

## 目次

1	はじめに	2
2	問題設定	2
2.1	設計目的	2
2.2	食品攪拌ロボットの製品目標値・設計仕様	2
2.3	ロボットの設計	2
3	基準となるロボットの解析	5
3.1	基準ロボットの構造解析	5
3.1.1	慣性モーメントの解析	5
3.1.2	応力の解析	6
3.1.3	変位の解析	8
3.2	基準ロボットの機構解析	10
4	手先加速度をあげるために再設計したロボットの解析	13
4.1	手先加速度をあげるために再設計したロボットの構造解析	13
4.1.1	慣性モーメントの解析	13
4.1.2	応力の解析	14
4.1.3	変位の解析	16
4.2	手先加速度をあげるために再設計したロボットの機構解析	16
5	強度を考慮し再設計したロボットの解析	19
5.1	強度を考慮し再設計したロボットの構造解析	20
5.1.1	応力の解析	21
5.1.2	変位の解析	22
5.2	強度をあげるために再設計したロボットの機構解析	23
6	製品目標値を満たすロボットの設計	26
6.1	最終のロボットアームの形状	26
6.2	最終のロボットアームの各種値	27
6.3	最終のロボットアームの応力及び変位	27
6.4	最終ロボットの機構解析について	28
6.5	製品目標値との比較	30
7	おわりに	30

## 1. はじめに

今回の課題は、ロボットが活用されうる状況を自分で想定し、その状況に合わせたロボットを設計することである。その際、ロボットのロボットの必要強度を高めながら手先加速度が大きくなるように設計していくことが目的となる。

今回の課題で私は、食品工場において、クッキーミックスやホットケーキミックスなどの攪拌作業を行うアームロボットを想定し、その水平可動部分の設計を行うこととした。材料を攪拌するために必要な手先速度及び、その手先速度に達するための加速時間の2つから、必要となる手先加速度を定める。最終的にシミュレーションを行い、安全率やたわみ量、手先加速度が条件を満たす適切な形状を見つけていく。

## 2. 問題設定

### 2.1 設計目的

食品工場では同時に大量の材料を攪拌する必要があるので、ロボットがあると業務効率化が図れる。さらに、食品材料の攪拌という工程では、低速で混ぜた場合に「ダマ」と呼ばれる呼ばれる固形物ができてしまう事があるため、ロボットの手先速度を上げる必要がある。目標となる手先速度及び加速時間の2つから必要となる手先加速度を計算し、その手先角速度が必要条件を満たすように設計する。

### 2.2 食品攪拌ロボットの製品目標値・設計仕様

今回作成する食品攪拌ロボットの製品目標値・設計仕様を表1に示す。表1で決めた評価基準を満たすよう設計を行う。

表1 食品攪拌ロボットの製品目標値・設計仕様

製品名	食品攪拌ロボット
関節駆動トルク [Nm]	393.0
回転軸からアーム中心部のブレードまでの長さ [m]	1.0
回転軸からアーム先端部のブレードまでの長さ [m]	1.0
アーム部分総質量 [kg]	250.0
アーム部分慣性モーメント [kgm <sup>2</sup> ]	250
1秒あたりの回転数 [回転]	1.0
手先加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	6.28
加速時間 [s]	2.0 以内
許容最大たわみ (z 軸方向) [mm]	2.50 以下
安全率	3.0 以上

関節駆動トルク及び回転軸から各ブレードまでの長さを固定した。関節駆動トルクである 393.0[Nm] というのは、今回モータとして豊興工業の内接式歯車モーターである「TCM5-F125-M1-A」を使用するため、そのモータのトルクを元にして関節駆動トルクを決めた。

今回、1秒あたりの回転数を1回転と決めた。つまり、このロボットに要求される角速度は、6.28[rad/s] となる。このロボットの加速時間は 2.0[s] と決めたので、1秒以内に秒以内に要求角速度にもっていくためには角速度は 3.14[rad/s<sup>2</sup>] 以上、つまり手先加速度が 6.28[m/s<sup>2</sup>] 以上になるようにロボットを設計する必要がある。上記で設定した許容最大たわみ、手先加速度、加速時間及び安全率の4つが仕様を満たすようにアームの断面形状を変更する。

### 2.3 ロボットの設計

今回のロボットの設計においては、軽量かつ十分な強度をもつ材料を選ぶ必要があるため、今回はアルミニウム 1060 を使用することとした。

今回設計したロボットの土台部分、そして軸部分の各寸法をそれぞれ図1、図2に示す。

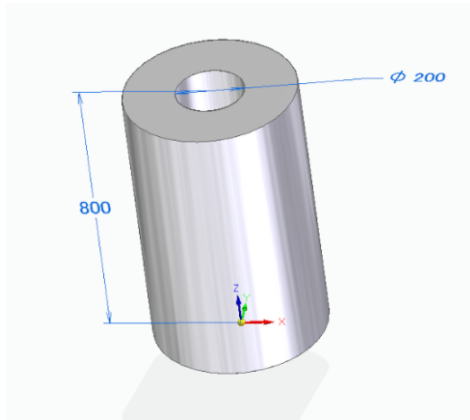


図 1 設計した土台の形状

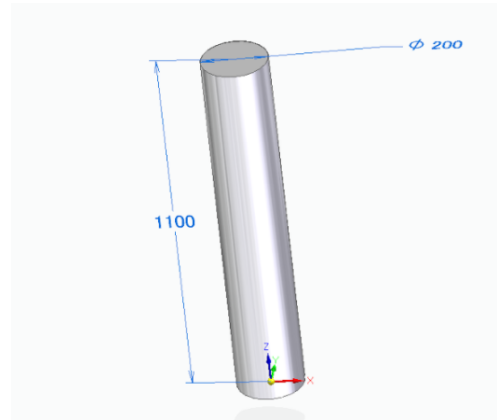


図 2 設計した軸の形状

そして、今回設計したアーム部分を図 3 に示す．アームには、搅拌のためのブレードを設置するための穴を 2 つあけた．

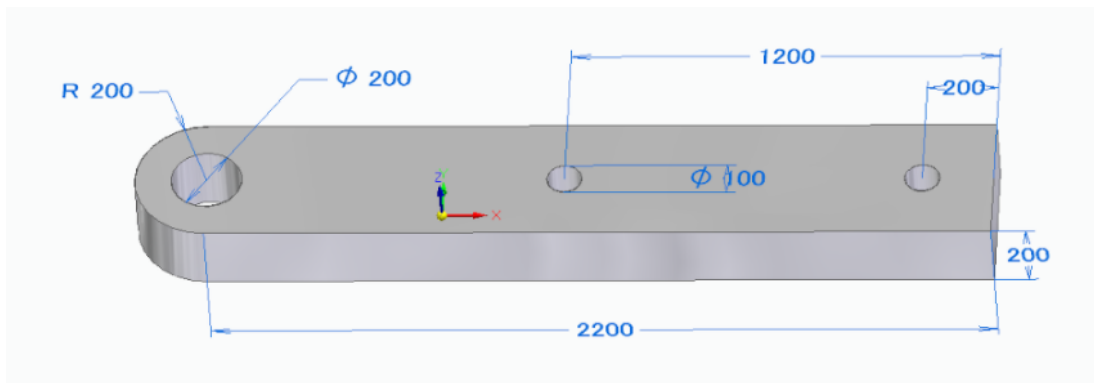


図 3 設計したアームの形状

今回は中心部および先端部にミキサーのブレード部分を想定した 12[kg] のおもりを付けることとした．その重りのモデルを図 4 に示す．さらに、設計した土台、軸、及びアームをアセンブリし中心部及び先端部にブレードを取り付けたものが、図 5 である．このロボットを基準ロボットとし、手先加速度や強度を考慮して再設計を行っていく．

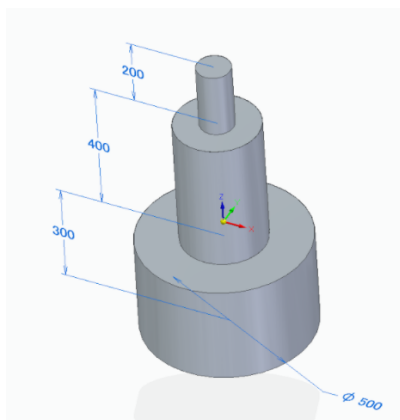


図 4 ミキサーのブレード

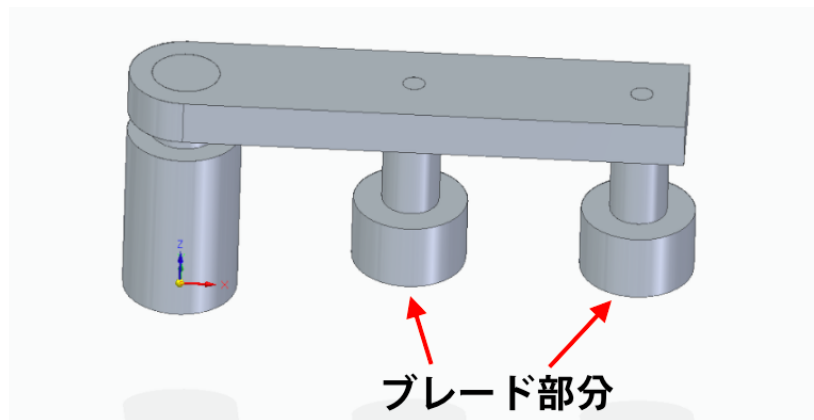


図 5 基準ロボットの概形

工場での作業を想定しているため、搅拌に使用する食品容器は大きく、図 6 のような容器になっている．この容器は最大 9000[L] の液状の食品が入るようになっている．

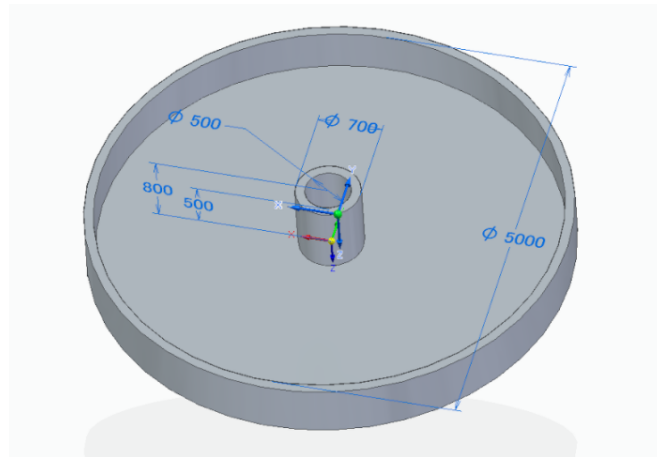


図 6 食品材料を入れる容器

図 7 が、図 6 で示した容器に図 5 のロボットを設置した様子である．このようにロボットを食品が入っている容器の中心に設置し、アームを回転させることによって食品を攪拌することが出来るというわけである．

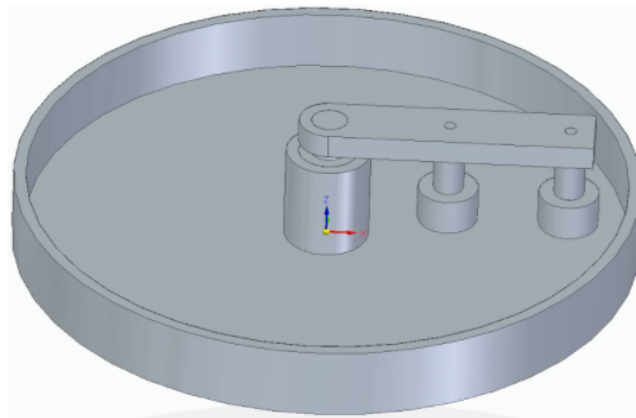


図 7 容器にロボットを設置した様子

図 5 に示した基準ロボットを元に、再設計を行った．再設計を行う際には土台と軸、及びブレードを想定した 12[kg] の重りは同じものを使い、アーム部分のみ再設計を行った．

手先加速度を上げるための軽量化を行ったのが図 8 に示すアームである．また、解析により、アーム先端部に比べてアーム中心部に大きい応力がかかることが分かった．その応力により生じるたわみを少なくするために中心部を太く設計したものが図 9 のアームである．

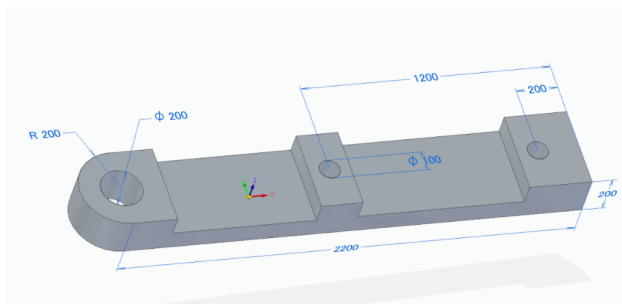


図 8 手先加速度をあげるために再設計したアーム

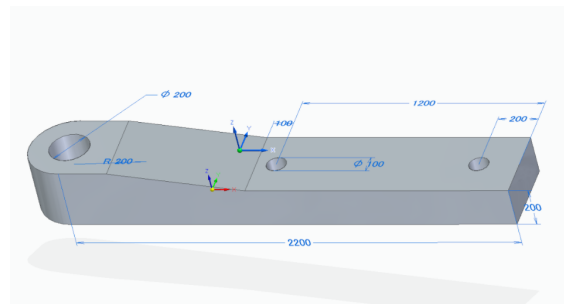
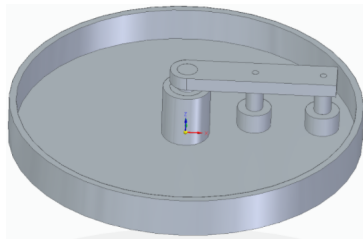
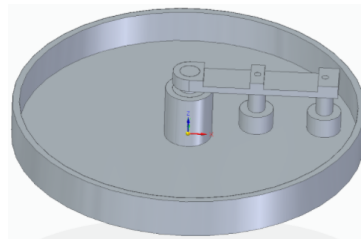


図 9 強度を考慮して再設計したアーム

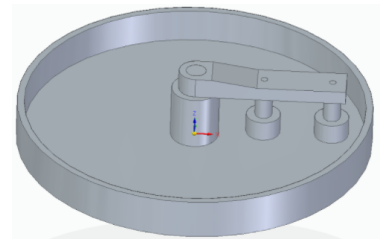
今回設計した 3 種類の形状の異なるアームをアセンブリした結果を図に示す．



[1] 基準となる設計



[2] 手先加速度をあげる設計



[3] たわみ量を少なくする設計

図 10 設計した 3 種類のアームロボット

図に示した 3 種類のロボットアームの断面形状において機構及び構造の解析を行い、表 1 の仕様を満たすように再設計を行う。

### 3. 基準となるロボットの解析

ここでは、基準となるロボットアームの解析を行う。

解析手順としては以下の手順で行った。

1. Solid Edge を使って、質量や慣性モーメントを求め、解析的に求めた値と比較する
2. Solid Edge を使って、応力をかけた状況をシミュレーションする。
3. 解析に必要な座標系を定義し、DH 記法を用いてリンクパラメータを整理する
4. SimXpert を使用して関節加速度及び手先角速度を調べ、解析的に求めた値と比較する

#### 3.1 基準ロボットの構造解析

ここでは、基準となるロボットアームの構造解析を行う。慣性モーメント、応力、変位に関してそれぞれシミュレーションを行い、理論解との照らし合わせてシミュレーション結果の妥当性を考える。

##### 3.1.1 慣性モーメントの解析

SolidEdge を使って求めたリンクアームの体積、質量、慣性モーメントに加え、材質と密度をまとめて記載したものが表 2 である。有効数字は 4 桁とした。

表 2 リンクアームの各値

材質	アルミニウム 1060
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	2712
体積 [m <sup>3</sup> ]	0.1792
質量 [kg]	485.8
慣性モーメント [kgm <sup>2</sup> ]	751.9

ここで、Solid Edge によって得た慣性モーメントの値を、解析的に計算した慣性モーメントの値と比較する。

任意の軸回りの慣性モーメント  $I$  は、重心を通る回転軸周りの慣性モーメント  $I_G$  と、2 つの軸間距離  $d$ 、そして質量  $M$  を使うと、平行軸の定理より式 1 が成り立つ。

$$I = I_G + d^2 M \quad (1)$$

また、重心を通る  $Z$  軸周りの直方体の慣性モーメント  $I_G$  は、 $X$  方向の直方体の長さを  $2a$ 、 $Y$  方向の直方体の長さを  $2b$  とした時に、式 2 が成り立つ

$$I_G = \frac{1}{3}M(a^2 + b^2) \quad (2)$$

図 3 で示した，基準アームを直方体として考えると， $X$  方向の直方体の長さ  $2a$  は  $0.2[\text{m}]$ ， $Y$  方向の直方体の長さ  $2b$  は  $2.4[\text{m}]$  となる．

よって， $a = 0.1$ ， $b = 1.2$  となり，質量  $M=485.832$  であるので，これらを式 2 に代入すると，式 3 のようになる．

$$\begin{aligned} I_G &= \frac{1}{3}M(a^2 + b^2) \\ &= \frac{1}{3}485.8(0.1^2 + 1.2^2) \\ &= 234.8 \end{aligned} \quad (3)$$

質量中心周りに座標系を定義し，その座標軸周りの慣性モーメント  $I_G$  を SolidEdge を使用して測った所， $225.9[\text{kgm}^2]$  となっており，解析的に求めた重心周りの慣性モーメント  $I_G$  と数値的に求めた重心周りの慣性モーメント  $I_G$  がほぼ一致している．

慣性モーメントの理論値を求める際は，単純化のために直方体として扱ったため，ブレードを取り付けるために開けた穴及びフィレットを考慮していない．結果的に，理論値が SolidEdge を使って求めた慣性モーメントと比較して大きく出たと考えられる．

また，回転中心の軸とアームの重心の軸は Solid Edge を使用して計測した結果， $1.036[\text{m}]$  の距離があることがわかった．そこで，軸間距離  $d = 1.036[\text{m}]$ ，先ほど数値的に計算した重心周りの慣性モーメント  $I_G = 234.8[\text{kgm}^2]$  及び質量  $M = 485.8[\text{kg}]$  を式 2 に代入すると，式 4 となる．

$$\begin{aligned} I &= I_G + d^2M \\ &= 234.8 + 1.036^2 485.8 \\ &= 756.0 \end{aligned} \quad (4)$$

となり，Solid Edge を使って解析的に求めた慣性モーメントの値  $751.9[\text{kgm}^2]$  とほぼ一致する事がわかる．ここで発生した誤差も，先ほどの重軸回りの慣性モーメントを求めたときと同様に同様にアームを直方体として直方体として扱ったために生じたものだと考えられる．

次に，リンクアームの先端部分及び中心部分のブレードを取り付ける部分に  $117.72[\text{N}]$  の荷重，及びリンクアームの自重をかけて構造解析を行った．

### 3.1.2 応力の解析

基準となるリンクアームの応力図を図 11 に示す．

この応力図の結果より，アームの根元部分に大きな応力がかかっているということがわかった．この時，図 12 に示す結果が Solid Edge より出力された．

Solid Edge によって得た応力の結果と，応力の理論値を比較する．

アームの自重を  $M_{arm}$ ，回転軸とアームの重心点の距離を  $R_a$ ，アーム中心部に設置されたブレードの荷重による力を  $F_1$ ，回転軸とアームの中心部の距離を  $R_{b1}$ ，アーム先端に設置されたブレードの荷重による力を  $F_2$ ，回転軸とアーム先端部の距離を  $R_{b2}$  とすると，アームの部分にかかる曲げモーメント  $M$  は式 5 で表される．ただし，重力加速度は  $g$  と置いた．

$$M = M_{arm}gR_a + F_1R_{b1} + F_2R_{b2} \quad (5)$$

今回，アームの重さが  $485.832[\text{kg}]$  であるので， $M_{arm} = 485.8$ ， $g = 9.81$ ， $R_a = 1.036$ ， $F_1 = F_2 = 117.7$ ， $R_{b1} = 1$ ， $R_{b2} = 2$  を代入すると，式 6 となる．このとき， $R_a$  は先ほど求めた回転軸と重心の軸間距離を使用した．

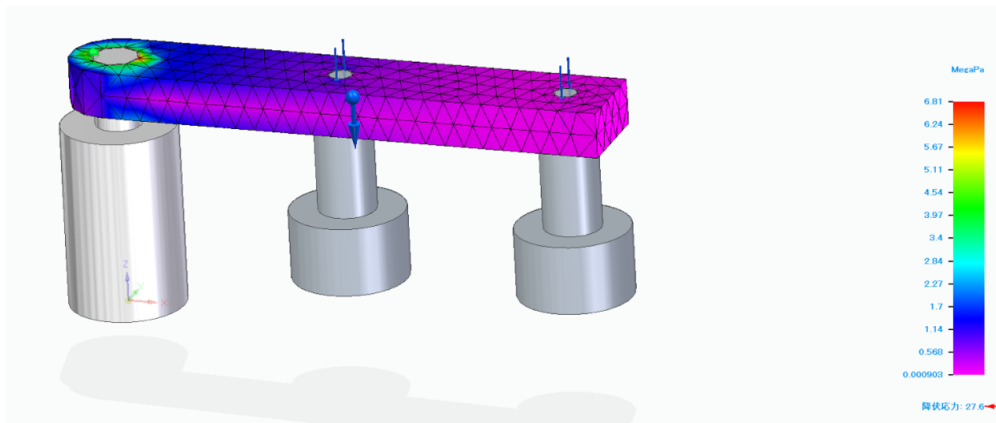


図 11 基準ロボットの応力図

結果構成要素:フォンミーゼス				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0.000903 MPa	2200.000 mm	-200.000 mm	900.000 mm
最大	6.81 MPa	100.000 mm	0.000 mm	1100.000 mm

図 12 基準ロボットの応力解析結果

$$\begin{aligned}
 M &= M_{arm}gR_a + F_1R_{b1} + F_2R_{b2} \\
 &= 485.8 * 9.81 * 1.036 + 1 * 117.7 + 2 * 117.7 \\
 &= 5114
 \end{aligned} \tag{6}$$

となるので、曲げモーメント  $M$  は  $5114[\text{kgm}^2]$  となる。  
 ここで、応力  $\sigma$  は、断面係数  $Z$  を用いて、式 7 と書ける。

$$\sigma = \frac{M}{Z} \tag{7}$$

また、断面係数  $Z$  は、直方体の  $Y$  方向長さ  $b$  と、直方体の  $Z$  方向長さ  $h$  を使って、式 8 と書ける。

$$Z = \frac{bh^2}{6} \tag{8}$$

今回、 $b = 0.4[\text{m}]$ 、 $h = 0.2[\text{m}]$  であるので、式 8 より、式 9 と計算できる。

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{bh^2}{6} \\
 &= \frac{0.4 * 0.2^2}{6} \\
 &= 0.002667
 \end{aligned} \tag{9}$$

求めた曲げモーメント  $M$  及び断面係数  $Z$  を式 7 に代入し、応力を求めると式 10 となる。

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{M}{Z} \\
 &= \frac{5114.3}{0.002667} \\
 &= 1917528[\text{Pa}] \\
 &= 1.92[\text{MPa}]
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

となる．ただしこれは、穴が空いていない場合の応力の値である．

中心部における穴の空いていない部分は、図 11 の応力分布をみると青く表示されており、約 1.9[MPa] の応力がかかっていることが分かる．ゆえに、この解析結果は正しいと分かる．

穴が開いている部分に関しては、応力集中が起こるため、先ほど計算した穴が空いていない場合にかかる応力よりも大きくなる．穴の周辺で応力が大きくなっていることが図 11 から読み取れる．

さらに、穴の周辺での最大応力は、穴が空いていない部分応力の約 3～4 倍になることが知られており、Solid Edge によって得られた最大応力 6.81[MPa] という値も正しいということが分かる．

今回した素材である、アルミニウム 1060 の降伏応力は 27.6[MPa] であるので、安全率は 3 を満たすためには、式 11 より、許容応力が 9.2[Mpa] であることが分かる．

$$\text{許容応力} = \frac{\text{降伏応力}}{\text{安全率}} = 9.2[\text{MPa}]
 \tag{11}$$

今回、最大応力は 6.81[MPa] であり、許容応力以下であるため安全率 3 の基準を満たしているといえる．

### 3.1.3 変位の解析

次に、重力及び荷重によってかかる変位について解析する．

Solid Edge のシミュレーション機能を用いて変位を解析した所、変位分布は図 13 となった．

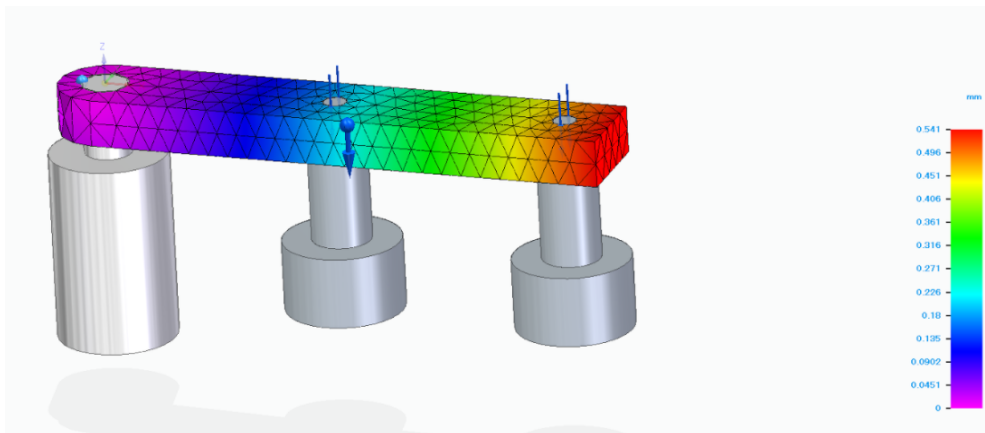


図 13 基準口ボットの変位分布

この応力図の結果より、アームの先端部分に大きな変位が生じることがわかった．

この時、図 14 に示す変位結果が Solid Edge より出力された．

シミュレーションによって数値的に得た変位の結果と、解析的に計算した変位の結果を比較する．

材料を引っ張った際の垂直応力  $\sigma$  と垂直ひずみ  $\epsilon$  の関係は縦弾性係数  $E$  を用いて、式 12 と表せる．

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma
 \tag{12}$$

また、材料を引っ張った際のせん断応力  $\tau$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係は、横弾性係数  $G$  を用いて、式 13 と表せる．



結果構成要素:全並進				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0 mm	70.711 mm	-70.711 mm	1100.000 mm
最大	0.541 mm	2200.000 mm	-200.000 mm	900.000 mm

図 14 基準ロボットの変位解析結果

$$\gamma = \frac{1}{G}\tau \quad (13)$$

しかし、式 12 及び式 13 を使用して計算した場合、SolidEdge のシミュレーション結果によって出力された値とは一致しなかった。

その理由は、式 12 及び式 13 で求められるのは応力をかけた場合のひずみであり、変位とは異なるものだからである。

そこで、カスティリアノの定理を用いて変位の理論解を計算することにした。

カスティリアノの定理とは、ひずみエネルギー  $U$  を、荷重  $W_i$  で偏微分することで、その荷重が作用している点での荷重の作用方向の変位  $v_i$  を得ることが出来るという定理であり、式 14 で表される。

$$\frac{\partial U}{\partial W_j} = v_j \quad (14)$$

ここで、弾性エネルギー  $U$  は、曲げモーメント  $M$  及び縦弾性係数  $E$ 、そして断面二次モーメントを  $I$ 、アームの回転中心からアーム先端までの距離を  $l$  とした時、式 15 となる。

$$U = \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx \quad (15)$$

この弾性エネルギー  $U$  の値をカスティリアノの定理に適用すると、式 16 を得る。

$$v_j = \frac{\partial U}{\partial W_j} = \frac{\partial}{\partial W_j} \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx = \int_0^l \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial W_j} dx \quad (16)$$

ゆえに、今回のたわみ  $v$  は、先ほど求めた曲げモーメント及びその偏微分値を使用して計算すると式 17 となる。ただし、 $R_1$  はアーム中心部に設置したブレードによる荷重、 $l_1$  はアームの回転中心とアーム中心部に設置したブレードとの距離、 $R_2$  はアーム先端部に設置したブレードによる荷重、 $l_2$  はアームの回転中心とアーム中心部に設置したブレードとの距離、 $W$  はアームの自重による荷重、 $l$  はアームの回転中心からアーム先端までの距離である。

$$\begin{aligned} v &= \int_0^l \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial W_j} dx \\ &= -\frac{1}{EI} \left( -\frac{R_1}{3} l_1^3 - \frac{R_2}{3} l_2^3 - \frac{W}{8} l^4 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

また、断面二次モーメント  $I$  は直方体の Y 方向長さ  $b = 0.4[\text{m}]$  と、直方体の Z 方向長さ  $h = 0.2[\text{m}]$  を使って、式 18 のように求められる。

$$\begin{aligned} I &= \frac{bh^3}{12} \\ &= \frac{0.4 * 0.2^3}{12} \\ &= 0.0002667 \end{aligned} \quad (18)$$

式 17 に，各種値， $R_1 = 117.6[\text{N}]$ ， $l_1 = 1.0[\text{m}]$ ， $R_2 = 117.6[\text{N}]$ ， $l_2 = 2.0[\text{m}]$ ， $W = 485.8 * 9.81$ ， $l = 2.0[\text{m}]$ ， $I = 0.0002667[\text{m}^4]$ ，そしてアルミニウム 1060 の縦弾性係数  $E = 68.60[\text{GPa}]$  を代入すると，変位  $v[\text{mm}]$  は，式 19 となる．

$$\begin{aligned}
 v &= -\frac{1}{EI} \left( -\frac{R_1}{3} l_1^3 - \frac{R_2}{3} l_2^3 - \frac{W}{8} l^4 \right) \\
 &= -\frac{1}{18.26 * 10^6} \left( -\frac{117.6}{3} 1^3 - \frac{117.6}{3} 2^3 - \frac{485.8 * 9.81}{8} 2^4 \right) \\
 &= -\frac{1}{18.26 * 10^6} (-9875.1) \\
 &= 0.0005408[\text{m}]
 \end{aligned} \tag{19}$$

となり，カスティリアノの定理を用いて計算した理論的な変位は  $0.0005408[\text{m}] = 0.5408[\text{mm}]$  となった．Solid Edge のシミュレーション結果は  $0.541[\text{mm}]$  であったため，この解析結果は正しいことが分かる．

### 3.2 基準ロボットの機構解析

ここでは，基準ロボットの機構解析を行っていく．

ロボットアームに対して，基準座標系  $\Sigma_0$ ，リンク座標系  $\Sigma_1$ ，及び手先座標系  $\Sigma_E$  を記述したのが図 15 である．

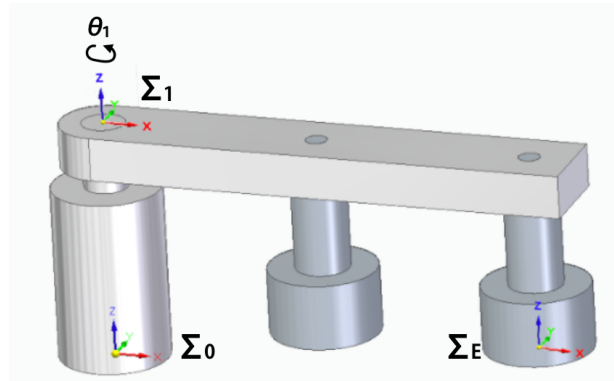


図 15 基準ロボットの各種座標系

このロボットアームのリンクパラメータを DH 記法を用いて書くと表 3 となる．今回，手先としてアーム先端のブレード部分を選んだ．

表 3 リンクパラメータ

$i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	1100[mm]	$(\theta_1)$
2	2000[mm]	0	-900[mm]	0

SimXpert を使用して，今回作成したアームロボットの関節回転角度を求めた結果を図 16 に示す．

図 16 のグラフは，横軸に経過時間，縦軸に回転角 [rad] を取っている．

このシミュレーションで得られたアームロボットの回転角度を，理論解と比較する．

アームの慣性モーメントを  $I$ ，アームを回転させるトルクを  $\tau$ ，回転角を  $\theta$  とした時に，式 20 が成り立つ．

$$\tau = I \frac{d^2 \theta}{dt^2} \tag{20}$$

式 20 に，今回の関節駆動トルク  $\tau = 393$ ，そして慣性モーメント  $I = 751.9$  を代入すると，式 21 となる．

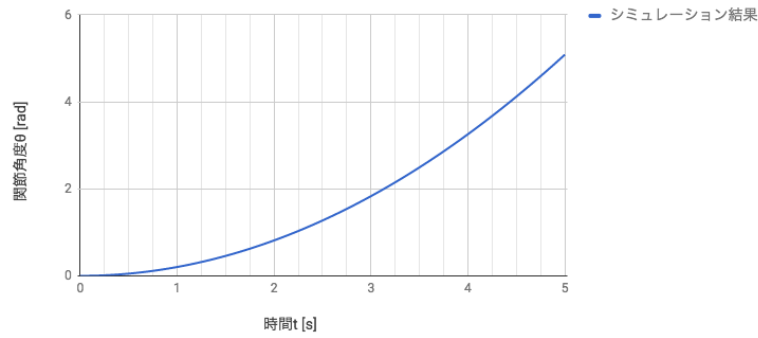


図 16 基準ロボットのアームの関節回転角

$$393 = 751.9 \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (21)$$

式 21 は、時間に関する 2 階微分であるので、角速度及び角度の初期値を 0 として両辺時間で 2 度積分することで微分方程式を解くと、式 22 の角度の関数を得る。

$$\theta = 0.2613t^2 \quad (22)$$

先ほど SimXpert で得られたシミュレーションの結果と、式 22 で求めた  $\theta$  に関する式を比較したのが図 17 である。

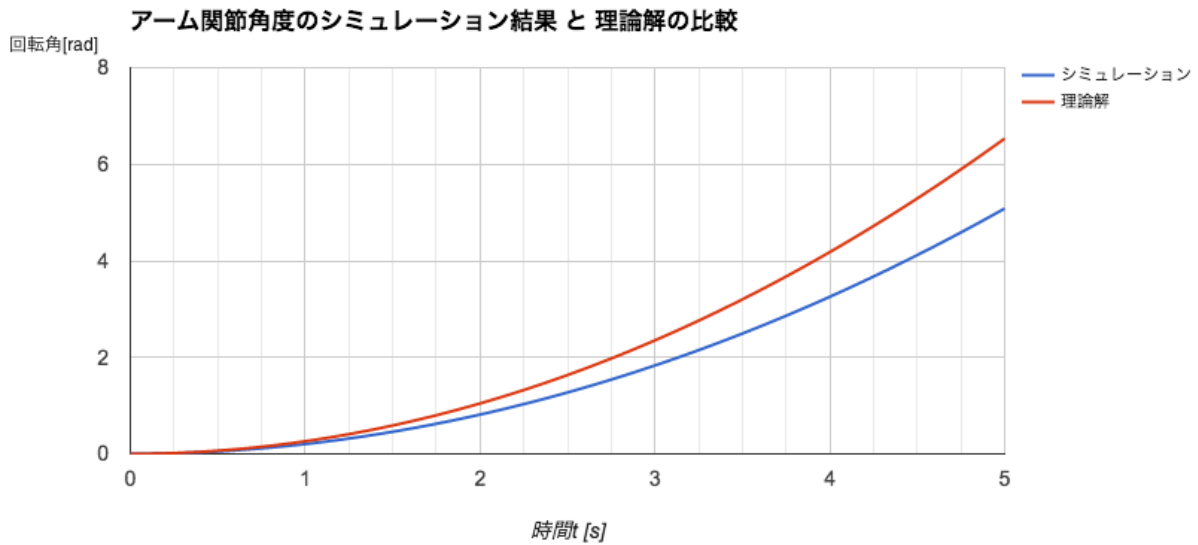


図 17 シミュレーション結果と理論解の回転角度の比較

理論解のほうが少し回転角が大きくなっていることが図 17 より分かる。これは、シミュレーション時には、ブレード部分の質量を考慮しているが、理論解を出す場合は単純化のためにアーム部分のみを考えている。その為、シミュレーションを行ったときのほうがブレード部分だけ慣性モーメント及び質量が大きくなっている。ゆえに、シミュレーション結果のほうが理論解に比べて回転量が小さくなってしまったと考えられる。この関節角度のシミュレーション結果を最小二乗法を用いて 2 次の多項式近似を行うと、式 23 を得ることが出来る。

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= 0.203t^2 + 0.00131x - 0.000527 \\ &\approx 0.203t^2 \end{aligned} \quad (23)$$

式 23 で得た関節加速度を使用し，手先加速度及び手先速度の理論値を計算し，シミュレーション結果と比較する．

手先加速度に関して，SimXpert を使って求めたものは手先加速度のノルムがどんどん上がっていた．同じ大きさのトルクを掛け続けた場合，手先加速度のノルムは常に一定となるはずであり，図??の手先加速度のシミュレーション結果は，明らかに間違っているといえる．そこで，この手先加速度のシミュレーション結果より議論するのではなく，次に示す手先速度のシミュレーション結果を元にして手先加速度を割り出すという方法を取ることにする．

SimXpert より出力された手先速度を図 18 に示す．

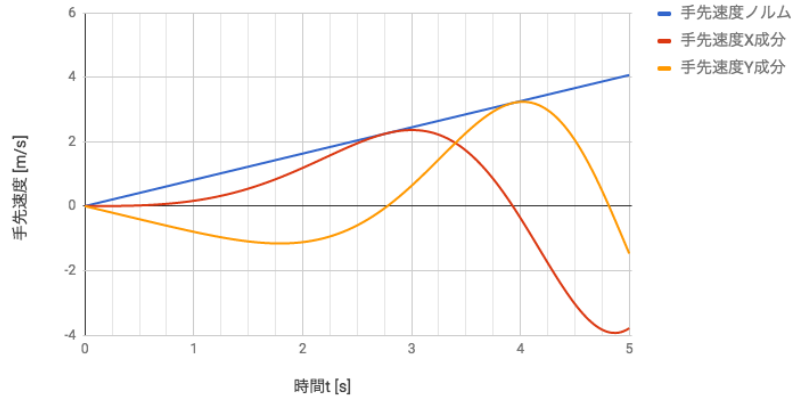


図 18 手先速度のシミュレーション結果

次に，この手先速度のシミュレーション結果の妥当性を理論解と比較することで検証する．先ほど，式 23 で， $\theta = 0.203t^2$  を得た．

ゆえに，角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  は式 23 を両辺  $t$  で時間微分することで得られ，式 24 となる．

$$\frac{d\theta}{dt} = 0.406t \quad (24)$$

ここで，角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  と手先速度の大きさ  $v$  の間には，式 25 の関係がある．ただし，回転中心と手先間の距離を  $r$  と置いた．

$$v = r \frac{d\theta}{dt} \quad (25)$$

式 24，及び式 25 より，手先速度の大きさの理論解は式 26 となる．

$$\begin{aligned} v &= r(0.406t) \\ &= 2(0.406t) \\ &= 0.812t \end{aligned} \quad (26)$$

ゆえに，手先速度の理論解は  $v = 0.812t$  と求まった．

SimXpert によって得られた手先速度のシミュレーション結果を最小二乗法によって 1 次関数近似を行うと，式 27 を得る．

$$\begin{aligned} v &= 0.813t + 0.00147 \\ &\approx 0.813t \end{aligned} \quad (27)$$

手先速度のシミュレーション結果によって得られた式 27 と式 26 の理論解は一致しており，シミュレーション結果が正しいと考えられる．

ここで，この手先速度を時間微分したものが手先加速度であるため，手先加速度として  $0.813[\text{m/s}^2]$  を得る．

手先加速度の理論解および数値解のグラフを図??に示す．

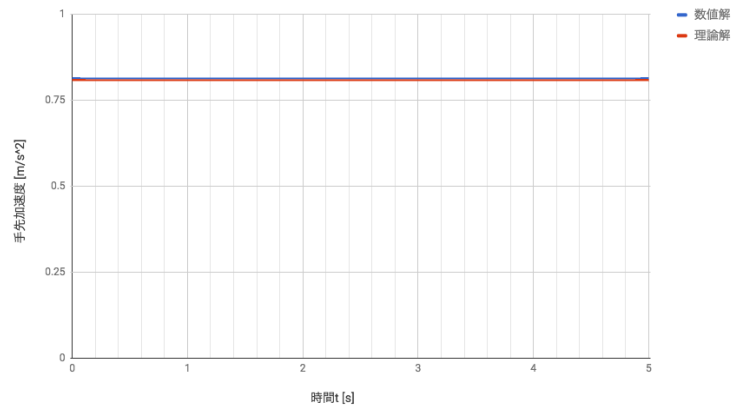


図 19 先端加速度の理論解と数値解の比較

#### 4. 先端加速度をあげるために再設計したロボットの解析

ここでは，先端加速度をあげるために軽量化を行うべく再設計したロボットアームの解析を行う．  
解析の手順は，基準となるロボットの解析をした時と同じである．

##### 4.1 先端加速度をあげるために再設計したロボットの構造解析

ここでは，先端加速度を上げるために再設計したロボットの構造解析を行う．

###### 4.1.1 慣性モーメントの解析

SolidEdge を使って求めたリンクアームの体積，質量，慣性モーメントに加え，材質と密度をまとめて記載したものが表 4 である．有効数字は 4 桁とした．

表 4 リンクアームの各値

材質	アルミニウム 1060
密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	2712
体積 $[\text{m}^3]$	0.1195
質量 $[\text{kg}]$	324.1
慣性モーメント	576.4 $[\text{kgm}^2]$

まず，慣性モーメントについて考える．

基準となるロボットとは異なり，形状が複雑となり，慣性モーメントを求めるのが複雑であるので，慣性モーメントの理論値とシミュレーションによって求めた慣性モーメントの値の大小関係が一致しているかという点でシミュレーション結果の妥当性を考える．

今回の先端加速度をあげるために再設計したロボットのアームについて，重心軸周りの慣性モーメント  $I_G$  は  $175.9[\text{kgm}^2]$  となった．

ゆえに，軸間距離  $d = 1.105[\text{m}]$ ，重心周りの慣性モーメント  $I_G = 176.0[\text{kgm}^2]$  及び質量  $M = 324.1[\text{kg}]$  を使い，平行軸の定理より慣性モーメントを求めると式 28 となる．

$$\begin{aligned}
 I &= I_G + d^2 M \\
 &= 176.0 + 1.105^2 \cdot 324.1 \\
 &= 571.7
 \end{aligned} \tag{28}$$

となり，平行軸の定理を使って求めた慣性モーメントの値  $I = 571.7[\text{kgm}^2]$  は SolidEdge の解析機能を使って求め

た慣性モーメントの値  $I = 576.4[\text{kgm}^2]$  ものとはほぼ一致する。

また，手先加速度をあげるために再設計したロボットは，基準ロボットから直方体を切り抜いたものであるので，慣性モーメント及び質量は小さくなっていることが予想される。

基準ロボットと今回手先加速度を上げるために再設計したロボットの各値を比較したのが表 5 である。

表 5 リンクアームの各値

項目	基準アーム	手先加速度を上げるために再設計したアーム
体積 $[\text{m}^3]$	0.1792	0.1195
質量 $[\text{kg}]$	485.8	324.1
慣性モーメント $[\text{kgm}^2]$	751.9	576.4

表 5 を見て分かるように，再設計後は体積，質量，慣性モーメントの全てが小さくなっているため，SolidEdge の解析結果は正しいことが分かる。

#### 4.1.2 応力の解析

次に，応力の解析及びその解析結果の検証を行っていく．手先加速度をあげるために再設計したロボットのアームの応力図を図 32 に示す。

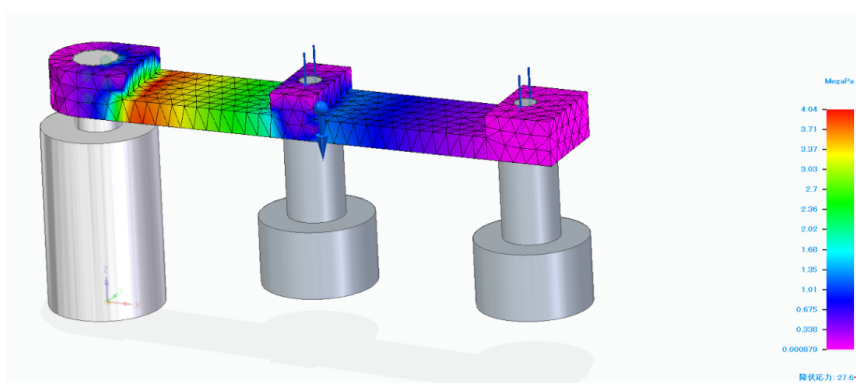


図 20 手先加速度を重視したロボットの構造解析の応力図

この時，図 21 に示す結果が Solid Edge より出力された。

結果構成要素:フォンミーゼス				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0.000879 MPa	2200.000 mm	200.000 mm	1100.000 mm
最大	4.04 MPa	268.245 mm	0.237 mm	1000.000 mm

図 21 手先加速度を上げるために再設計したロボットの応力解析結果

Solid Edge によって得た応力の結果と，解析的に計算した応力の値を比較する。

アームの自重を  $M_{arm}$ ，回転軸とアームの重心点の距離を  $R_a$ ，アーム中心部に設置されたブレードの荷重による力を  $F_1$ ，回転軸とアームの中心部の距離を  $R_{b1}$ ，アーム先端に設置されたブレードの荷重による力を  $F_2$ ，回転軸とアーム先端部の距離を  $R_{b2}$  とすると，アームの部分にかかる曲げモーメント  $M$  は式 29 で表される．ただし，重力加速度は  $g$  と置いた。

$$M = M_{arm}gR_a + F_1R_{b1} + F_2R_{b2} \quad (29)$$

今回、アームの重さが 324.1[kg] であるので、 $M_{arm} = 324.1$ 、 $g = 9.81$ 、 $R_a = 1.03$ 、 $F_1 = F_2 = 117.7$ 、 $R_{b1} = 1$ 、 $R_{b2} = 2$  を代入すると、式 30 となる。このとき、 $R_a$  は先ほど求めた回転軸と重心の軸間距離を使用した。

$$\begin{aligned} M &= M_{arm}gR_a + F_1R_{b1} + F_2R_{b2} \\ &= 324.1 * 9.8 * 1.03 + 1 * 117.7 + 2 * 117.7 \\ &= 3624 \end{aligned} \quad (30)$$

よって、曲げモーメント  $M$  は 3624[kgm<sup>2</sup>] となる。

また、今回の断面係数  $Z$  は、直方体の  $Y$  方向長さ  $b = 0.4$ [m] と、直方体の  $Z$  方向長さ  $h = 0.1$ [m] を使って、式 31 と書ける。

$$\begin{aligned} Z &= \frac{bh^2}{6} \\ &= \frac{0.4 * 0.1^2}{6} \\ &= 0.000667[\text{m}^3] \end{aligned} \quad (31)$$

ここで、応力  $\sigma$  は、断面係数  $Z$  を用いて、式 32 と書ける。

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M}{Z} \\ &= 5433883[\text{Pa}] \\ &= 5.4[\text{MPa}] \end{aligned} \quad (32)$$

SolidEdge を用いて計算した結果は 4.04[MPa] で、理論解は 5.4[MPa] となった。

基準となるロボットアームに比べて今回のロボットは形状が複雑であるので、誤差が大きくなってしまった。

基準となるロボットアームと、今回のロボットの同部位に働いている応力の大小関係を比較することで、今回の応力解析の結果の妥当性を検証する。

図 22 に、基準ロボット及び今回再設計したロボットの応力図の比較を示す。

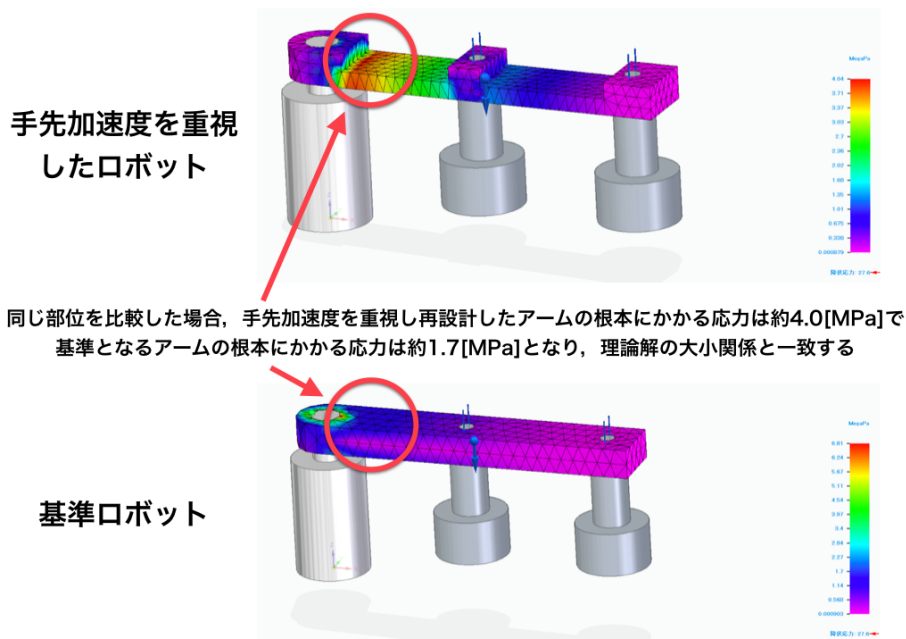


図 22 同部位にかかる応力の大きさの比較

今回のロボットは軽量化のためにアームの一部が細くなっているため、同部位を比べた場合、今回のロボットにかかる応力のほうが大きくなっているはずである。

図 22 で述べた大小関係が理論解と一致している。形状が複雑なので、誤差はあるが大小関係が理論解と一致しているため、今回の解析結果は正しいと判断できる。

基準ロボットの安全率に関して考えたときと同じく、安全率は 3 を満たすためには、式 11 より、許容応力が 9.2[MPa] であることが分かる。

今回、最大応力は 4.04[MPa] であり、許容応力以下であるため安全率 3 の基準を満たしているといえる。

#### 4.1.3 変位の解析

次に、重力及び荷重によってかかる変位について解析する。

Solid Edge のシミュレーション機能を用いて変位を解析した所、変位分布は図 23 となった。

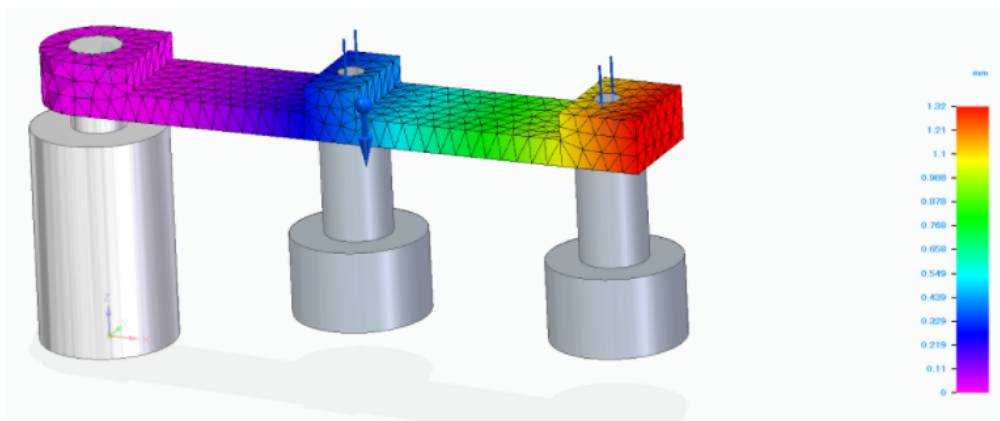


図 23 手先加速度を上げるために再設計したロボットの変位分布

この時、図 24 に示す変位結果が Solid dge より出力された。

結果構成要素:全並進				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0 mm	80.902 mm	-58.779 mm	1100.000 mm
最大	1.32 mm	2200.000 mm	28.571 mm	1100.000 mm

図 24 手先加速度を上げるために再設計したロボットの変位解析結果

基準となるロボットのアームに比べて、手先加速度を上げるために再設計したロボットのアームは細いため、変位が増えていると考えられる。

シミュレーションの結果によると、基準となるロボットアームの Z 方向最大たわみは 0.541[mm] であり、手先加速度を上げるために再設計したロボットアームの Z 方向最大たわみは 1.32[mm] であるので、たわみの理論解と大小関係が一致する。

よって、変位のシミュレーション結果は正しいと考えられる。

#### 4.2 手先加速度をあげるために再設計したロボットの機構解析

ここでは、手先加速度をあげるために再設計したロボットアームの機構解析を行う。

ロボットアームに対して、基準座標系  $\Sigma_0$ 、リンク座標系  $\Sigma_1$ 、及び手先座標系  $\Sigma_E$  を記述したのが図 25 である。

このロボットアームのリンクパラメータを DH 記法を用いて書くと表 6 となる。今回、手先としてアーム先端のブレード部分を選んだ。

次に、関節角度の理論解及びシミュレーション結果を比較する。



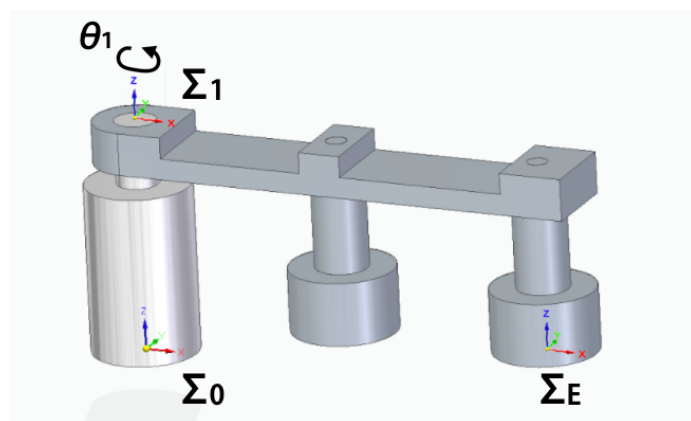


図 25 手先加速度を重視し再設計したロボットの各種座標系

表 6 リンクパラメータ

$i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	1100[mm]	$(\theta_1)$
2	2000[mm]	0	-900[mm]	0

SimXpert を使用して、今回作成したアームロボットの関節回転角度を求めた結果を図 36 に示す。

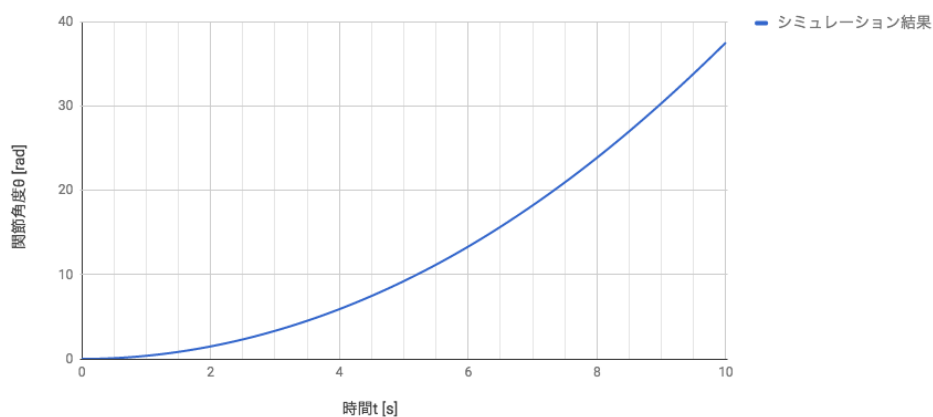


図 26 手先加速度を上げるために再設計したロボットのアームの関節回転角

式 20 で示した回転の運動方程式に、関節駆動トルク  $\tau = 393$ ，そして慣性モーメント  $I = 576.445$  を代入すると，式 33 となる。

$$393 = 576.445 \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (33)$$

式 33 は、時間に関する 2 階微分であるので、角速度及び角度の初期値を 0 として両辺 2 度積分することで微分方程式を解くと、式 34 の角度の関数を得る。

$$\theta = 0.34088t^2 \quad (34)$$

式 34 で求めた  $\theta$  に関する式と、SimXpert によって得られたシミュレーション結果を比較したのが図 27 である。多少の誤差はあるが、図 27 より、シミュレーション結果は正しいことが分かる。

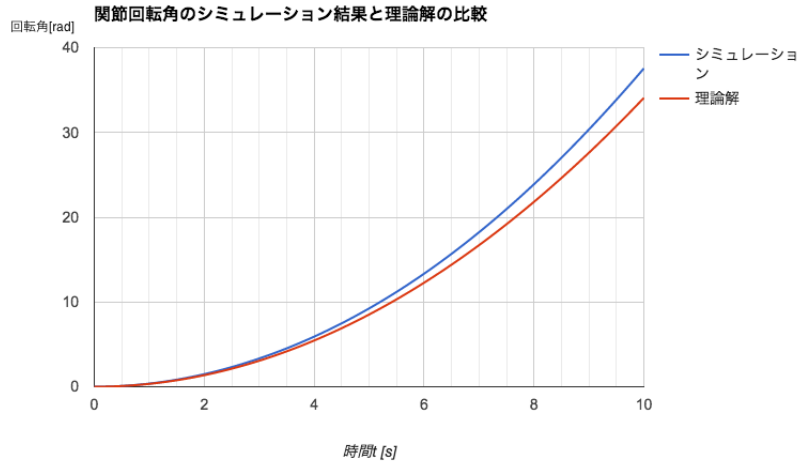


図 27 シミュレーション結果と理論解の回転角度の比較

この関節角度のシミュレーション結果を最小二乗法を用いて 2 次の多項式近似を行うと、式 35 を得ることが出来る。

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= 0.382t^2 - 0.077t + 0.078 \\ &\approx 0.382t^2\end{aligned}\quad (35)$$

式 35 で得た関節加速度を使用し、手先加速度及び手先速度の理論値を計算し、シミュレーション結果と比較する。

手先加速度に関しては、基準ロボットの手先加速度について考えたときと同様に、手先速度のシミュレーション結果元にして手先加速度を割り出すという方法を取ることにする。

SimXpert より出力された手先速度を図 28 に示す。この時、青の破線が手先加速度の X 方向成分、赤の破線が手先加速度の Y 方向成分、そして赤の実線が手先加速度のノルムを表している

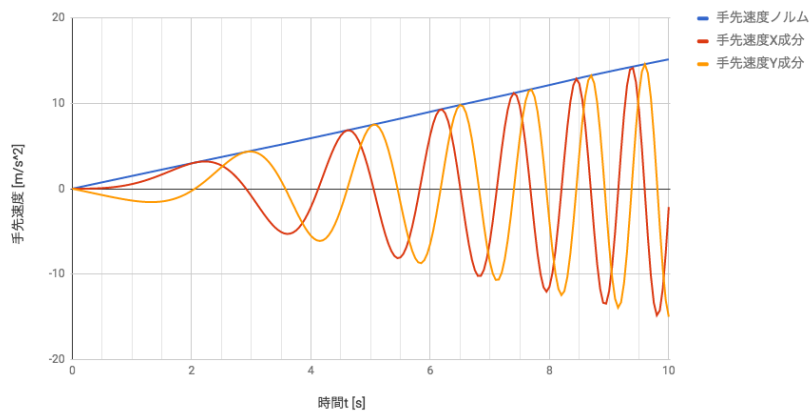


図 28 手先速度のシミュレーション結果

次に、この手先速度のシミュレーション結果の妥当性を理論解と比較することで検証する。

先ほど、式 34 で、 $\theta = 0.382t^2$  を得た。

角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  は式 34 を両辺  $t$  で時間微分することで得られるため、式 36 となる。

$$\frac{d\theta}{dt} = 0.764t \quad (36)$$

ここで、角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  と手先速度の大きさ  $v$  の間には、式 25 の関係がある。ただし、回転中心と手先間の距離を  $r$  と置いた。

$$v = r \frac{d\theta}{dt} \quad (37)$$

式 36、及び式 37 より、手先速度の大きさの理論解は式 38 となる。

$$\begin{aligned} v &= r(0.764t) \\ &= 2(0.764t) \\ &= 1.528t \end{aligned} \quad (38)$$

ゆえに、手先速度の理論解は  $v = 1.528t$  と求まった。

図 38 に示した、SimXpert による手先速度のシミュレーション結果と、手先速度の理論解を比較したのが図 29 である。

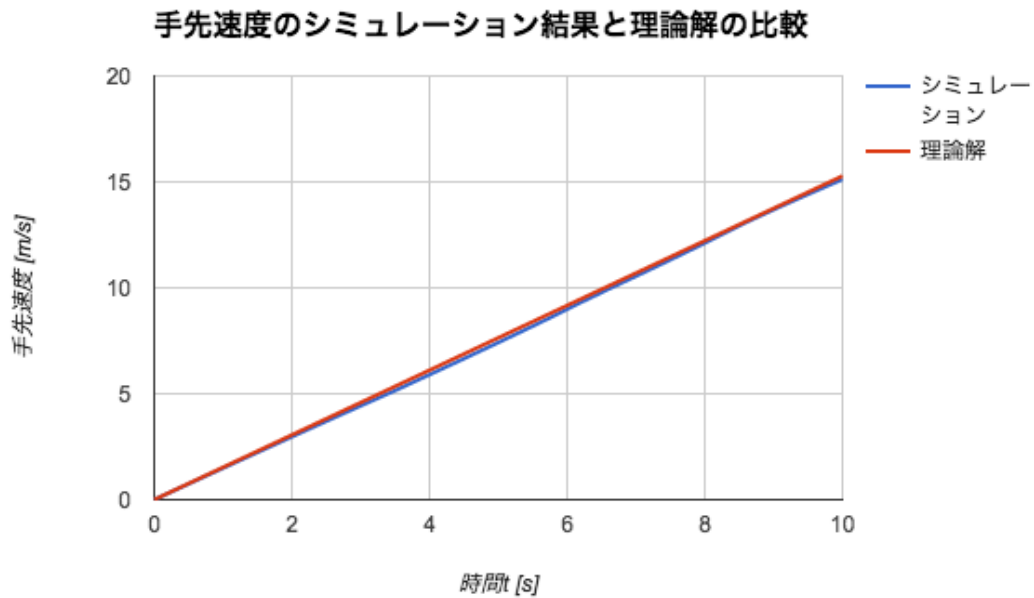


図 29 手先速度のシミュレーション結果と理論解の比較

SimXpert によって得られた手先速度のシミュレーション結果を最小二乗法によって 1 次関数近似を行うと、式 39 を得る。

$$\begin{aligned} v &= 1.523t - 0.102 \\ &\approx 1.523 \end{aligned} \quad (39)$$

手先速度のシミュレーション結果によって得られた式 39 と式 38 の理論解は一致しており、シミュレーション結果が正しいと考えられる。

ここで、この手先速度を時間微分したものが手先加速度であるため、手先加速度として  $1.528[\text{m/s}^2]$  を得る。手先加速度の理論解および数値解のグラフを図 30 に示す。

## 5. 強度を考慮し再設計したロボットの解析

ここでは、強度をあげるために再設計したロボットアームの解析を行う。

解析の手順は、基準となるロボットの解析をした時及び手先加速度を上げるために再設計したロボットについて解析した時と同じである。

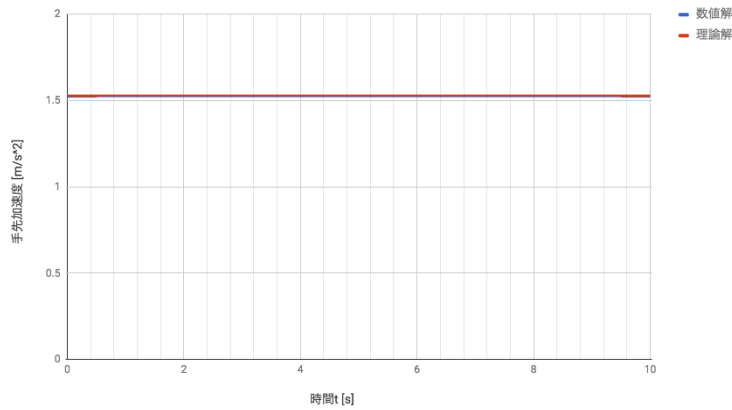


図 30 手先加速度の理論解と数値解の比較

### 5.1 強度を考慮し再設計したロボットの構造解析

強度を考慮して再設計したロボットの構造解析を行う。

SolidEdge を使って求めたリンクアームの体積，質量，慣性モーメントに加え，材質と密度をまとめて記載したものが表 7 である。

表 7 リンクアームの各値

材質	アルミニウム 1060
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	2712.0
体積 [m <sup>3</sup> ]	0.20503
質量 [kg]	556.052
慣性モーメント	765.744 [kgm <sup>2</sup> ]

まず，慣性モーメントについて考える。

基準となるロボットとは異なり，形状が複雑となり，慣性モーメントを求めるのが複雑であるので，慣性モーメントの理論値とシミュレーションによって求めた慣性モーメントの値の大小関係が一致しているかという点でシミュレーション結果の妥当性を考える。

今回の手先加速度をあげるために再設計したロボットのアームについて，重心軸周りの慣性モーメント  $I_G$  は 265.419[kgm<sup>2</sup>] となった。

ゆえに，軸間距離  $d = 0.954$ [m]，重心周りの慣性モーメント  $I_G = 265.419$ [kgm<sup>2</sup>] 及び質量  $M = 556.052$ [kg] を使い，平行軸の定理より慣性モーメントを求めると式 40 となる。

$$\begin{aligned}
 I &= I_G + d^2 M \\
 &= 265.419 + 0.954^2 556.052 \\
 &= 771.491
 \end{aligned} \tag{40}$$

となるので，平行軸の定理を用いて求めた慣性モーメントの値は 771.491[kgm<sup>2</sup>]，シミュレーションで得た慣性モーメントの値は 765.744[kgm<sup>2</sup>] とほぼ一致しているため，今回のシミュレーション結果は正しいといえる。

また，強度をあげるために再設計したロボットは，基準ロボットの根元部分を分厚くして補強したものであるため，慣性モーメント及び質量は大きくなっていることが予想される。

基準ロボットと今回強度をあげるために再設計したロボットの体積，質量及び慣性モーメントの値を比較したのが表 8 である。

表 8 を見て分かるように，再設計後は体積，質量，慣性モーメントの全てが大きくなっているため，SolidEdge の

表 8 リンクアームの各値

項目	基準アーム	強度を重視して再設計したアーム
体積 [m <sup>3</sup> ]	0.17915	0.20503
質量 [kg]	485.832	556.052
慣性モーメント [kgm <sup>2</sup> ]	751.9	765.744

解析結果は正しいことが分かる。

今回、質量の上昇量に対して慣性モーメントはあまり大きく変動しなかった。

ロボットアームの慣性モーメント  $I$  は、微小部分の慣性モーメント  $dI$  をアーム全体で積分したもののなので、式 41 と書くことが出来る。

$$I = \int dI \quad (41)$$

ここで、この物体の微小部分が作る慣性モーメント  $dI$  はその微小部分の回転中心からの距離  $r$  とその部分の微小質量  $dm$  を使って、式 42 と書ける。

$$dI = r^2 dm \quad (42)$$

式 42 からわかるように、回転中心に近い場所の質量を大きくした場合、質量の増加量に対して慣性モーメントの増加量は小さくなり、回転中心から遠い場所の質量を重くした場合、質量の増加量に対して慣性モーメントの増加量は大きくなる。

今回、回転中心に近い場所を補強し、質量を大きくしたため、理論的には質量の上昇量に対して慣性モーメントはあまり大きく変動しないという結果が得られるはずであり、これも今回の解析結果と一致する。

#### 5.1.1 応力の解析

次に、応力の解析及びその解析結果の検証を行っていく。手先加速度をあげるために再設計したロボットのアームの応力図を図 31 に示す。

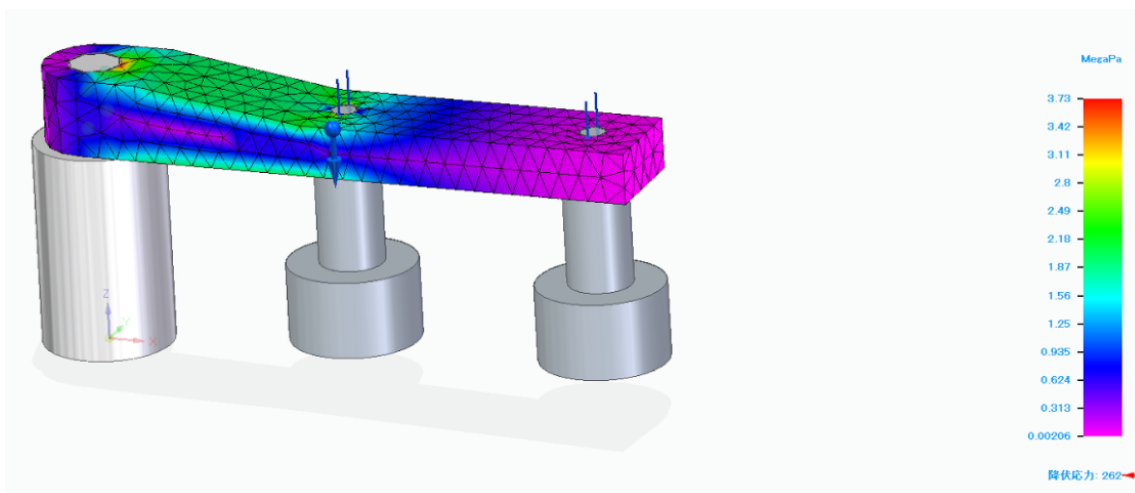


図 31 強度を重視したロボットの構造解析の応力図

この時、図 32 に示す結果が Solid Edge より出力された。

基準となるロボットアームに比べて今回のロボットは形状が複雑であるので、このシミュレーション結果の妥当性を、解析解の大小関係によって評価する。

結果構成要素:フォンミーゼス				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0.00206 MPa	2200.000 mm	-200.000 mm	1000.000 mm
最大	3.73 MPa	100.000 mm	0.000 mm	1100.000 mm

図 32 強度を重視したロボットの応力解析結果

基準となるロボットアームの根元部分に大きな応力がかかることがわかったので、今回は強度を高めるためにアーム根元部分の断面積を増やした。

よって、今回の強度を高めるために再設計したロボットアームは、応力が基準となるロボットアームより小さくなっている必要がある。

基準ロボットの最大応力は 6.81[MPa] であり、今回強度を重視して再設計の最大応力は 3.73[Mpa] であったため、シミュレーション結果は正しいと考えられる。

許容応力は 27.6[MPa] であるので、安全率は式 43 より、7.39 となる。

$$\begin{aligned}
 \text{安全率} &= \frac{\text{許容応力}}{\text{最大応力}} \\
 &= 7.39
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

#### 5.1.2 変位の解析

次に、重力及び荷重によってかかる変位について解析する。

Solid Edge のシミュレーション機能を用いて変位を解析した所、変位分布は図 33 となった。

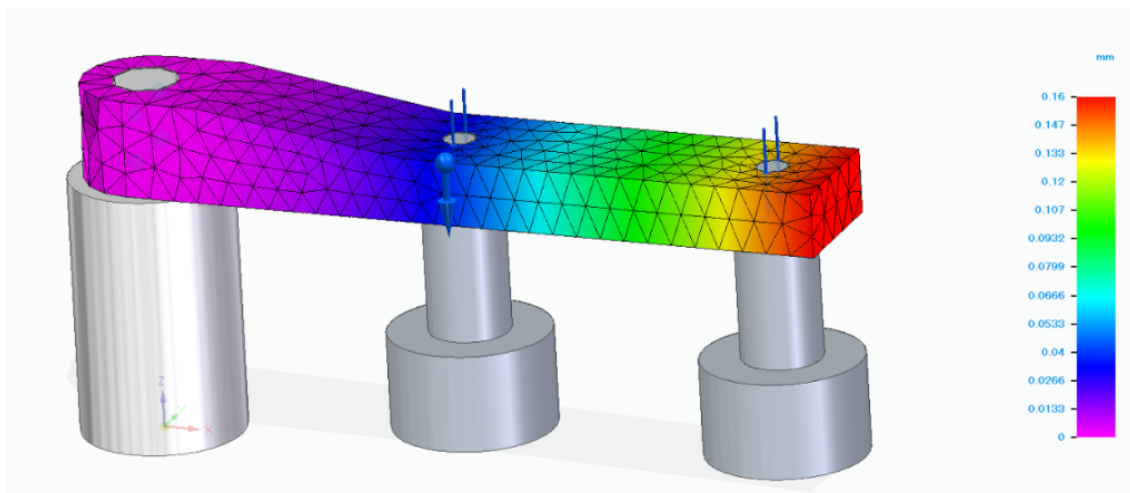


図 33 強度を上げるために再設計したロボットの変位分布

この時、図 34 に示す変位結果が Solid Edge より出力された。

強度を上げるために再設計したロボットは、根本の断面積が大きく、たわみにくい。よってたわみ角が小さくなるので、理論的には基準となるロボットアームよりたわみ量が小さくなるはずである。

実際、基準となるロボットアームの変位は 0.541[mm] であり、今回強度を重視し再設計したアームの変位は 0.16[mm] となった。

よって、シミュレーション結果は正しいと考えられる。

結果構成要素:全並進				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0 mm	0.000 mm	100.000 mm	1100.000 mm
最大	0.16 mm	2200.000 mm	0.000 mm	800.000 mm

図 34 強度を上げるために再設計したロボットの変位解析結果

## 5.2 強度をあげるために再設計したロボットの機構解析

ロボットアームに対して，基準座標系  $\Sigma_0$ ，リンク座標系  $\Sigma_1$ ，及び手先座標系  $\Sigma_E$  を記述したのが図 35 である．

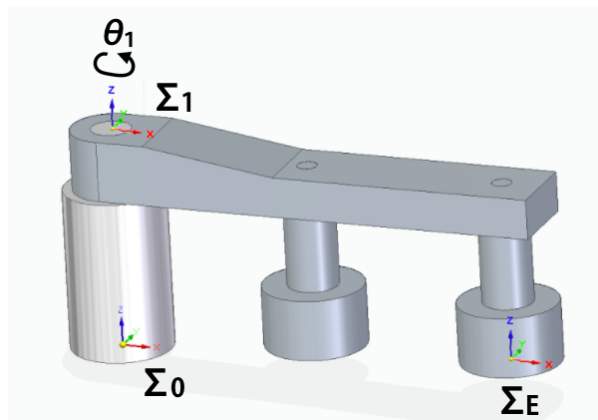


図 35 強度を考慮し再設計したロボットの各種座標系

このロボットアームのリンクパラメータを DH 記法を用いて書くと表 9 となる．今回，手先としてアーム先端のブレード部分を選んだ．

表 9 リンクパラメータ

$i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	1100[mm]	$(\theta_1)$
2	2000[mm]	0	-900[mm]	0

次に，関節角度の理論解及びシミュレーション結果を比較する．

SimXpert を使用して，今回作成したアームロボットの関節回転角度を求めた結果を図 36 に示す．

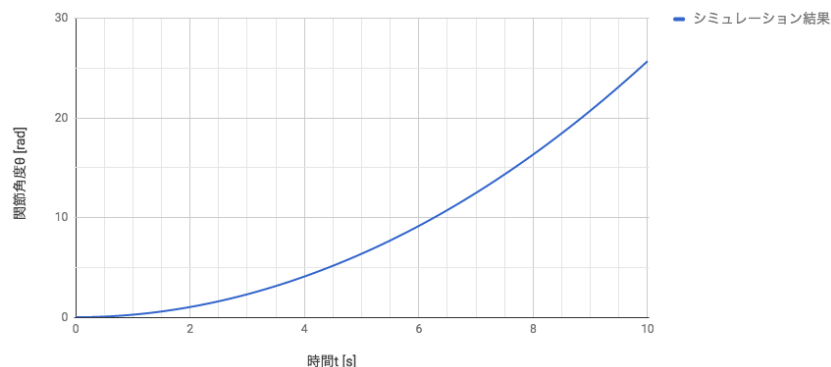


図 36 強度をあげるために再設計したロボットのアームの関節回転角

この関節角度のシミュレーション結果を最小二乗法を用いて 2 次の多項式近似を行うと、式 44 を得ることが出来る。

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= 0.259t^2 + 0.029x - 0.0037 \\ &\approx 0.259t^2\end{aligned}\quad (44)$$

式 20 で示した回転の運動方程式に、関節駆動トルク  $\tau = 393$ ，そして慣性モーメント  $I = 765.744$  を代入すると、式 45 となる。

$$393 = 765.744 \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (45)$$

式 45 は、時間に関する 2 階微分であるので、速度及び角度の初期値を 0 として両辺時間で 2 度積分することで微分方程式を解くと、式 46 の角度の関数を得る。

$$\theta = 0.2566t^2 \quad (46)$$

SimXpert のシミュレーション結果の式 44 と式 46 は完全に一致していると言って良い。

先ほど SimXpert で得られたシミュレーションの結果と、式 46 で求めた  $\theta$  の理論解を比較したのが図 37 であり、2 つのグラフは完全に一致している。

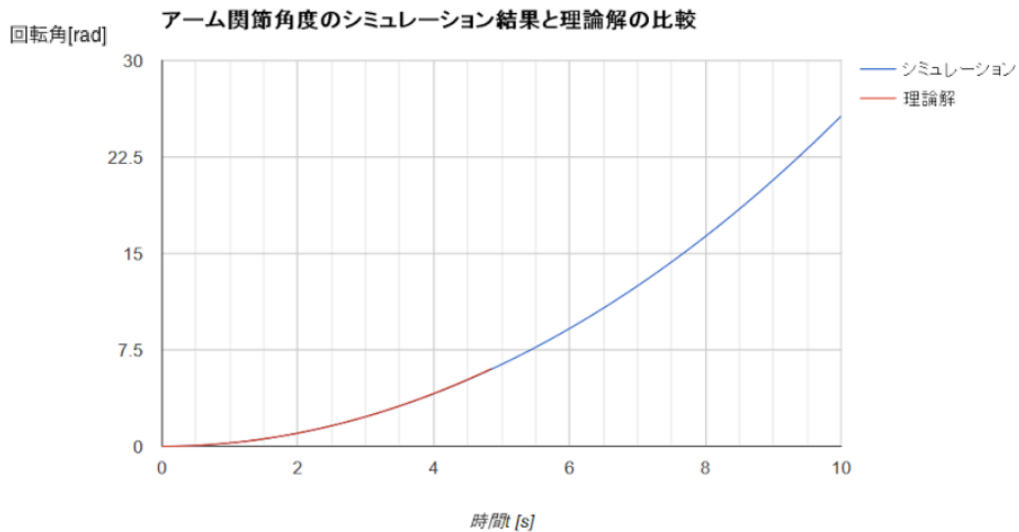


図 37 シミュレーション結果と理論解の回転角度の比較

よって、このシミュレーション結果は正しいことが分かる。

手先加速度に関しては、基準ロボットの手先加速度について考えたときと同様に、手先速度のシミュレーション結果元にして手先加速度を割り出すという方法を取ることにする。

SimXpert より出力された手先速度を図 38 に示す。この時、青の破線が手先加速度の X 方向成分、赤の破線が手先加速度の Y 方向成分、そして赤の実線が手先加速度のノルムを表している

次に、この手先速度のシミュレーション結果の妥当性を理論解と比較することで検証する。

先ほど、式 44 で、 $\theta = 0.2566t^2$  を得た。

角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  は式 46 を両辺  $t$  で時間微分することで得られるため、式 47 となる。

$$\frac{d\theta}{dt} = 0.5132t \quad (47)$$



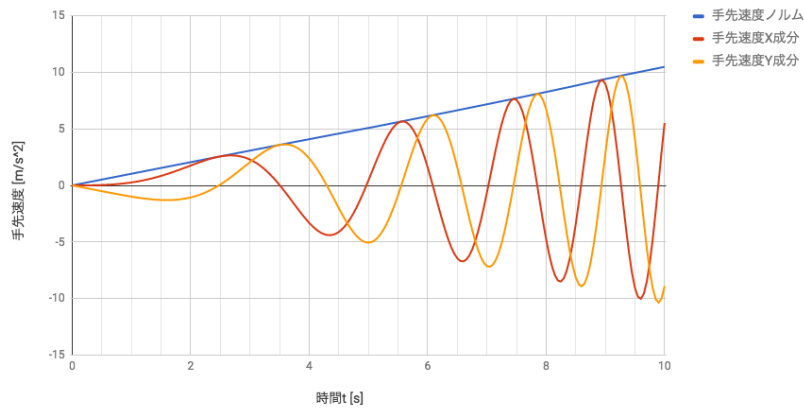


図 38 手先速度のシミュレーション結果

ここで、角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  と手先速度の大きさ  $v$  の間には、式 48 の関係がある。ただし、回転中心と手先間の距離を  $r$  と置いた。

$$v = r \frac{d\theta}{dt} \quad (48)$$

式 47、及び式 48 より、手先速度の理論解の大きさは式 49 となる。

$$\begin{aligned} v &= r(0.5132t) \\ &= 2(0.5132t) \\ &= 1.0264t \end{aligned} \quad (49)$$

ゆえに、手先速度の理論解は  $v = 1.0264t$  と求まった。

図 38 に示した、SimXpert による手先速度のシミュレーション結果と、手先速度の理論解を比較したのが図 39 である。

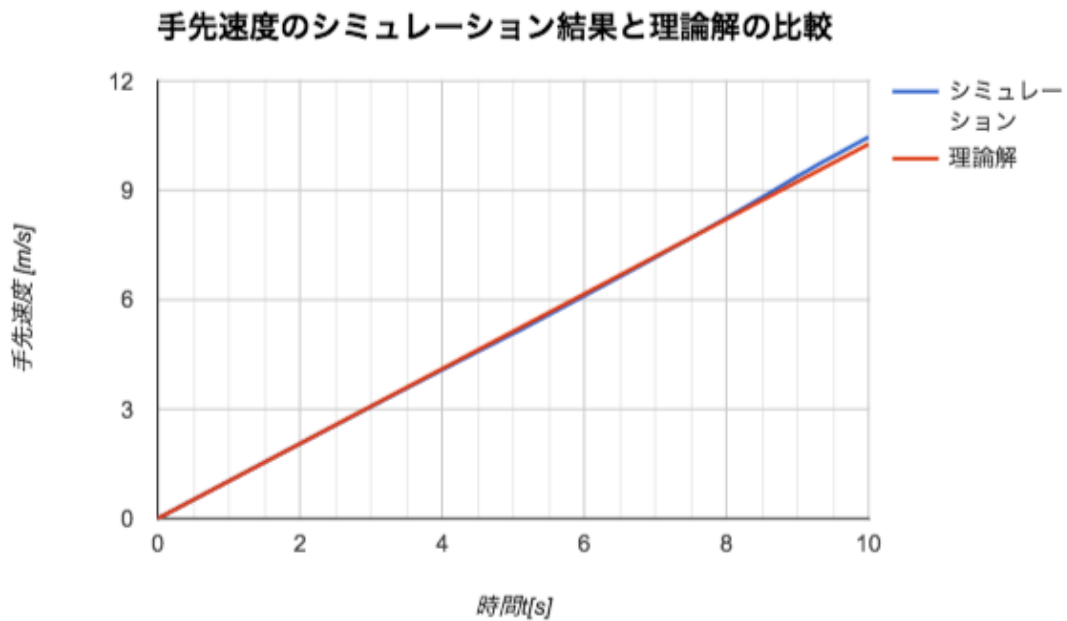


図 39 手先速度のシミュレーション結果と理論解の比較

図 39 のグラフより、ほぼ完全に手先速度のシミュレーション結果と理論解は一致しているといえる。

SimXpert によって得られた手先速度のシミュレーション結果を最小二乗法によって 1 次関数近似を行うと、式 50 を得る。

$$\begin{aligned} v &= 1.039t - 0.057 \\ &\approx 1.038 \end{aligned} \quad (50)$$

手先速度のシミュレーション結果によって得られた式 50 と式 49 の理論解は一致しており、シミュレーション結果が正しいと考えられる。

ここで、この手先速度を時間微分したものが手先加速度であるため、手先加速度として  $1.039[\text{m/s}^2]$  を得る。手先加速度の理論解および数値解のグラフを図 40 に示す。

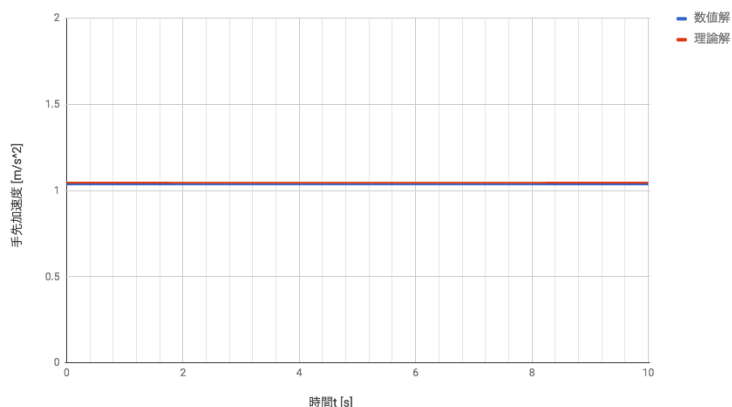


図 40 手先加速度の理論解と数値解の比較

## 6. 製品目標値を満たすロボットの設計

基準となるロボット、手先加速を上げるために再設計を行ったロボット、強度を上げるために再設計を行ったロボットの 3 種類についての解析を踏まえて、当初の製品目標値を満たすアームロボットを設計する。

### 6.1 最終のロボットアームの形状

最終的には、図 41 のような形状のアームを設計した。

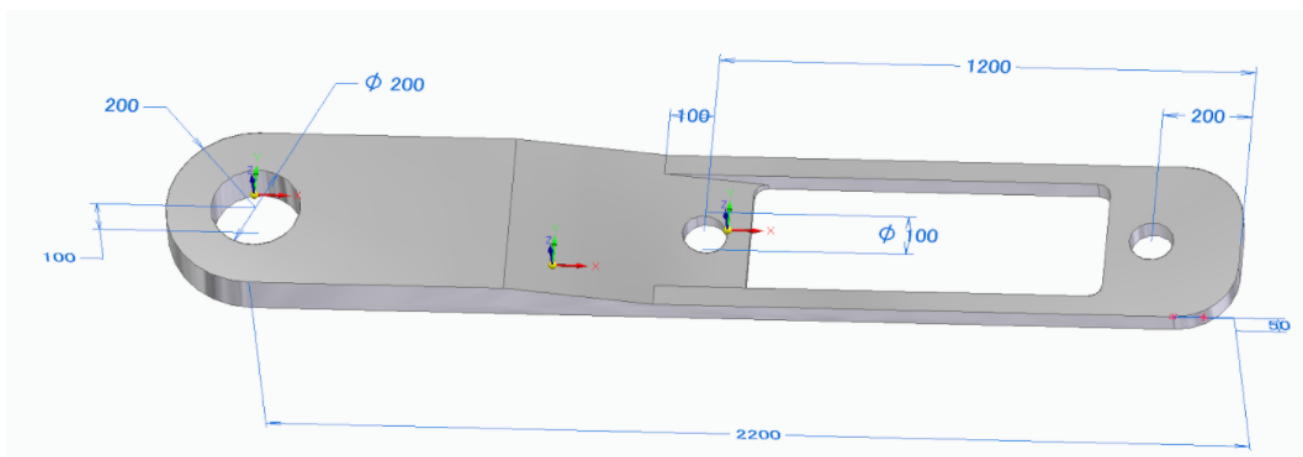


図 41 アームの最終形状

根元部分を太くすることで、強度を高めつつ、手先に近い部分をくり抜くことで慣性モーメントを減らし、手先加速度を上げるように設計を行った。また、安全率および許容たわみに余裕があったため、全体的に薄くすることで手

先加速度の向上を図った．

## 6.2 最終のロボットアームの各種値

最終的なロボットアームの各種値を表 10 に示す．

表 10 リンクアームの各値	
材質	アルミニウム 1060
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	2712.0
体積 [m <sup>3</sup> ]	0.0803
質量 [kg]	217.781.832
慣性モーメント [kgm <sup>2</sup> ]	223.529

アームを全体的に薄くし，質量及び体積を大幅に小さくした．そして手先に近い部分をくり抜くことで慣性モーメントを小さくした．

また，回転中心の軸とアームの重心の軸は Solid Edge を使用して計測した結果，0.755[m] の距離があることがわかった．そこで，軸間距離  $d = 0.755[\text{m}]$ ，重心周りの慣性モーメント  $I_G = 100.098[\text{kgm}^2]$  及び質量  $M = 217.781[\text{kg}]$  を平行軸の定理に代入すると，式 51 となる．

$$\begin{aligned} I &= I_G + d^2 M \\ &= 100.098 + 0.755^2 217.781 \\ &= 224.239 \end{aligned} \tag{51}$$

よって，今回の慣性モーメントの値は理論値と一致している事がわかる．

## 6.3 最終のロボットアームの応力及び変位

次に，最終のロボットアームの応力および変位についてシミュレーションし，シミュレーション結果の妥当性をほかのアームロボットの応力及び変位と比較することで確認する．

最終のロボットアームの応力図を図 42 に示す．

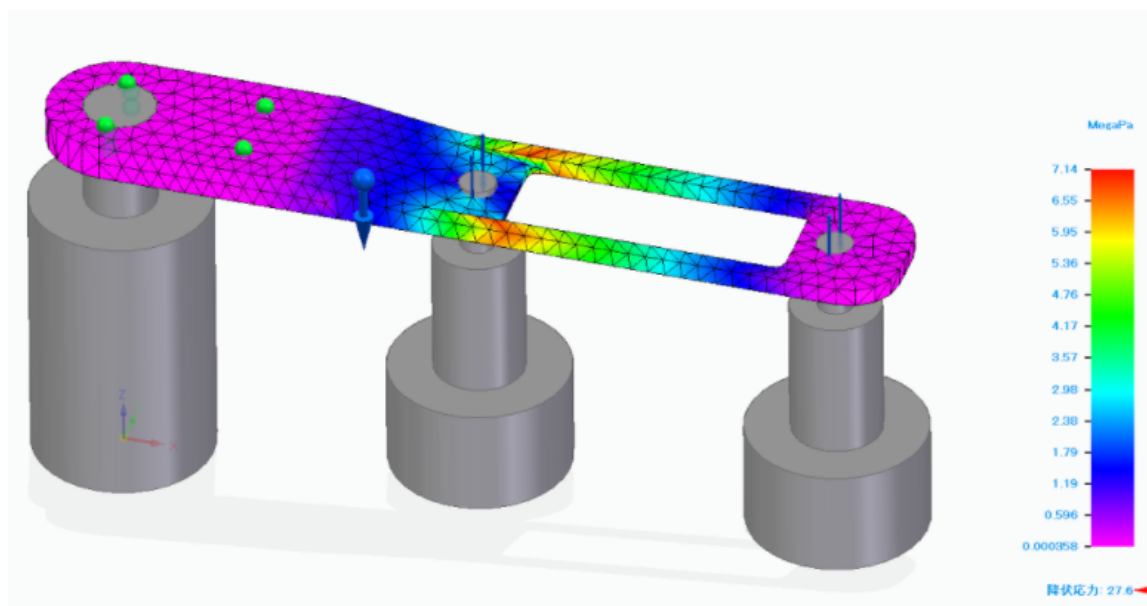


図 42 最終のロボットアームの応力図

この時，図 43 に示す結果が Solid Edge より出力された．

結果構成要素:フォンミーゼス				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0.000358 MPa	22.252 mm	-97.493 mm	1100.000 mm
最大	7.14 MPa	1129.440 mm	-150.000 mm	1000.000 mm

図 43 最終ロボットの応力解析結果

先ほど設計した 3 種類のアームロボットよりも薄くしたため、理論的には応力は大きくなるはずであり、シミュレーションを行った所、実際に応力は大きくなっているためシミュレーションの内容は正しいことがわかる。

許容応力は 27.6[MPa] であるので、安全率は式 52 より、3.87 となる。

$$\text{安全率} = \frac{\text{許容応力}}{\text{最大応力}} = 3.87 \quad (52)$$

次に、重力及び荷重によってかかる変位についてシミュレーションし、そのシミュレーション結果の妥当性について検討する。

Solid Edge のシミュレーション機能を用いて変位を解析した所、変位分布は図 44 となった。

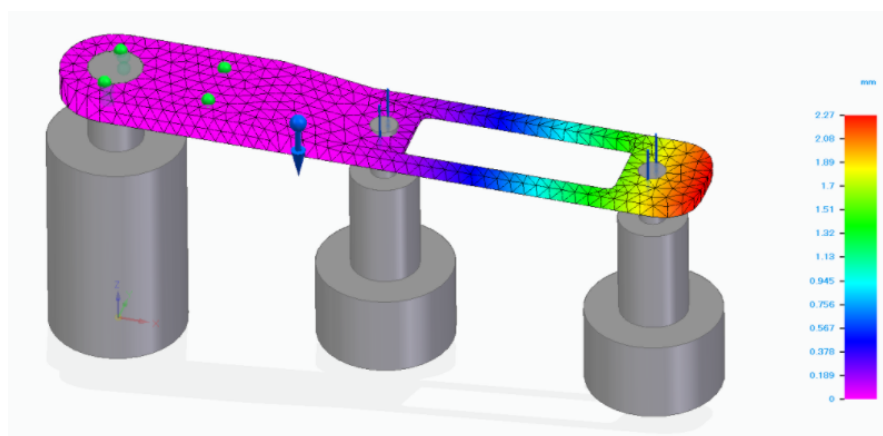


図 44 最終ロボットの变位分布

この時、図 45 に示す変位結果が Solid Edge より出力された。

結果構成要素:全並進				
範囲	値	X	Y	Z
最小	0 mm	379.176 mm	200.000 mm	1100.000 mm
最大	2.27 mm	2200.000 mm	20.235 mm	1000.000 mm

図 45 最終ロボットの变位解析結果

軽量化のために全体的に薄くしたため、変位が先ほど作成した 3 つのロボットの変位と比較して大きくなっているのは正しい結果といえる。

#### 6.4 最終ロボットの機構解析について

SimXpert を使用して、今回作成したアームロボットの関節回転角度を求めた結果を図 46 に示す。

SimXpert から得られたこの結果から、最小二乗法を用いて二次の多項式で関節回転角を表すと式 53 となる。

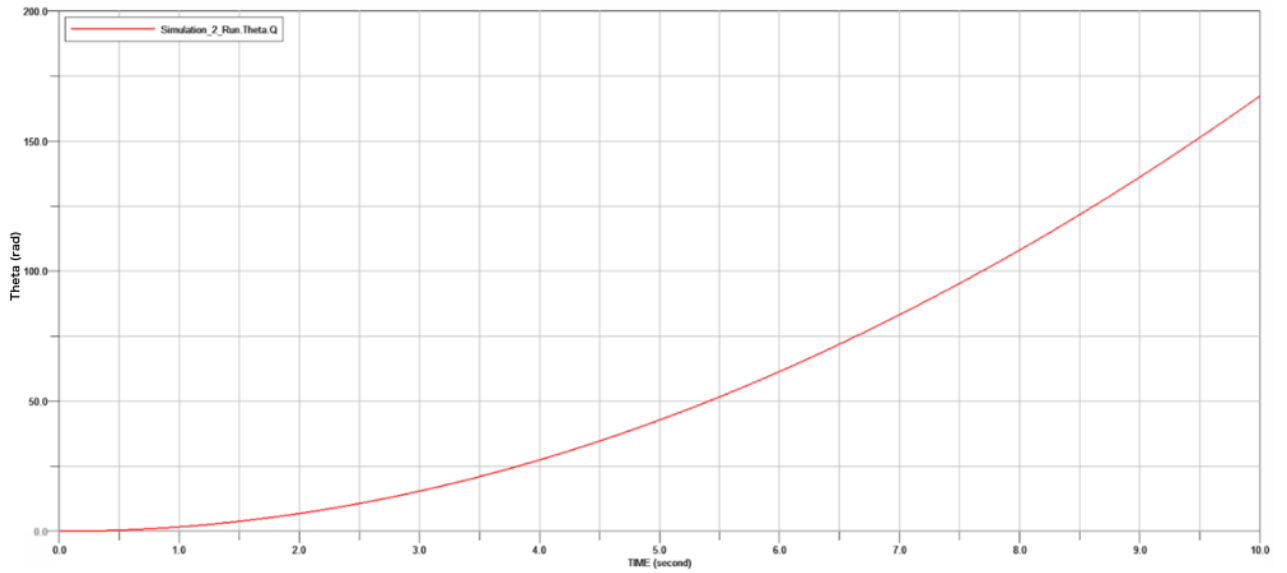


図 46 最終ロボットのアームの関節回転角

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= 1.634t^2 + 0.484x - 0.473 \\ &\approx 1.634t^2\end{aligned}\quad (53)$$

関節角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  は式 53 を両辺  $t$  で時間微分することで得られ、式 54 となる。

$$\frac{d\theta}{dt} = 3.268t \quad (54)$$

ここで、角速度  $\frac{d\theta}{dt}$  と手先速度の大きさ  $v$  の間には、式 55 の関係がある。ただし、回転中心と手先間の距離を  $r$  と置いた。

$$v = r \frac{d\theta}{dt} \quad (55)$$

式 54、及び式 55 より、手先速度の大きさの理論解は式 56 となる。

$$\begin{aligned}v &= r(3.268t) \\ &= 2(3.268t) \\ &= 6.536t\end{aligned}\quad (56)$$

ここで、SimXpert を使って得た手先速度の大きさを図 47 に示す。

図 47 の手先速度  $v$  を最小二乗法を使って一次式で近似すると、式 57 となる。

$$v = 6.541 \quad (57)$$

手先速度の大きさの理論解と、SimXpert のシミュレーションによって得た手先速度の大きさが一致するので、シミュレーションは正しいといえる。

手先加速度は、手先速度を時間で微分したもののなので、 $6.541[\text{m/s}^2]$  となる。

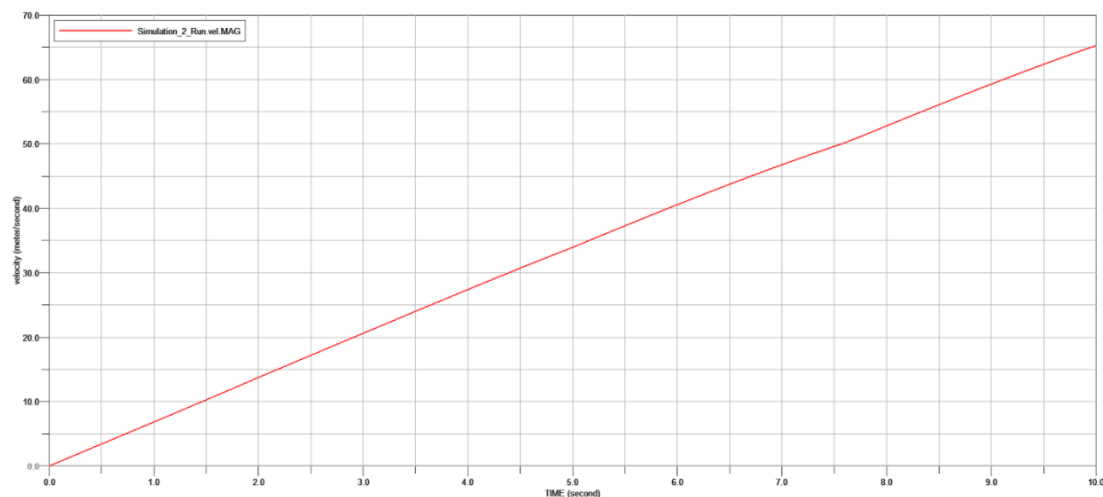


図 47 手先速度のシミュレーション結果

## 6.5 製品目標値との比較

最終的なロボットの各種値と、最初に決めた製品目標値との比較を行う。

許容最大たわみ、手先加速度、加速時間及び安全率の 4 つが仕様を満たすようにアームを設計することが今回の目的であったため、この 4 項目について比較を行う。

表 11 に製品目標値と最終的なロボットの各種値を示す。

表 11 食品攪拌ロボットの製品目標値・設計仕様

項目名	最終的ロボット	製品目標値	条件
手先速度 [rad/s]	6.541	6.28 以上	満たす
加速時間 [s]	1.92	2.0 以内	満たす
許容最大たわみ (z 軸方向) [mm]	2.27	2.50 以下	満たす
安全率	3.87	3.0 以上	満たす

以上より、今回設計したロボットは当初設定した製品目標値及び設計仕様を満たしていることが分かる。

## 7. おわりに

本課題を通して、以下の知見を得た

- 関節駆動トルクを一定のまま高速性の追求には、慣性モーメントを出来る限りする必要があり、慣性モーメントを小さくするには回転軸から遠い場所を軽量化すれば良い。
- 必要強度の確保のためには、大きい応力がかかる根本部分を太く設計することによって断面積を大きくし、応力を小さくすれば良い。
- 手先加速度にもとづいて設計した後に強度を上げるために再設計を行うと手先加速度が小さくなってしまい何度も再設計をする必要がでてくるため、まずは強度を指標にして設計を行い、そこから強度が落ちないように軽量化及び高速化をしていくと設計がしやすい。
- 軽量化の際にアームに穴を開ける際、四角形の穴を開けると穴の角の部分に応力集中が起こり、結果的に応力が大きくなってしまいうので穴の形は円形もしくはフィレットをつけるとよい。