

目次

第 1 章 ロボットアーム設計の為の基礎計算

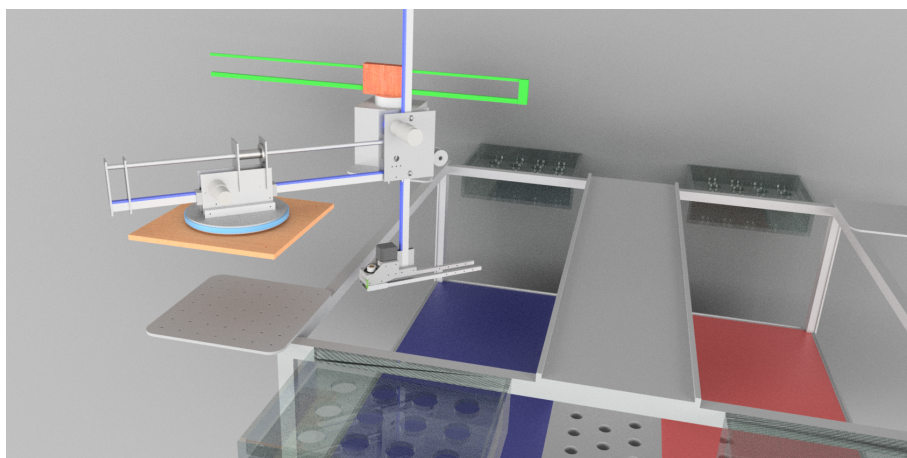
	ロボティクス学科 4 回生 阿部 龍幸	1
1.1	課題設定	2
1.1.1	設計目的	2
1.1.2	使用材料	2
1.1.3	座標系	2
1.1.4	基準	2
1.2	設計	9
1.2.1	数式	9
1.2.2	リンク形状の変更	9
1.2.3	最終形状	15
1.2.4	確認	17
1.3	終わりに	19
1.4	付録	21

第 1 章

ロボットアーム設計の為の基礎計算

ロボティクス学科 4 回生

阿部 龍幸



はじめに

自分が製作予定のロボットアームの最も肝心な一部分の設計をコンピュータによる解析を用いて行う。この設計では、使用する材質の強度等を考慮しながらアームの形状を変更し、ロボットがユーザの要求する速度を満たすことを目指す。ロボットを CAD ソフトで設計する際には、入手可能な材料を以て製作可能な形状を考慮しつつ、計算に手間のかからない単純な形状を組み合わせたモデルになるように進める。以下、物理量を SI 単位系で示し、有効数字を小数点以下 2 桁とする。尚、モデルの画像において寸法の表記は [mm] 表記とする。

1.1 課題設定

1.1.1 設計目的

包装されたお菓子などの軽量のワークを素早くハンドリングするロボットアームの、ロボットベースに対して垂直にとった軸周りに素早く回転するアーム部分を設計したい。回転軸周りのトルク $\tau = 1.0 \times 10^3$ [Nm] とし、重力方向の最大変位を 1.0×10^{-2} [m] 以下に抑えることを目指して設計する。また、アームの先には、実際に製作するロボットが備える機構とハンドを簡略化し、2.0 [kg] の荷重がかかるパーツを接続する。

1.1.2 使用材料

アームに使用する材料はアルミ合金とする。主に用いるアルミは 6000 系で、押し出し加工性に優れ、強度が良好で軽量であるという特徴を持つ。これは設計目的にある素早く動くという要求を慣性モーメントの小ささで満たし、重力方向の最大変位を抑えるという要求を縦弾性係数が満たすと期待できるからである。他にも板材として 2000 系アルミ合金を用いるが、6000 系アルミ合金に比べて強度が高く、使用する部分の殆どが回転軸に近い場所であり慣性抵抗の違いが小さく、また 6000 系アルミ合金を長手方向に渡って非常に多く使うのでそのひずみの様子重要視したいという理由で今回は全体を 6000 系アルミとしてモデルを簡単にして計算する。以降、密度 $\rho = 2.70 \times 10^{-6}$ [kg/mm³]、縦弾性係数 $E = 68.90$ [GPa]、許容最大応力を $\sigma = 2.75 \times 10^5$ [MPa] とする。安全率はこのアームがロボットの最も基にあり衝撃が加わる可能性がある箇所なので、余裕を見て $f = 15.00$ とする。

1.1.3 座標系

基準座標系をロボットベースの底面とし、リンク座標系を円筒状面の中心に設け、手先座標系はリンクの先端中央部とし、解析を行う。参考となるロボットの構造を図 1.1 に示す。

1.1.4 基準

ロボットベースは、1 辺 2.00×10^{-1} [m] の立方体に直径 1.20×10^{-1} [m] で、 z 軸方向に上面から 7.00×10^{-2} [m] の深さの円筒を切り抜いた形状のものとする。形状を図 1.2 に示す。ロボットアームの、ロボットベースの円筒状の中心から手先までの距離については 1.0 [m] に固定とし、ロボットハンドとジョイントの形状はロボットアームに合わせて変更する。また、ジョイントの重量は無視し、ハンドの重量は 2.0 [kg] で固定とする。

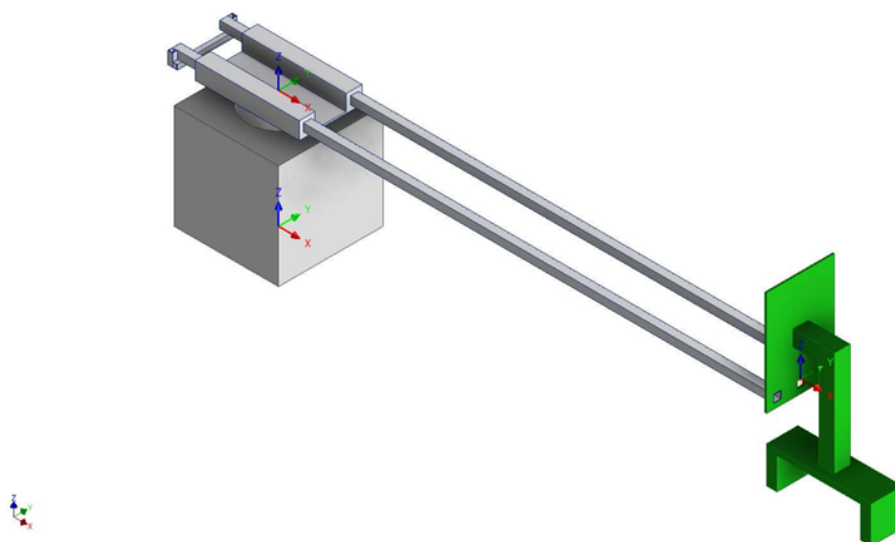


図 1.1 座標系

ベースとアームを接続するジョイント，ロボットアーム，ロボットハンドの形状については複雑であるので，それぞれ図 1.3，図 1.4，図 1.5 に必要な寸法を示す。

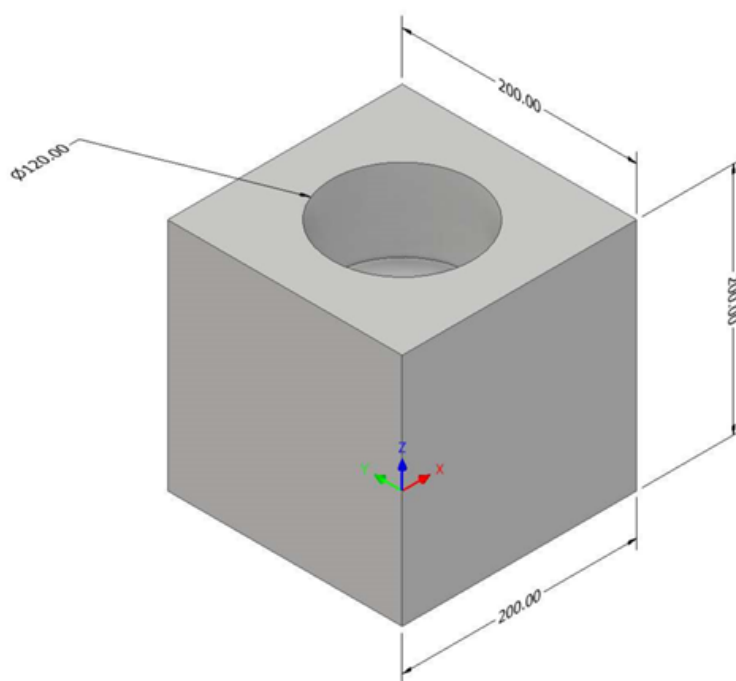


図 1.2 ロボットベース

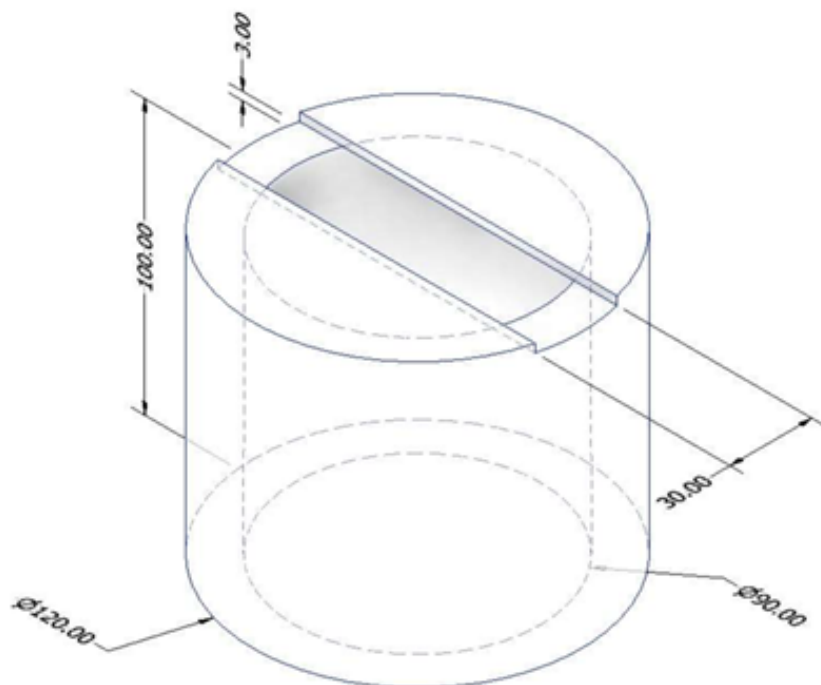


図 1.3 ジョイント

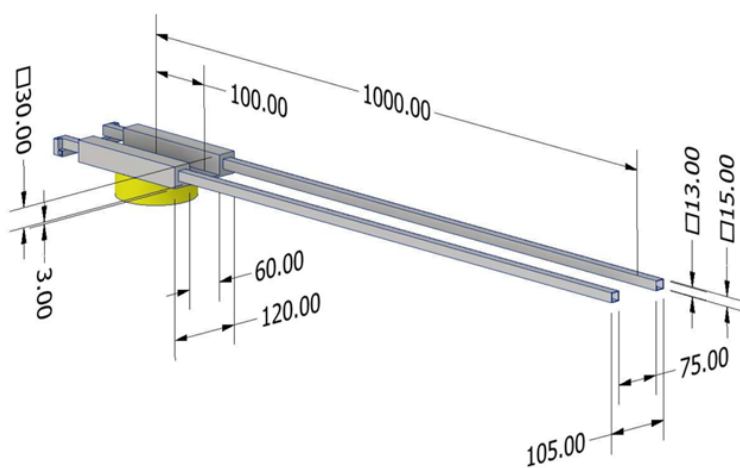


図 1.4 ロボットアーム



図 1.5 ロボットハンド

このロボットアームを機構解析した結果，1.1.3 項で定義した手先座標系に関する手先角加速度，手先角速度，手先角度変化，手先加速度が以下の図 1.6 から図 1.9 までのグラフに示すように得られた．また，構造解析結果として，最大主応力，最大フォンミーゼス応力，変位が図 1.10，図 1.11，図 1.12 のように得られた．数値をまとめて表 1.1 に示す．

表 1.1 Basic Arm 解析結果

質量 M [kg]	角加速度 \ddot{q} [rad/s ²]	加速度 \dot{q} [m/s]	最大主応力 σ [Pa]	変位 δ_z [m]
1.82	4.29×10^{-1}	4.29×10^{-1}	7.71×10^6	1.25×10^{-2}

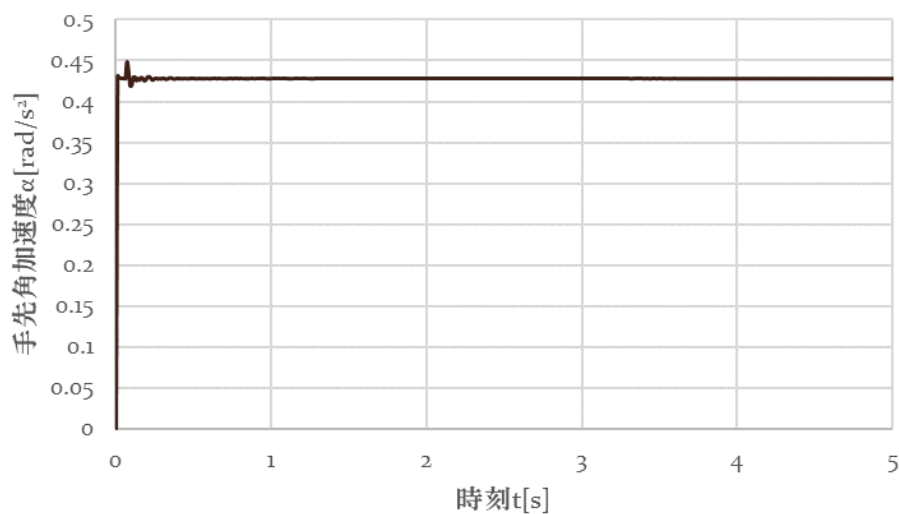


図 1.6 Basic Arm 手先角加速度

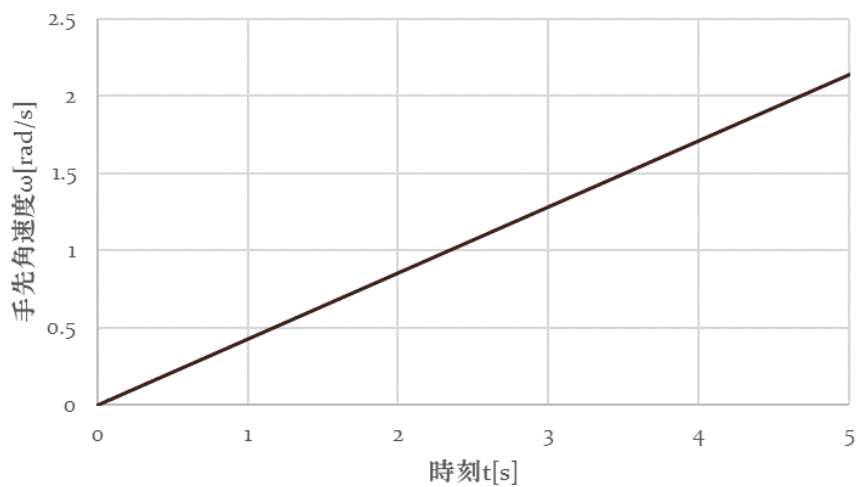


図 1.7 Basic Arm 手先角速度

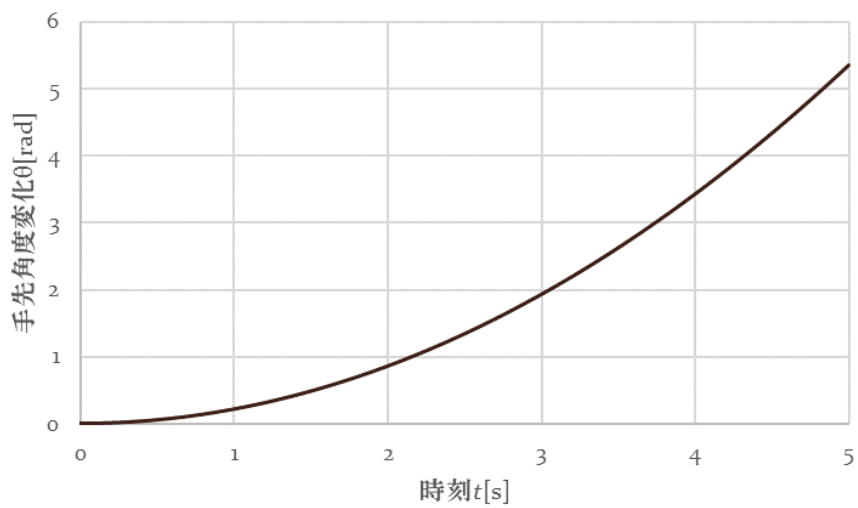


図 1.8 Basic Arm 手先角度変化

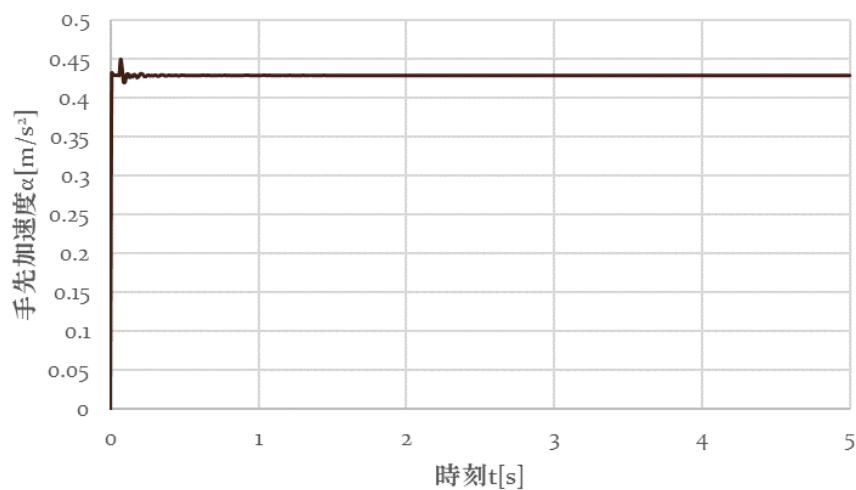


図 1.9 Basic Arm 手先加速度

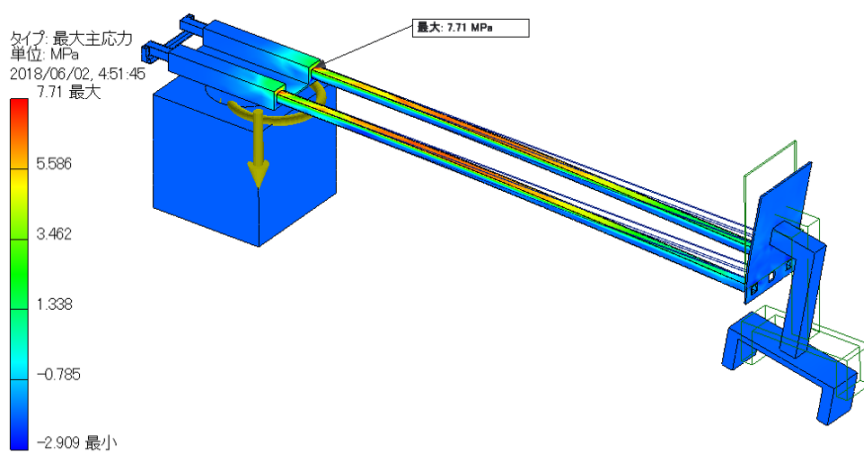


図 1.10 Basic Arm 最大主応力

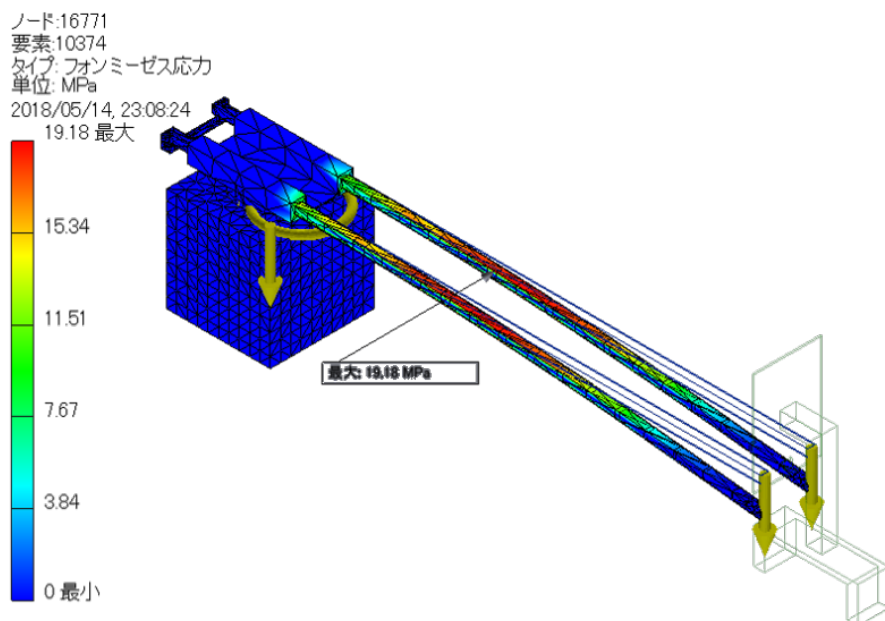


図 1.11 Basic Arm 最大フォンミーゼス応力

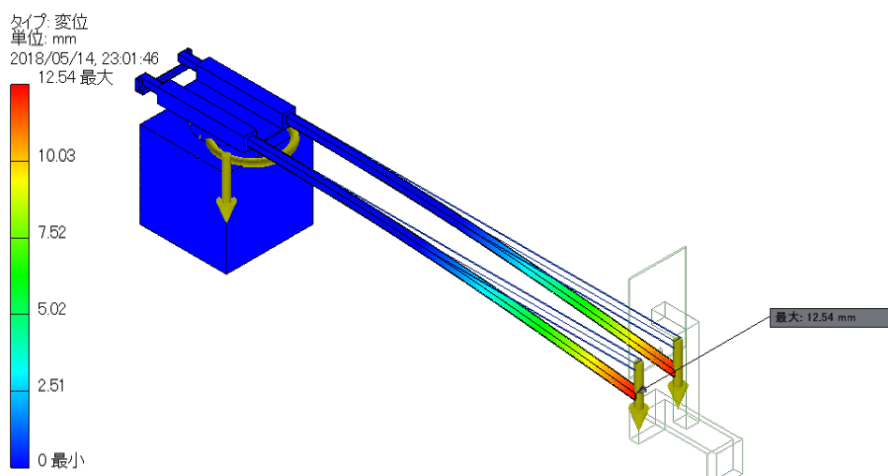


図 1.12 Basic Arm 変位

1.2 設計

1.2.1 数式

この項には、以降の設計過程に必要な理論解を求めるための式を示す。初めに、高速性の追求について、手先角加速度 \ddot{q} 、最大トルク τ_{\max} 、慣性モーメント I とすると、手先角加速度は以下のような式で表せる。

$$\ddot{q} = \frac{\tau_{\max}}{I} \quad (1.1)$$

また、手先加速度 \ddot{r} はリンク長さ l を用いて次のように表せる。

$$\ddot{r} = l\ddot{q} \quad (1.2)$$

次に応力に関して、質量 M 、密度 ρ 、幅 b 、高さ h 、リンク長さ l 、回転軸からリンク中心の長さ x の直方体リンクにおいて、慣性モーメントが以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12}M(l^2 + b^2) + Mx^2 \\ &= \frac{1}{12}\rho l b h(l^2 + b^2) + \rho l b h x^2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

またこの時、断面係数 Z は断面係数次のようになる。

$$Z = \frac{1}{6}bh^2 \quad (1.4)$$

そして外力 F_z を与えた時の最大応力 σ_f は次のようになる。

$$\sigma_f = \frac{F_z l}{Z} \quad (1.5)$$

この時、安全率 f 、材質から与えられる許容最大応力 σ_A とで与えられる強度の条件は次のようになる。

$$\sigma_f \leq \frac{\sigma_A}{f} \quad (1.6)$$

以降では、基本的にこれらの式を用いて、理論的解析を行うものとする。

1.2.2 リンク形状の変更

まず、基準としたロボットアームが最大変位の要求を満たさなかったので、高剛性な形に変更し、そこからさらに高速化を目指して変更していくことを考える。アーム先端までの長さについては 1.1.4 項で定めているので変更はせず、現在のアームを 2 段重ねにしたような形状に変更する。詳細の寸法については複雑であるので、具体的な形状と共に図

1.13 に示す．このリンクの各パラメータについて表 1.2 にまとめた．また，1.2.1 節の数式を用いて求めた結果を表 1.3 にまとめる．

表 1.2 Harder Arm パラメータ

リンク長さ l [kg]	角柱状部分幅 b [m]	角柱状部分高さ h [m]
1.00	1.05×10^{-1}	0.98×10^{-1}

表 1.3 各理論値

質量 M [kg]	角加速度 \ddot{q} [rad/s ²]	加速度 \dot{q} [m/s]	最大応力 σ [Pa]	慣性モーメント I_z [kgm ²]
2.87	3.01×10^{-13}	3.01×10^{-13}	1.92×10	3.32×10^{15}

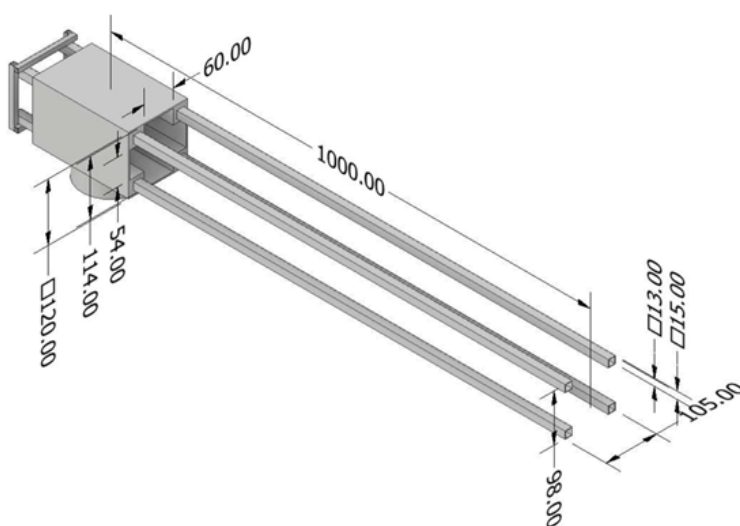


図 1.13 Harder Arm

このロボットアームを機構解析した結果，アーム先端に設定した手先座標系に関する手先角加速度，手先角速度，手先角度変化，手先加速度が以下の図 1.14 から 1.17 までのグラフに示すように得られた．また，構造解析結果として，最大主応力，最大フォンミーゼス応力，変位が図 1.18, 1.19, 1.20 のように得られた．数値をまとめて表 1.4 に示す．

基準としたアームと重力方向の変位を抑えたアームの 2 つからパラメータを作成する．左縦軸に高さ h を，右縦軸に幅 b をとり，横軸に加速度 α をとってグラフを書くと，図

表 1.4 Harder Arm 解析結果

質量 M [kg]	角加速度 \ddot{q} [rad/s ²]	加速度 \dot{q} [m/s]	最大応力 σ [Pa]	変位 δ_z [m]
3.40	4.09×10^{-1}	4.09×10^{-1}	3.62×10^6	9.23×10^{-4}

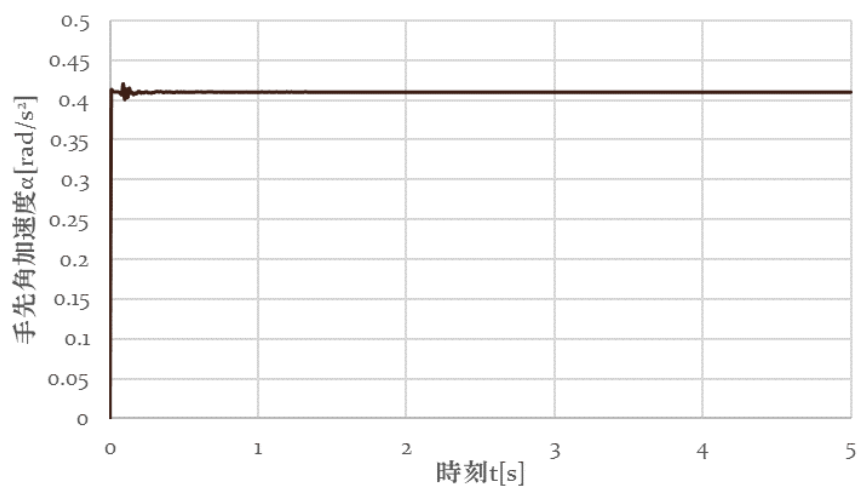


図 1.14 Harder Arm 手先角加速度

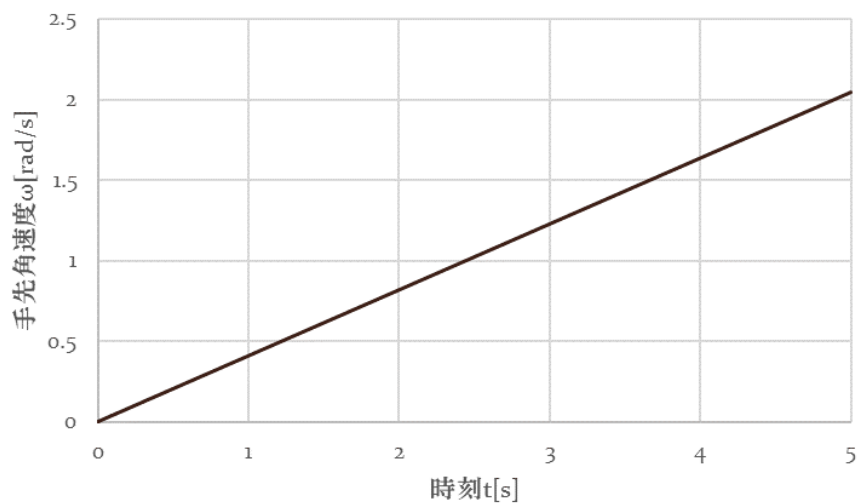


図 1.15 Harder Arm 手先角速度

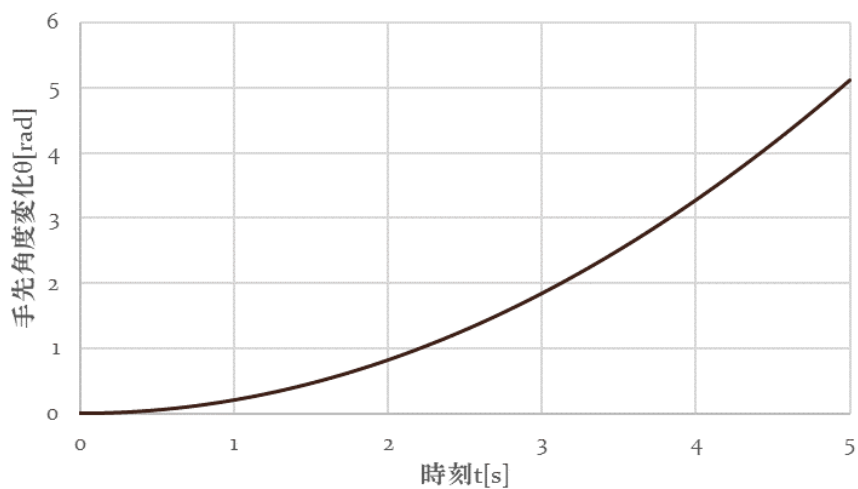


図 1.16 Basic Arm 手先角度変化

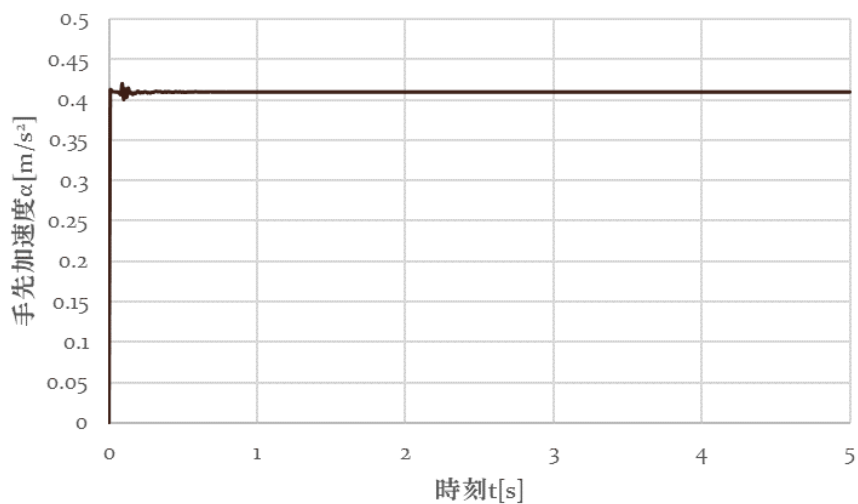


図 1.17 Harder Arm 手先加速度

1.21 のようになる。グラフの右下に交点を寄せつつ、強度が要求を満たすように設計していく。

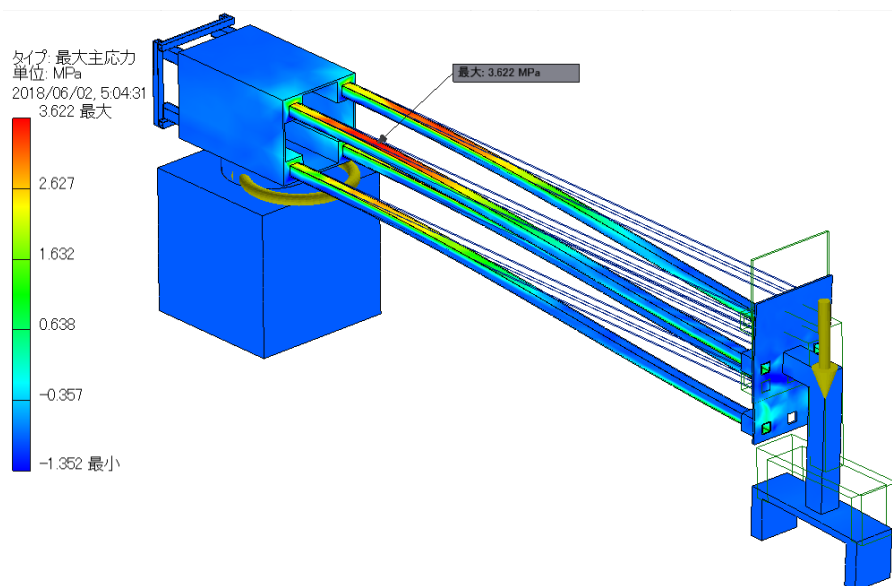


図 1.18 Harder Arm 最大主応力

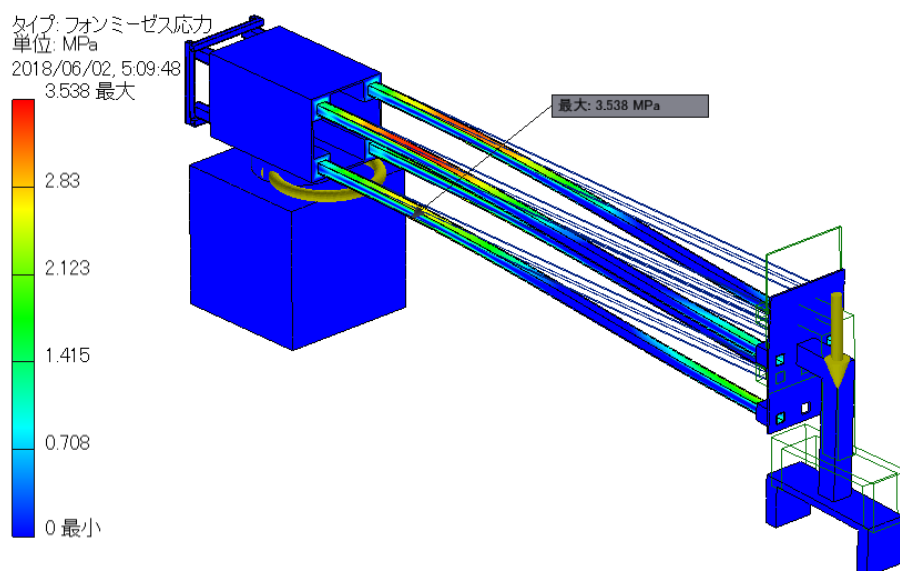


図 1.19 Harder Arm 最大フォンミーゼス応力

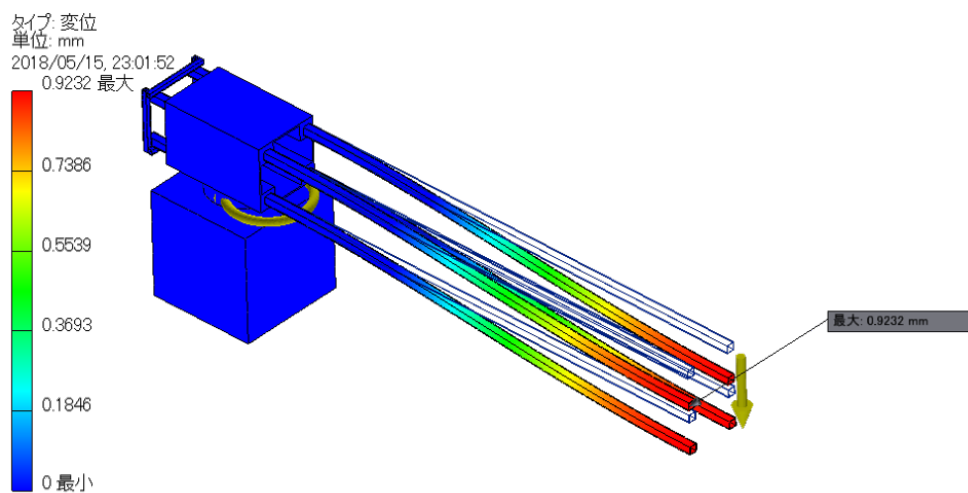
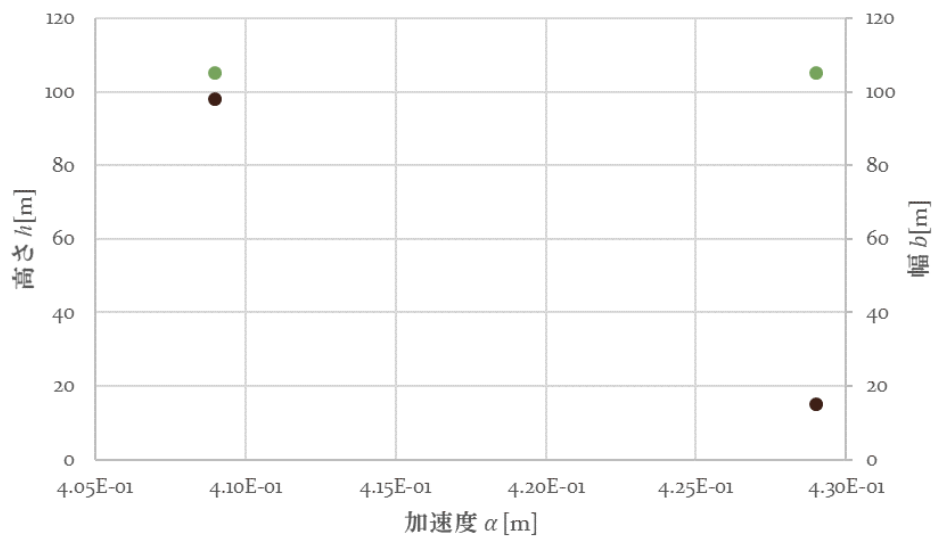


図 1.20 Harder Arm 変位

図 1.21 $\alpha - h, \alpha - b$ グラフ

1.2.3 最終形状

最終的に、以下に示す形状のリンクを設計した。Speedy Arm を図 1.22 に示す。また、アセンブリを図 1.23 に示す。このロボットアームを機構解析した結果、アーム先端に設定した手先座標系に関する手先角加速度、手先角速度、手先角度変化、手先加速度が以下の図 1.24 から図 1.27 までのグラフに示すように得られた。また、構造解析結果として、最大主応力、最大フォンミーゼス応力、変位が図 1.28、図 1.29、図 1.30 のように得られた。その他に得られた数値もまとめて表 1.5 に示す。

表 1.5 Speedy Arm 解析結果

質量 M [kg]	角加速度 \ddot{q} [rad/s ²]	加速度 \dot{q} [m/s]	最大応力 σ [Pa]	変位 δ_z [m]	重心の鉛直方向回り 慣性モーメント I_{S_0} [gmm ²]
1.07	4.25×10^{-1}	4.25×10^{-1}	9.28×10^6	2.19×10^{-3}	1.02×10^8

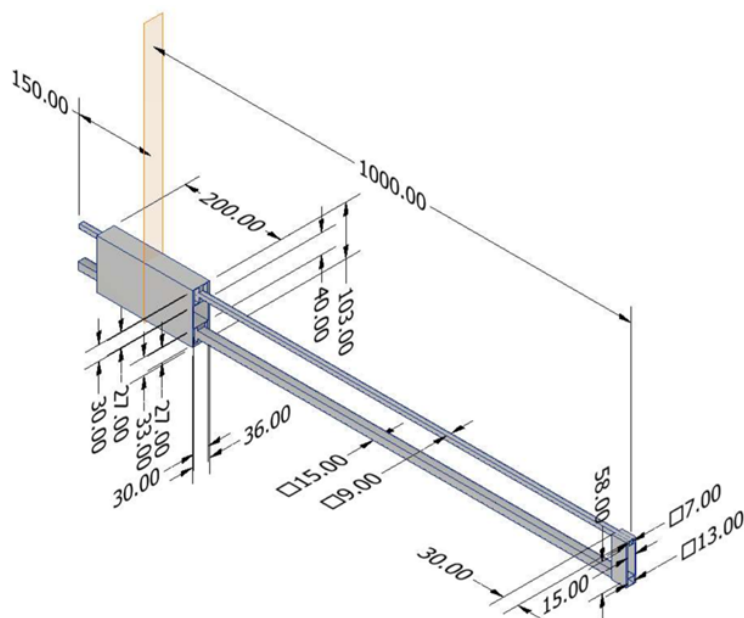


図 1.22 Speedy Arm 形状と寸法

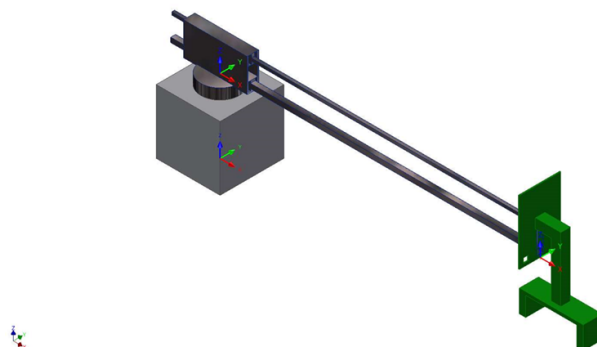


図 1.23 Speedy Arm アセンブリ図

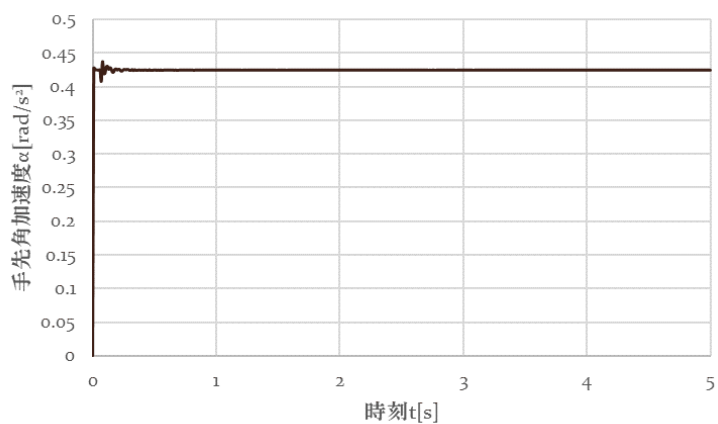


図 1.24 Speedy Arm 手先角加速度

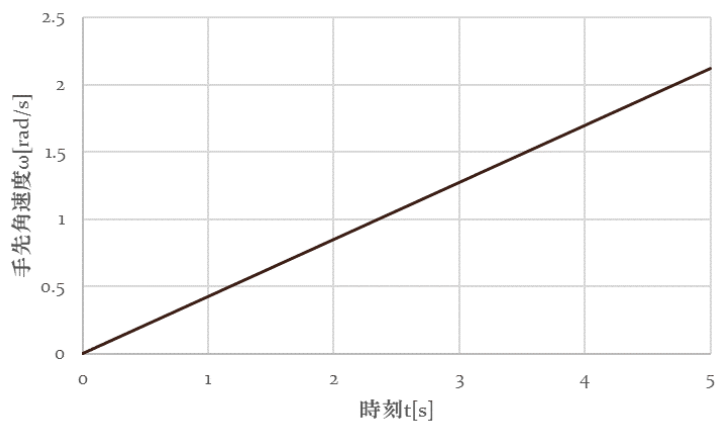


図 1.25 Speedy Arm 手先角速度

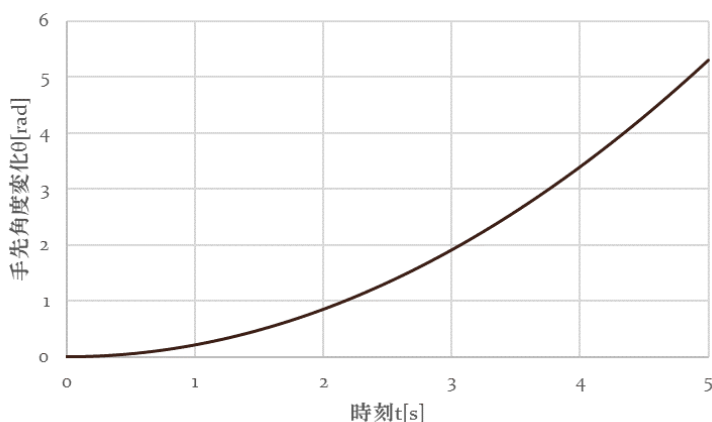


図 1.26 Speedy Arm 手先角度変化

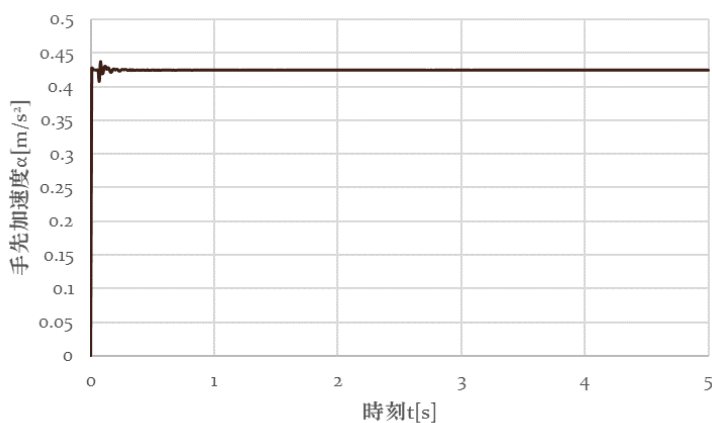


図 1.27 Harder Arm 手先加速度

1.2.4 確認

解析解に基づいて得られた解が正しいと予想されるかどうかを確認する。最終形状に適用した形状についての重要なパラメータとなる数値の理論値と数値解との比較を以て数値解の確認とする。先ず、ロボットアームの角加速度、角速度、手先角加速度、手先角速度、手先速度を算出する式の重要なパラメータである慣性モーメントについて確かめる。以降では、簡略化のために理論解、数値解をそれぞれ I_S , $I_{\tilde{S}}$, I_{S_0} と表記する。1.2.1 節の式を用いて図 1.22 に示す寸法を参照しながらアームの形状をいくつかの正の密度と負の密度

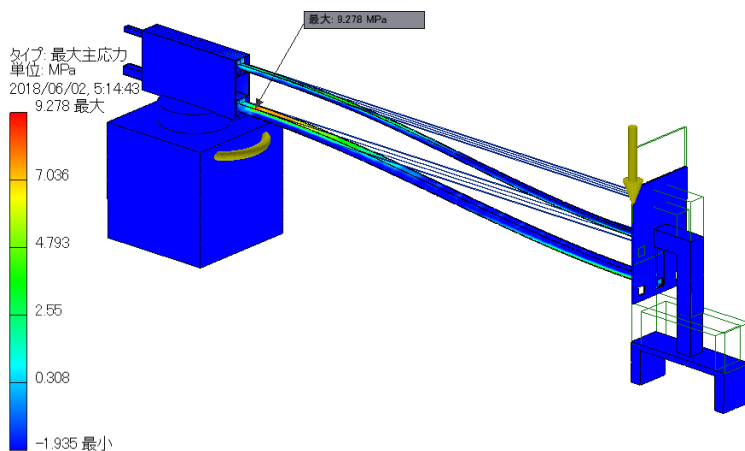


図 1.28 Speedy Arm 最大主応力

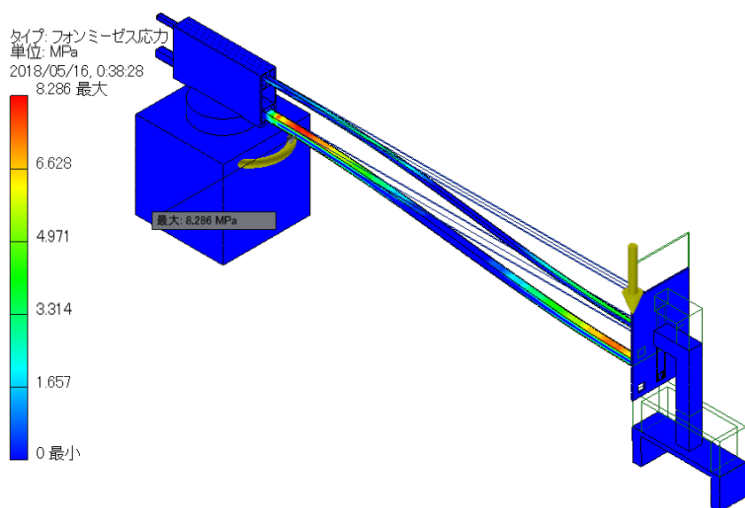


図 1.29 Speedy Arm 最大フォンミーゼス応力

を持つ複数の長方形に分割し、それぞれのアームの回転軸周りの慣性モーメントを計算すると

$$\begin{aligned}
 I_S &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{12} \rho l_i b_i h_i (l_i^2 + b_i^2) + \rho l_i b_i h_i x^2 \right\} \\
 &= 1.25 \times 10^8 [\text{g mm}^2]
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

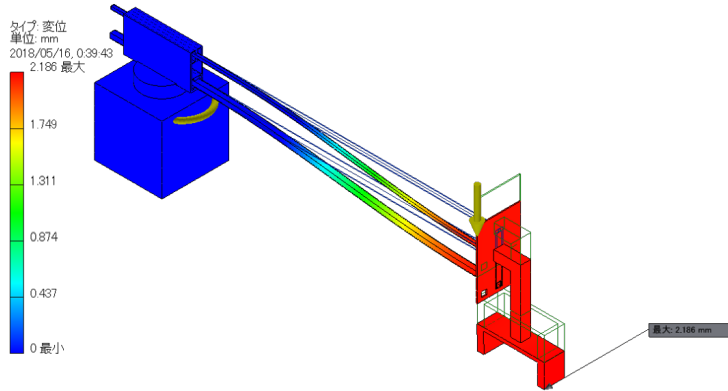


図 1.30 Speedy Arm 変位

となる。また、表 1.5 を参照して

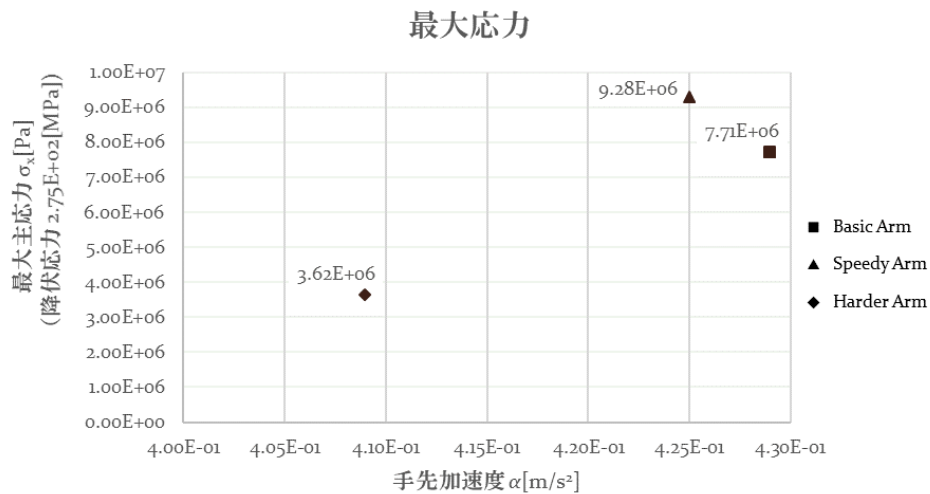
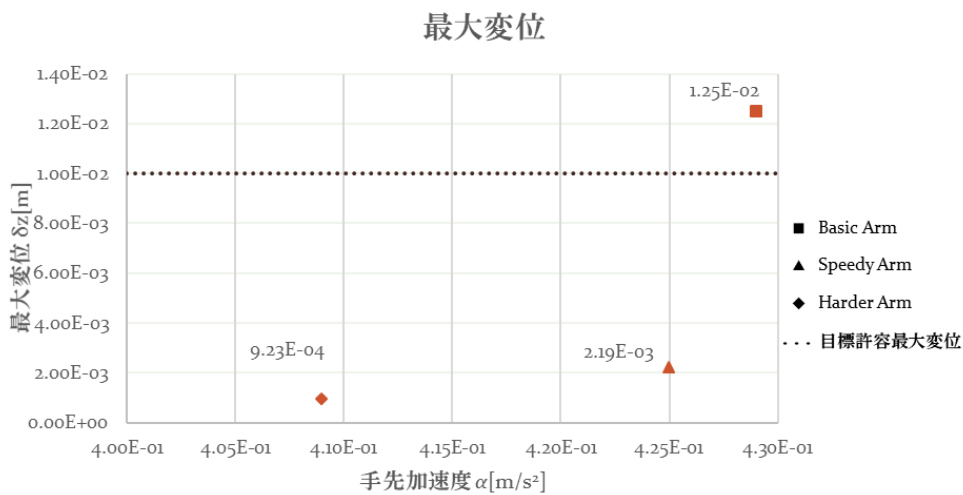
$$\begin{aligned}
 I_S &= I_{S_0} + Mx^2 \\
 &= 1.26 \times 10^8 \text{ [g mm}^2\text{]}
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

ただし、 x の値は $1.49 \times 10^2 \text{ [mm]}$ であり、数値解による重心から回転軸までの距離である。両数値はほぼ一致しており、各数値解の値は正しいと言える。

最大応力については、形状が複雑である為に応力の理論解を求めることは難しいので数値解を信用して評価する場合、設計したすべての構造は応力については十分に要件を満たしていることは図 1.31 に示す通り、明らかである。また、Speedy Arm は Basic Arm で達成できなかった変位の制限について、 $2.19 \times 10^{-3} \text{ [m]}$ と十分に満たしており、更に Harder Arm より手先角加速度が大きいので、ロボットアームは十分に高速化され、設計目標に達したと言える。

1.3 終わりに

- シミュレータを用いた設計を行う際には、どんな複雑な設計を行う前にもそのシミュレータをテストできる簡単なモデルを用意してテストをした方がよい。
- リンクの高速化と剛性を求める場合は降伏応力のほかにも閾値を設けて設計する必要がある。設計パラメータは何を目的に設計するかによって正確に選択する必要がある。
- ロボットアームを設計する際には重量がかさむものはロボットベースに近くなるように設計するか、制御や機械要素による補償を施す必要がある
- ある方向への変形による変位は、その方向に寸法を取る材料または構造の厚みが関係するので、アームの伸びに対していくらの変形を許容するかというパラメータは

図 1.31 $\alpha - \sigma_x$ グラフ図 1.32 $\alpha - \delta_z$ グラフ

重要なパラメータの一つである。

- CAD ソフトのファイル形式変換についての理解はシミュレーションソフトなどと連携した設計に欠かせない知識である。無料のソフトウェアでも本格的な設計が可能なので積極的に使っていきたい。今回は学生版の Autodesk Inventor 2018 を用いて設計・構造解析などを行い、simXpert とのファイルの互換性についてある程度の理解を得た。また、2018 年度より本学で生徒のパソコンで利用できる包括ライセンスを導入した MATLAB の拡張機能に含まれるシミュレーションアプリケーションと連携が可能であることが分かったので、以後挑戦したいと思う。

1.4 付録

計算した結果を用いて実際に以下に示すロボットアームを設計した。

