

Mechanical Suit

代表者 村木 雄太 (工学 B2)

1. プロジェクト概要

本プロジェクトは外部動力を必要としない、歩行及び走行を補助するアシストスーツの研究・制作を目的とする。コンセプトとして、格好だけでなく安価で実用性のあるものを目指している。

2. 試作機の遍歴

本プロジェクトでは、技術の研究のため、いくつかの試作機を制作した。その一部を以下に示す。



図 2-1 左：初期型 v1 右：初期型 v2

図 2-1 は MechanicalSuits の原型となるアシストスーツ。最初に作られた作品であるが、意外にも性能が高く、私がこのアシストスーツ開発にのめり込むきっかけとなった。大学受験の後に落ちたと思ってショックを受けた私が、夜なべしてホテルでノートパソコンに噛みつきながら設計したという思い出がある。しかし結果は合格しており、今私はこのような形で予算をいただき、大学の先生方にアドバイスを頂きながら、Mechanical Suit の制作に取り組んでいる。ラックアンドピニオンを用いた単純な構造であり、後述するフック問題を抱えている。



図 2-2 Mechanicalsuits v11

図 2-2 は Mechanicalsuits 試作機の中で完成まで至った最新機， Mechanicalsuits v11 である。このナンバリング

は、おもしろプロジェクトが開始してから、11 番目の試作機という意味である。現状最も高い性能(有用性)を持つ。Mechanicalsuits 開発における様々な問題点をクリアしており、Mechanicalsuits の基礎が一通り詰まっている。見た目は不格好だが、なかなかの性能を秘めており、詳細な性能検証は行っていないが、v11 を片側にのみ装着し 5 分程度歩行すると、装着側の足が疲労していないことがはっきりと分かる程度の性能がある。

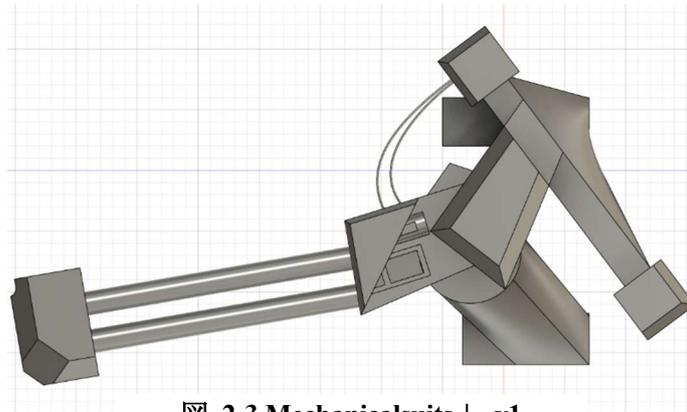


図 2-3 Mechanicalsuits+ v1

図 2-3 は Mechanicalsuits+ v1 である。従来の Mechanicalsuits と僅かにコンセプトが異なっており、動力はバネであるが、そのバネの動きを AI によって電子制御する。技術的に未熟であり、かつ試作機もまだ完成していないが、その方向性は Mechanicalsuits の新たな道を示している。

3. アシストスーツの仕組み

本プロジェクトで制作しているアシストスーツは電気的なアシストを用いずに、バネだけで人間を補助する。

人間の歩行にはエネルギー的なロスが存在する。例えば、脚を上げた状態からそれを降ろした時に、脚を上へ上げていた分の位置エネルギーはどこへ行くのだろうか。このエネルギーは実は最終的に熱や音となって発散されている。これはとてももったいない。もったいないので、その分のエネルギーをバネに蓄え、脚を上げる際に蓄えたエネルギーを開放する・・・(図 3-1)。これが私の制作するアシストスーツの基本的な仕組みである。言い換えれば、これはハイブリット車のようなシステムだ。ハイブリット車はブレーキの際に本来は摩擦によって熱変換されてしまうエネルギーを電気的なエネルギーとして回収し、後にそのエネルギーを運動に利用する。このアシストスーツはこれが電気的なシステムでなく、バネという力学的なシステムによって表現されたものである。

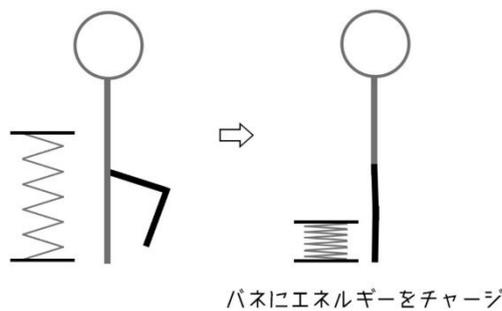


図 3-1 アシストスーツの仕組み

このシステムを用いた最も古典的なアシストスーツは、靴にバネがついたものである。本来着地で失われるエネルギーをバネに貯め、上向きに跳ね上がる時にそのバネのエネルギーを開放する。これはジャンプを補助するアシストスーツといえよう。本プロジェクトのものはエネルギーを貯めた後の補助方向を、足の回転方向に使い、歩行を補助するように変更したものである。

図 3-2 の初期型 v1 では、直線方向に貯められたエネルギーを回転方向に開放するため、ラックアンドピニオンを用いている。これは、本プロジェクトで制作するアシストスーツ、Mechanical Suit の最も基礎的な構造である。



図 3-2 初期型 v1 を装着した様子

4. アシストスーツ理論研究

アシストスーツを制作には、たくさんの技術を用いている。その技術資料は大量にあり、難解なものや、私の環境に依存する資料も存在する。なのでここでは、Mechanicalsuit にしか見られない特徴的な歯車のシステムに研究について特に簡単なものだけ述べる。

・フック問題を解消するための機構の考案

初期型 v1, 2 で発生していた問題として、フック問題があった。フック問題はバネの線形特性（フックの法則）がそのままアシストの性質になってしまうものである。

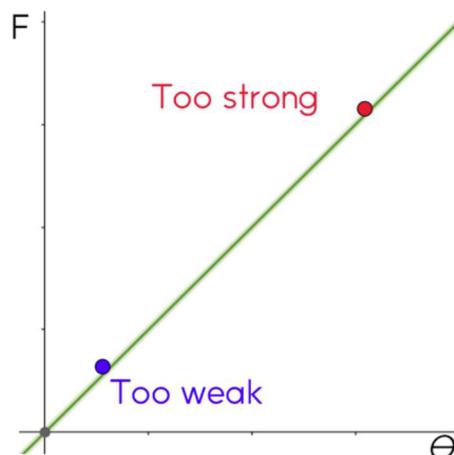


図 4-1 ラック&ピニオンの F-θ グラフ

v1 や v2 では、アシストスーツが足に加える力と角度の特性は図 4-1 のグラフのようになっている。直立状態から股関節を前に 90 度程曲げた状態が θ の基準角度(0 度)である。 θ の値が大きい状態は直立状態に近い。F はアシスト力である。バネは潰す距離によってその反力を定数倍で増していく(フックの法則)が、v1v2 のようなラックアンドピニオンのみを用いたアシストスーツはこの法則の性質を継承し、図 4-1 のようなアシスト特性になる。しかしこれでは、直立状態のときにはあまりにも強すぎるアシスト、逆に足を上げているときにはあまりにも弱すぎるアシストを受けることになっていた。これを解消するためにフックの法則から逃れる機構を必要とした。たくさんの機構が考案されたが、今回は研究の初動ということもあり、作りやすさの観点から非円形ピニオン & 直線ラック機構(図 4-2)を考案した。

この非円形型(らせん型)の歯車の効果について説明しておく。自転車のギアなどを思い出すと、低ギアほど円盤が大きく、弱い力で回せ、一周回した時の進行量が少なかった。逆に高ギアほど円盤が小さく、回すのに強い力を要すが、一周回したときの進行量が大きかった。このらせん歯車はそのようなギアの変化を連続的にしたものである。バネから受ける力が弱いときには半径の小さい位置のギアを用い、力を増幅させる。逆にバネから受ける力が強いときには半径の大きい位置のギアを用い、力を減衰させる。これにより、バネから受ける力を変化

させ、人間の歩行に合わせたアシストを実現する。

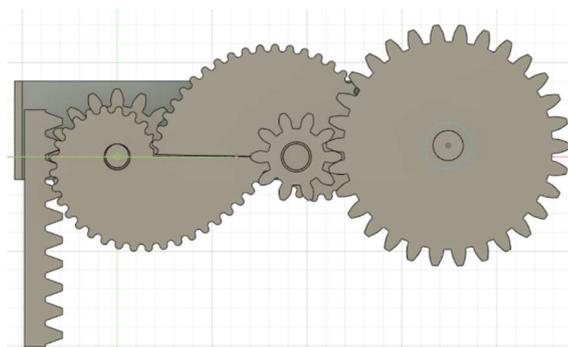


図 4-2 非円形ピニオン & 直線ラック機構

なお、図 4-2 の構造は自然数倍角ならば、図 4-3 のようにして部品点数を削減できる。

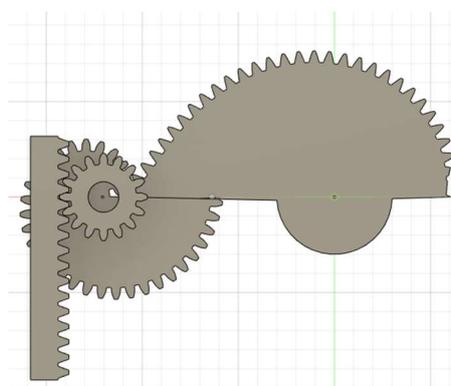


図 4-3 非円形ピニオン & 直線ラック機構 部品点数削減版

・非円形歯車基準円

非円形の歯車の基準となる円について研究を行った。結果だけを示せば、以下のような関数が非円形歯車の基準円の半径関数として成立する。

r_1, r_2 は基準円の半径関数、 n は歯車比(自然数)、 $\frac{d\theta_1}{d\theta_2}$ は歯車同士の微小角度推移(角速度比)である。

$$r_1 = n \frac{1}{1 + \frac{d\theta_1}{d\theta_2}}$$

$$r_2 = \frac{\frac{d\theta_1}{d\theta_2}}{1 + \frac{d\theta_1}{d\theta_2}}$$

円形の歯車は、片方の歯車が決まった時、つがいの歯車に制限は発生しないが、非円形歯車は片方の歯車が決まった時、つがいとなる歯車は限定されてしまう。なお、これらの解は $r_1 + r_2 = N$ と、 $r_1 d\theta_1 = r_2 d\theta_2$ より求まる。

・インボリュート歯型

インボリュート歯型は一般的な歯車の歯型であり、現在発見されている歯形の中でほとんどの場合最高の性能を誇る。実験の結果、インボリュート歯型はモジュールが小さい場合に非円形でも高い性能を持つ事が確認された。そのため以後の作図において、すぐにインボリュート歯車が作図出来るよう、インボリュート歯車を非円形歯車用に関数化した。内容に工学的な新規性は無いが、開発を進めるにあたって重要な項目である。また非円形歯車のつがいには転位歯型が有用であることも分かった。

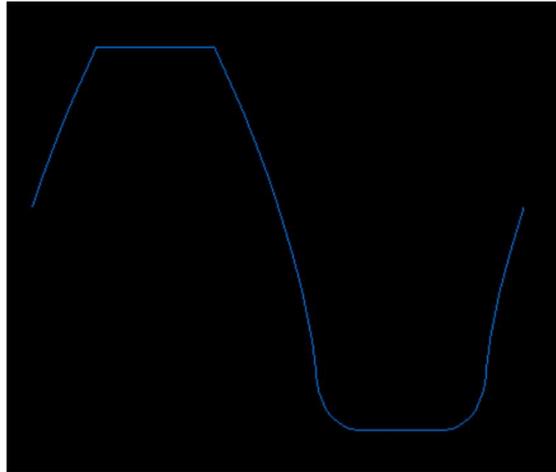


図 4-4 フーリエ-インボリュート歯形級数曲線

・非円形歯車を介した等価バネ関数(F- θ プロット)

設計時に F- θ 関係を視覚的にすると設計がスムーズに進みやすい。しかし、視覚的に刷るには詳細な数値計算が必要であるが、複雑な形の微分方程式を解くのは困難である(解き方が発見されていないものが殆ど)のため、数値解析が有用である。私の場合は数値積分法であるオイラー法を用いた。オイラー法の実装は Octave や Excel のようなソフトまたは Python, C++等で行うのがよい。図 4-5 は Octave によるアルキメデス螺旋ギアの場合のオイラー法による解析のプログラム例、図 4-6 はその結果である。

```

Euler.m
1 y = [0 0]
2 xm=[0 0]
3 xs = [0 0]
4 ys = [0 0]
5
6 dx = 0.1;
7 N =2*pi;
8 r1=1
9 r4=1
10 r5=2
11 y_k = [0;0];
12
13 y = [1];
14 xm = [1];
15
16 for x = 0 : dx : 2*pi
17 y_k1 = y_k + [(2*pi-x)/(N-2*pi+x+2)]*dx
18 y = [y y_k]
19 xm = [xm x]
20 y_k = y_k1;
21
22 endfor
23
24 ys = y * r1
25 xs = xm * r4/r5
26
27 plot(xm, y,xs,ys);
28
29 grid on;
30
31 xlabel('theta3');
32 ylabel('x2');

```

図 4-5 アルキメデス螺旋ギアの場合のオイラー法による解析のプログラム例

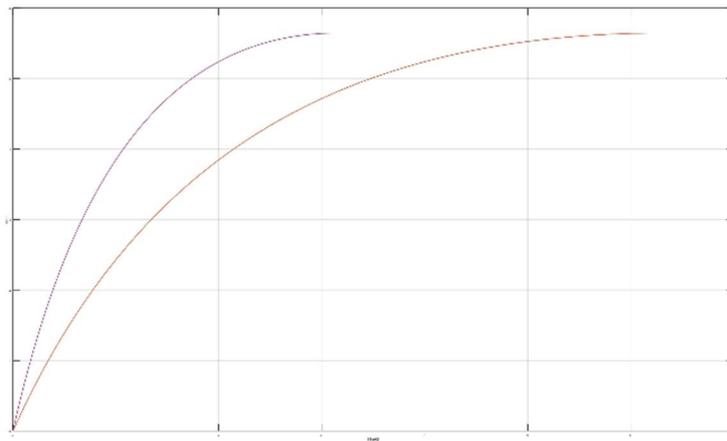


図 4-6 単純 F-θ プロット (オレンジ) と設計 F-θ プロット (紫)

図 4-6 からわかる通り、バネの力が変位によって線形的には変化していない。これはフックの法則から抜け出したバネの系を作り出せたことを意味している。このように、非円形歯車はフック問題を解決するカギとなる。

・アシストスーツ歩行モデル (減衰原理)

アシストスーツに最適な非円形歯車の形を見つけ出したい。そのために、まずはアシストスーツをつけるとなぜ人間は楽に動けるのかを、物理モデルを使って明確にする。そもそもアシストスーツは足を下ろすだけで消えるエネルギーに着目するものであったが、なぜ消えるのだろうか。それは人体が減衰系として働くためと考えた。この仮定をモデル化すると図 4-7 のようになる。これは一自由度の減衰振動系であり、運動方程式は $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Q(t)$ である。Q(t)は足が衝突した時に発生する衝撃の時間変位を示す。また、アシストスーツをつけた時の人体の簡易モデルを図 4-8 に示す。アシストスーツによって加えられたバネ係数は人体のバネ係数よりも大きく低いものとする。

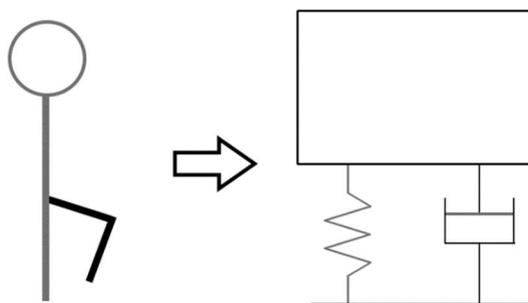


図 4-7 人体の簡易モデル

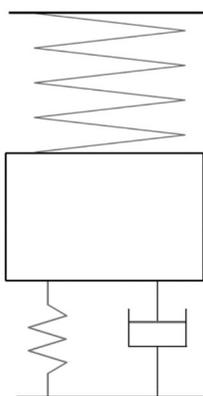


図 4-8 アシストスーツ装着時の人体の簡易モデル

・最適調整法 1 (アシストスーツ歩行モデルによる調整)

つづいて、力学的モデルによってどのようなアシストのパワーが最もエネルギー効率を高めるかについて考察する。アシストスーツをつけた状態の脚についての力学モデルを図 4-8 に示す。ここにつけられているバネは回転に対して発生させる力を変化させ、かつフックの法則が成り立たないバネ、すなわちらせんを介したバネとする。 $(M=k(\theta)\theta)$

さて、剛体脚の長さを r 、密度を m とすると、質量は mr で、このモデルの運動方程式は $mr^2\ddot{\theta} = mgr\cos\theta + k(\theta)\theta$ であるのだが、この時、 $\ddot{\theta}$ を常に 0 にするように $k(\theta)$ を調整すると、(実際には困難であるため、なるべく $\ddot{\theta}$ を最小にし続ける関数を探すと良い。この状態空間で、人間が股関節に力を加えて運動をした場合の仕事量が最小になる。本来は脚の重さを背負いつつ脚を動かさねばならないが、この場合、脚の重さ分のエネルギーは全てバネが払ってくれているので、人間自身は質量ゼロの脚を動かすエネルギーを払いさえすればよい。ただ実際にはこのシステムは準静的システムであり、歩行のスピードが極限まで遅い時のみ成り立つ。すなわちこのシステムをそのまま導入しても人間は歩行できない。であるからして、実際には $k(\theta)$ を全体的に下げる事によって、人間の歩行と上手く合うよう調整することが必要である。

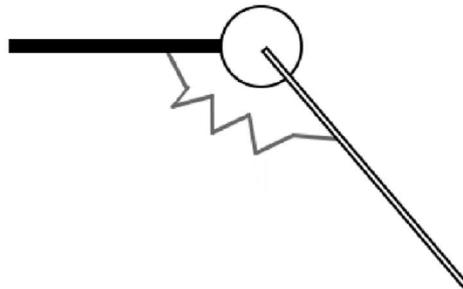


図 4-9 アシストスーツ装着時の脚のモデル

・最適調整法 2 (人体への負担と最大仕事)

先程は状態空間での運動による仕事をゼロにするための調整を行ったが、最適調整法 2 ではアプローチを変え、バネのする仕事を最大にする調整を行う。

バネのする仕事を大きくするのは実は簡単であり、バネを無限に硬くすればよい。ただそれでは問題があるのではないかと予想をされると思うがそれは正しく、バネを硬くしすぎると、そもそも人間が直立状態になれない。であるからして、人間が直立状態になれる最大の力を超えないように仕事を最大にする必要がある。そしてそれを実現しているバネ関数は図 4-10 のようにプロットされる。あまりに単純すぎて、逆に良くわからなくなるかもしれないが、最大の仕事を得るならば、当然力は常に最大にしたい。であるから、常に最大の力が一定に出されているという訳である

ただ、このようなバネ関数を現実で再現するのは困難である。であるからして、なるべくこれに近づけるようにならせんを調整するのが良い。

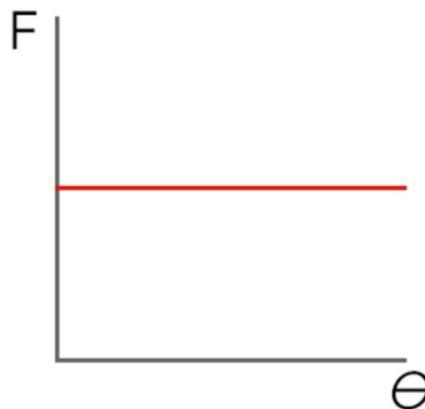


図 4-10 最適調整法 2 による理想 F - θ グラフ

・最適調整法 1 と最適調整法 2 の特性の違い

2つの最適調整法があることを示したが、実際どちらを使えば良いのだろうか。これは調整者によって様々な意見があると思うが、私はまず最適調整法 1 と最適調整法 2 のバネ関数の和を 1/2 にしたのからトライ・アンド・エラーで、調整を行っていくのが最も良い方法であると思う。すなわち両者の特性を半分ずつ入れた後、何度も組み立てて設計を行っていくということである。

なお、最適調整法 1 にバネ関数を近づけると、アシストされている感覚がないが、長く歩くとその効果をやがて実感する。直立しながらの作業はやりやすいが、座りながら作業ではアシストスーツの違和感が強い。最適調整法 2 にバネ関数を近づけると、アシストされている感覚が強くなり、少し歩くだけでも、効果を実感でき、歩くのがとても楽になる。しかし、直立・座り状態で違和感が強い。

なお、座り状態での違和感を減らすならば、関数の形をフック則に近づけると良い。(フック則バネ関数(定数)では、直立状態で違和感がとても強く、アシストが弱い。)

・歩行運動解析

アシストスーツを作る上で、人間の歩行を分析することは、当然欠かせない。本プロジェクトでは、その解析のため実験を行った。

ランニングマシンを用い、その上を走っている様子をカメラで撮影することによって、カメラを動かさずに走行する様子を捉えた。そして、そのデータをコンピュータに読み込ませ、歩行時の股関節と膝関節の動きをプロットしたのが、図 4-11 である。このデータは人体のモデル化(本報告書にはないハイレベルモデル)や設計に生かされた。

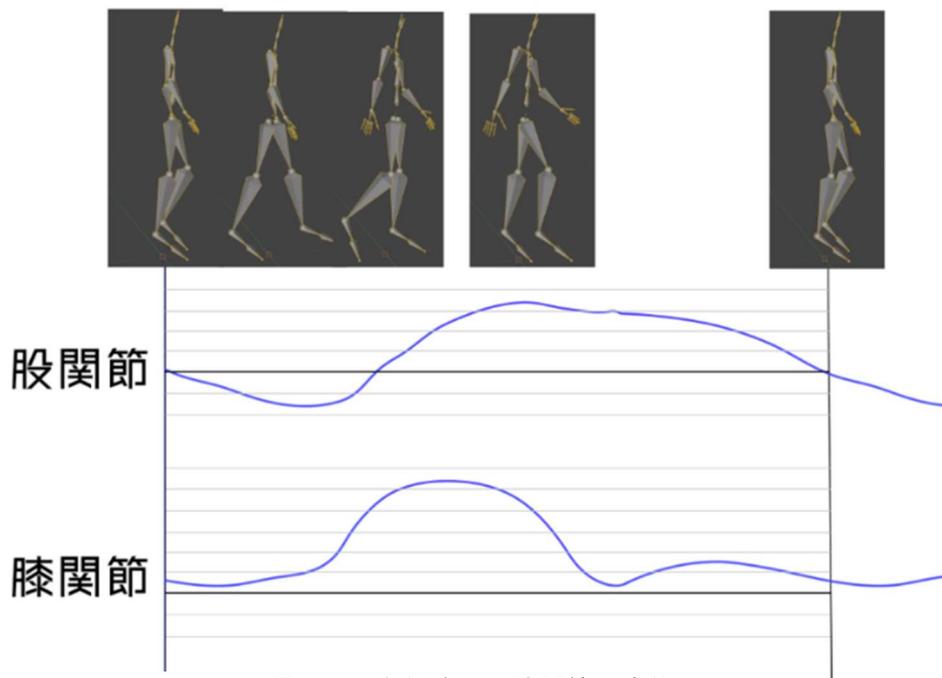


図 4-11 歩行時の下肢関節の変位

・歩行検知 AI システム

最適調整法 2 によるアシストスーツは最適調整法 1 よりも優れたアシスト性能を持つが、直立状態での違和感が強いというデメリットがある。これを払拭するため、直立状態でアシストを off にするようなシステムを搭載したい。それには AI が有効であると考えたため、私はまず M5stackC による計測と判定装置を Python を用いて制作することにした。

M5stackC に搭載された人間の運動を感知するための加速度センサは 6 要素のベクトル出力であるため、計算性能的には M5stackC でも十分であった。しかし、加速度センサから得たデータには多数のノイズが含まれており、これは装置の判断能力を大きく鈍らせた。そのため、メディアンフィルタによって、ノイズを低減するシステムを現在実装中である。可能であればアシストスーツは左右にあるため、2 つ以上の M5stackC を用い、バギ

ングを組むのが良い。プログラムは ChatGPT に任せたものを修正していくのが良い。

なおこの電子制御と、電子制御が可能な機構システムを搭載予定のモデルが、Mechanicalsuit+ v1 である。



図 4-10 M5stack C plus

さらに余談だが、M5stack は非常にコストパフォーマンスに優れた機器であり、M5stack の開発者であるジミー・ライ氏が大学で公演した際に、私は一目惚れしていくつも購入してしまった。彼は Twitter でも活動をしており、講演の後に Twitter 上で会話してくれたことは、今の活動にも役立っている。ちなみに、好きなものはフライドチキンとコーラだそうだ。

・全過程補助型アシストスーツ(次世代型機構)

現在考案されているアシストスーツは前方向に対してのみエネルギー的に優位性があり、脚が体より後ろに位置した時にはエネルギー的な優位性がない。この点は必ずしも欠点ではないが、欠点であるとの見方をすることも出来る。

これまで述べていたアシストスーツを半過程補助型と呼ぶとすると、図 4-11 のようなアシストをするアシストスーツは全過程補助型と呼べる。これは、足を動かす過程のほぼ全てで力の誘導が発生するものである。これを実現するには力行過程(アシスト過程)に往復運動機構を搭載し、力行(チャージ)と回生(チャージ)の切替点で機構を移し替えるようなシステムが必要となる。これ自体は実現可能なものであるが、現段階で考案されている機構は全て往復時の最高点が固定されたものとなっている。すなわち、脚をある位置まで後ろに振らなければ、歩くことが出来なくなる。またある地点以上に脚を振ることが出来なくなる。この特性は歩行特性が変化しやすい人間にとって最悪なものだ。現在はこれを解消する、往復点の誤差を許容するシステムを考えている。



図 4-11 全過程補助アシスト

5. Mechanical Suit v12（次回試作の改良点）

Mechanical Suit v10 の段階で、アシストこそ弱いですが、実用に耐えうる性能のものが完成していた。あとはここからアシストを強くしていただけ・・・と思われていたが、実際にはそう簡単に物事は進まなかった。

Mechanical Suit v11 は、Mechanical Suit v10 よりアシストを強めたのだが、パワーが強さからか、服からアシストスーツ外れたり、各部が動くたびにたわみ、十分なアシスト機能を持たなくなる傾向が見られ、理論上のアシストパワーを出せなくなることがあった。（最終的にはアシストを保てる範囲でのパワーに調整した。）

そのため、以前から行っていた Mechanical Suit の応力解析をより深く行いかつ固定部の細かな研究(3d プリンターで滑り止めを印刷する方法など)を行い、その技術を投入した Mechanical Suit を制作する予定だ。



図 5-1 Mechanical Suit v10

6. プロジェクトを通しての感想

昔、上達度の法則という本を読んだことがある。その本によれば、上達度は全体的にはべき乗則に従い、ミクロで見れば、その中にいくつもの波があり、波の予測は不可能であるらしい。本を読んだ当時は何となくしか理解していなかったが、振り返ると、このプロジェクトでもそれは起きていた。初期型のアシストスーツはサクサク作れて、最初からある程度の性能があった。しかし、このプロジェクトを始めてから、アシストスーツは技術が揃うまでなかなかまとまものが完成しなかった。このことをその本ではスランプと呼んでいた。私は上手くいっていない時、ほんとにこれが上手くいくのかどうか不安だった

この本で、強く述べられていたことはもう一つあって、「現実の問題の成果は唐突に表れる」らしい。確かにそういえばそうだった。全くうまくいか分からず少しイヤになっていたある日、たった1つの技術を導入したとたん、プロジェクトは上手く進みだした。その本はまたしても私の未来を言い当てていたのだ。

パズルはだんだんとパズルの絵が完成していく様子が見えて、だんだんと上手くいくことが分かる。しかし、現実の問題はパズルほど短くクリアできるものではなく、徐々に上手くいくのはあくまでマクロ視点であり、主観的に見られるのはあくまでミクロ視点であるから、徐々に上手くいっているようには見えづらい。だから私もちょっとプロジェクトが嫌になっていた。けれども、支援していただいているし、ということでやり続けていたら暗闇の荒野を抜けた。

この法則を本当の意味で理解できたことが私にとっての最も大きな成果だと思っている。

他の感想も幾つかあるが、それはまあ楽しかった、という言葉でまとめられる。4年生でもないのに、研究室に何度も行ったり、先生に何度も相談したりするのは、このようなおもしろプロジェクトという名分がなければできなかった。非常に貴重で楽しい時間を過ごさせてもらいました。