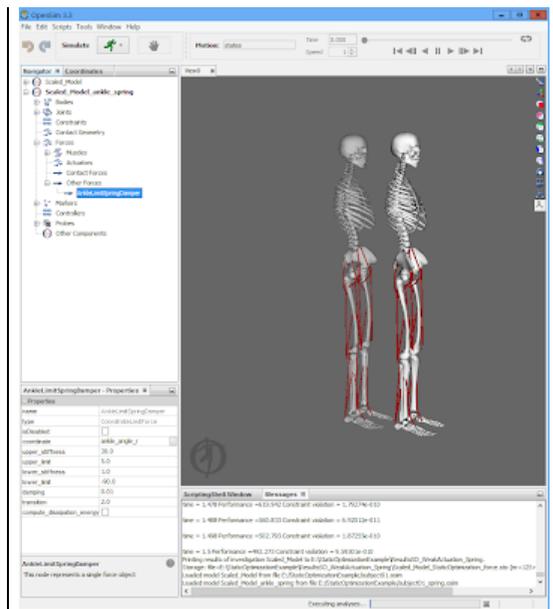
ここではモデルに足部スプリングを追加し、腓腹筋活動の変化を調べます。OpenSim3.3以降のバージョンでパッシブフォースを静的最適化で扱うことができます。OpenSim3.3以降のバージョンを用いてください。

最初にモデルにスプリングを追加します。モデルの読み込み、右足にスプリングを作成、モデルの保存を行ってください。

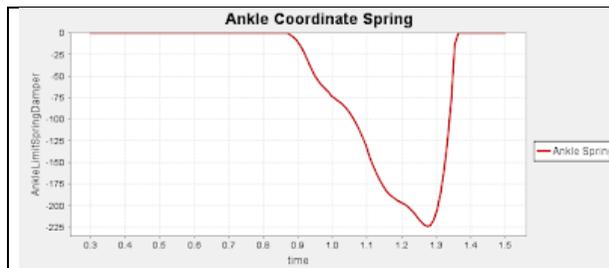
- ・ 静的最適化ツールが開いていれば、閉じてください。
- ・ RRA後のモデルsubjects01.osimをGUIで開いてください。
- ・ Scripts > Run...からaddAnkleSpring.pyを選択してください。

新しいモデルが作成されていると思います。Navigatorパネルでモデルの名前に 'ankle_spring' が追加されています。Forces, OtherForcesのタブを開いて、AnkleLimitSpringDamperを探してください。Propertyエディターでスプリングのプロパティを編集できます。

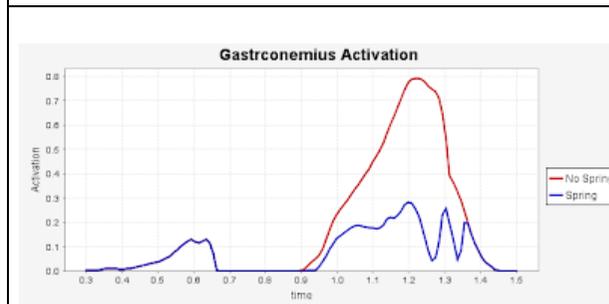
また、新しいモデルファイル 'subject01_spring.osim' がフォルダに保存されています。



これから、足部スプリングを追加した新しいモデルを使って、Study 4で作成したセットアップ (optimal force 1のリザーブアクチュエーター) と同様の解析を行ってください。出力フォルダの名前はResultsSO_NormalActuators_RRA_Springに変更してください。



Scaled_Model_StaticOptimization_force.stoからAnkleLimitSpringDamperのモーメントをプロットしてください。



腓腹筋活動をスプリングありとなしでプロットし、結果を比較してください。(データはStudy 4で作成したResultsSO_NormalActuatorsと今回作成したResultsSO_Springにあります)

Questions:

- 足関節スプリングを追加すると腓腹筋の活動は減少しましたか？

- チャレンジ：スプリングの硬さを増やしたり減らしたりしてください。腓腹筋の活動はどのように変わりますか？
- チャレンジ：足関節スプリングの追加によって他の筋はどのような影響を受けますか？

参考文献

Hicks J.L., Uchida T.K., Seth A, Delp S.L. (2015). Is My Model Good Enough? Best Practices for Verification and Validation of Musculoskeletal Models and Simulations of Movement. Journal of Biomechanical Engineering, 137(2)

[Report Abuse](#) | Powered By [Google Sites](#)