

Title	Arque : 平衡感覚を補綴する拡張身体としての尾
Sub Title	Arque : artificial biomimicry-inspired tail for extending innate body functions
Author	鍋島, 純一(Nabeshima, Jun'ichi) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kōta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2019
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2019年度メディアデザイン学 第773号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002019-0773

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2019年度

Arque :

平衡感覚を補綴する拡張身体としての尾



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

鍋島 純一

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

鍋島 純一

研究指導コミッティ:

南澤 孝太 教授 (主指導教員)

ムハマド ヤメン サライジ 特任講師 (副指導教員)

論文審査委員会:

南澤 孝太 教授 (主査)

ムハマド ヤメン サライジ 特任講師 (副査)

中村 伊知哉 教授 (副査)

修士論文 2019年度

Arque :

平衡感覚を補綴する拡張身体としての尾

カテゴリ：デザイン

論文要旨

私たち人類の祖先は、環境の変化に身体を適応させることで進化してきた。一方で進化と適応の過程でその必要性をなくし、役割を失った器官も存在する。そのうちの1つが尾である。多くの脊椎動物では、尾は身体をサポートする多様な機能を持ち平衡感覚をコントロールする役割を果たす。人間の身体能力をテクノロジーで拡張する人間拡張技術においては、現在の人体に備わっていない器官を獲得する研究も数多くなされている。本研究では、装着者の重心に対して力触覚を提示するウェアラブルな尻尾型デバイスを開発し、人間の平衡維持能力の拡張を目指す。また、本デバイスを使用して重心動揺計測を行った他、体験型展示を通してシステムの有効性を確認した。

キーワード：

バーチャルリアリティ身体性メディア, 拡張身体, 尾, 生物模倣, 人間拡張

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

鍋島 純一

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2019

Arque : Artificial Biomimicry-Inspired Tail for Extending Innate Body Functions

Category: Design

Summary

Our homo-sapien ancestors bodies have evolved to adapt to the changes in the environment. The present form of human body has several remnants of organs that have lost their roles and became irrelevant in the process of evolution and adaptation, due to the lack of their need. One of them is a tail, which has probably existed in some form in the past. For most mammals and vertebrate animals, tail plays an important role for their body providing variant functions to expand their mobility, or as a limb that allows manipulation and gripping. In the field of human augmentation, previous research has investigate the methods and approaches to accuire organs that the current human body does not have. In this study, we developed a wearable tail device that presents forces against the wearer's center of gravity, and expands the ability to maintain human balance. We also implemented a gravic body sway test using this device and report the effectiveness of the system through an interactive exhibition.

Keywords:

Virtual Reality, Embodied Media, Augmented Body, Tail, Biomimetics, Human Augmentation

Keio University Graduate School of Media Design

Junichi Nabeshima

目 次

第 1 章	序論	1
1.1.	人間拡張の変遷	1
1.2.	痕跡器官を対象とした身体拡張	4
1.3.	本研究の目的	4
1.4.	本論文の構成	5
第 2 章	関連研究	6
2.1.	尾の機能	6
2.1.1	脊椎動物における尾	6
2.1.2	人間における尾	9
2.2.	人間の平衡維持能力	10
2.2.1	四足歩行動物から直立二足歩行への進化	10
2.2.2	身体の平衡維持機構	10
2.3.	人間拡張の研究事例	13
2.3.1	身体部位拡張系	13
2.3.2	感覚増強系	14
2.4.	人工尾デバイス	16
2.5.	本章のまとめ	18
第 3 章	Arque の設計と開発	19
3.1.	目標設定	19
3.2.	ユースケース	20
3.3.	デザインコンセプト	21
3.4.	1st プロトタイプ	25

3.4.1	実装	25
3.4.2	評価と考察	28
3.5.	2nd プロトタイプ	29
3.5.1	タツノオトシゴの尾部を生物模倣した骨格構造設計	29
3.5.2	可変的な重量調整設計	31
3.5.3	制御システム	33
3.5.4	評価と考察	35
3.6.	本章のまとめ	35
第4章	評価	36
4.1.	Arqueによる重心動揺の制御	36
4.1.1	目的	36
4.1.2	概要	36
4.1.3	検査事項	37
4.1.4	結果及び考察	39
4.2.	展示を通じたユーザビリティテスト	42
4.2.1	概要	42
4.2.2	方法	42
4.2.3	結果とフィードバック	43
第5章	結論	45
	謝辞	47
	参考文献	48
	関連発表	55

目 次

1.1	骨と人工衛星 (映画『2001年宇宙の旅』より) [1]	1
1.2	JINS MEME [2]	2
1.3	外骨格スーツ [3]	3
1.4	先進技術におけるハイプ・サイクル 2017年版 [4] より抜粋	3
2.1	トカゲ類の自切 [5]	7
2.2	(上) 下方型姿勢と (下) 側方型姿勢の四肢動物 ([6] より抜粋)	8
2.3	尾で自重を支えるカンガルー ¹	8
2.4	獲物を追うチーター ²	9
2.5	クロスジオマキザル ³	9
2.6	直立二足歩行への変化 [7]	11
2.7	Six-Finger [8]	13
2.8	Metalimbs [9]	13
2.9	前庭感覚インタフェース [10]	14
2.10	LevioPole [11]	15
2.11	ドローンを用いた歩行牽引デバイス [12]	15
2.12	義尾 (GIO) [13]	16
2.13	SiliFulin [14]	16
2.14	shippo [15]	17
2.15	Taily [16]	17
2.16	サンクステイル (Thanks Tail) [17]	17
2.17	RETAIL [18]	18
3.1	Arque のコンセプト図	20

3.2	タツノオトシゴの尾部骨格 ([19] より抜粋)	22
3.3	Mckibben 型人工筋肉 ([20] より抜粋)	23
3.4	システムの構成図	24
3.5	1st プロトタイプの着用図	25
3.6	構成部品	26
3.7	尾椎	26
3.8	1st プロトタイプの概観図	26
3.9	サーボモータによる駆動	27
3.10	制御システム構成図	28
3.11	2nd Prototype の着用図	29
3.12	椎骨の 3D モデル (左) 横から見た図 (右) 上から見た図	30
3.13	L 字型外殻の 3D モデル (左) 横から見た図 (右) 上から見た図	30
3.14	関節の 3D モデル	31
3.15	空気圧式アクチュエータ	31
3.16	2nd プロトタイプの概観図	32
3.17	重量調整設計 (左) 荷重なし (右) 最大荷重	32
3.18	空気圧制御システム	33
3.19	作動するアクチュエータにより 8 方向への挙動が可能	34
3.20	開発環境と動作の様子	34
4.1	片脚立位のイメージ ¹	37
4.2	重心測定の様子と測定画面	38
4.3	重心動揺図の例 (Arque 非装着時)	39
4.4	重心動揺図の例 (Arque 装着時)	39
4.5	総軌跡長 (Average ± SD)	40
4.6	外周面積 (Average ± SD)	40
4.7	単位面積軌跡長 (Average ± SD)	40
4.8	SIGGRAPH2019 における体験型展示の様子 (1)	43
4.9	SIGGRAPH2019 における体験型展示の様子 (2)	44
4.10	KMD Forum2019 における体験型展示の様子	44

表 目 次

4.1	装着前後の総軌跡長	40
4.2	装着前後の外周面積	41
4.3	装着前後の単位面積軌跡長	41

第 1 章 序

論

1.1. 人間拡張の変遷

私たち人類の祖先は猿人以前から，環境の変化に身体を適応させ，道具を生み出し使うことで進化を遂げてきた．映画『2001年宇宙の旅』冒頭では，ヒトザルが骨をこん棒のような道具として使用することを学び，狩りや縄張り争いに用いるシーンが描かれる．その後ヒトザルが雄叫びをあげて骨を空中に放り投げると，宙で回転する骨の映像は遙か未来に生み出される人類の道具である人工衛星の映像へと切り替わる (図 1.1)．これは全ての道具・技術が原始の時代に生み出された道具の延長にあることを示唆する．



図 1.1 骨と人工衛星 (映画『2001年宇宙の旅』より) [1]

人間が道具を生み出す目的は，自分たちの能力を強化・拡張することにある．マーシャル・マクルーハンは著書 *Understanding Media: The Extensions of Man*

(邦訳『メディア論 人間の拡張の諸相』) [21]において、人間の関与する全ての道具・技術・行為媒体は「メディア」としてしている。更にこのメディアとは対象との媒介というよりむしろ身体の一部を指し、私たち人間の肉体器官はメディアによって拡張されるとしている。衣服は皮膚の拡張であり、車は足の拡張ということになる。具体例として、「眼鏡」は本来、弱視を矯正し、視力を補助するものであるが、株式会社ジンスによる「JINS MEME」は眼鏡の形状をしていながら複数のセンサーを搭載し、装着者の姿勢や集中度を可視化、分析することができる。これは元々、視力を補綴する道具であった眼鏡がテクノロジーを用いたウェアラブルコンピュータとなることで身体を拡張していることを示す。



図 1.2 JINS MEME [2]

こうした先進技術を用いて人間の身体能力・感覚を拡張する領域は「人間拡張工学」と呼ばれ、近年注目を集めている [3] [22]. 「人間拡張 (Human Augmentation)」とは、人間の知覚や身体能力をバーチャルリアリティ (VR) や AI (人工知能) などの技術を用いて拡張することをいう。

米国の調査会社 Gartner 社では技術動向分析の手法ハイブ・サイクルを用いて、今後 5~10 年において高度な競争優位性をもたらすと予測される一連の先進技術に注目し、様々な技術分野や産業分野に関してレポートを発行している。その内の「先進技術におけるハイブ・サイクル 2017 年版」においても Human Augmentation がキーワードとして取り上げられようになっている (図 1.4).

人間拡張の例は、身体障害者が使う義手や義足等の人工装具でも見られる。ドイツの義足ジャンパーであるマルクス・レームは 2015 年、ドーハで行われた IPC (国際パラリンピック委員会) 陸上競技世界選手権に出場。ここでマークした走り幅跳び 8m40 という記録は 2012 年ロンドン・オリンピックでの金メダル記録を超え



図 1.3 外骨格スーツ [3]

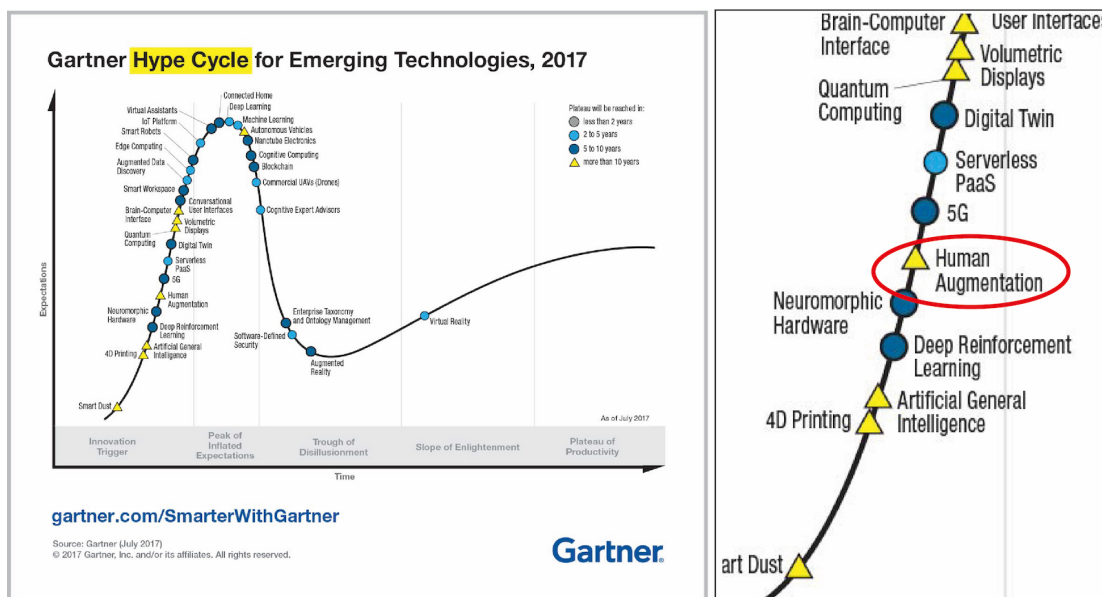


図 1.4 先進技術におけるハイブ・サイクル 2017 年版 [4] より抜粋

ていた。このように従来はマイナスの要素をゼロに近づける補綴が主であった道具・技術も、身体を拡張することが可能になっている。

1.2. 痕跡器官を対象とした身体拡張

前節で述べた義手や義足といった人工装具は、いわば全人類が先天的に持ちうる肉体器官の欠陥を対象とした身体拡張・補綴の例である。では、人類が進化の過程で失ってしまった肉体器官を人工装具として形成し、現代の人体に適応するように再構成することで人類が進化の歴史に置き去りにしてしまった肉体的欠陥を補綴することは可能であろうか。現在の人体には、猿人以前からの進化と適応の過程でその必要性を無くし、役割を失ったいくつかの器官の痕跡がある(痕跡器官)。虫垂や耳殻の筋肉、加えて尾てい骨、つまりは尾がこれに該当する。尾は平衡感覚を補助するための器官としてほとんどの脊椎動物に備わる器官である。人類は直立二足歩行を習得し、空いた両腕で道具を扱うようになった結果として飛躍的な進化を遂げた。一方で、重心の不安定な直立二足歩行姿勢での身体運動や加齢による平衡感覚への障害は、平衡維持器官としての尾を失ってしまった人類にとっては日常生活における支障となり得る上に、転倒・転落による怪我に繋がる恐れもある。

1.3. 本研究の目的

尾は脊椎動物において重要な役割を持つ肉体器官であるのに加え、人間拡張工学の領域においては腕や足のような肉体器官を対象とした身体拡張が幅広く進んでいる。そこで本研究では、人類が進化の過程で失ってしまった尾を人工装具として形成し、人体の平衡維持能力を補助する人工尾デバイスを提案する。日常生活において使用可能な人工尾ができることで、高齢者の転倒回避や足場の不安定な場所での作業における補助などの役割が期待できる。また、推進力を提示するシステムとして用いることでVRコンテンツ内における力触覚提示を行うことも可能であると考えられる。本論文では、ユーザの身体動作に合わせて動き、人間がバ

ランスを崩した際の重心の制御を補助する人工尾デバイスを設計することを目的とし、有効性を示す。

1.4. 本論文の構成

本論文は全5章で構成される。本章では、研究の背景と目的を述べた。第2章では、脊椎動物における尾の機能分類と人間の平衡維持能力、本研究における関連研究として身体拡張の事例について論じる。第3章では、人間拡張としての人工尾デバイスの設計における設計要件の提案と、それに基づくプロトタイプ制作に関して述べる。第4章では、人工尾システムの評価実験と体験型展示を通じたユーザビリティテストを行う、評価と考察を述べる。第5章では、本論文における結論と今後の展望について述べる。

第 2 章

関 連 研 究

2.1. 尾の機能

尾は多くの脊椎動物が共通して有する器官であり，その役割は動物によって多岐にわたるが，大別すると移動の補助，自衛，社会的シグナルに分けられる．本節では脊椎動物における尾の機能分類と人間と尾の関係を述べていく．

2.1.1 脊椎動物における尾

魚類

魚類の体は頭部，胴部，尾部に分けられる．肛門以降，尾びれまでが尾部であるが，外見上は尾の区別がはっきりしない．魚類にとっての尾は多量の筋肉を支持する器官であり，抵抗の多い水中における推進力の獲得に大きく役立っている [23].

爬虫類・両生類

トカゲ類は主に外敵に襲われたとき，身を守るために尾を自ら切り捨てる自切と呼ばれる行動を見せる [5]. そのためトカゲ類の尾には脱離節という切り離しやすい節が存在する．自切の後，尾は再生するが椎骨など完全にもとのものと同じにはならない．また，ワニは扁平で長く厚い皮膚に覆われた尾を持ち，その生態は陸上よりもむしろ水中生活に適応している．水中では魚類と同様に，尾を左右に振ることで泳ぐ [24].



図 2.1 トカゲ類の自切 [5]

鳥類

現生鳥類の尾骨は短く、通常は尾羽の部分を含めて尾と呼ぶ。恐竜から原始鳥類を経た進化の過程で尾骨は短く変化したが、これは飛行のために身体を軽くし、重心位置をより前方へと移動するためだとされている [25]。尾羽は飛行中の安定確保と方向転換をする舵のような役割を担っている [26]。

哺乳類

哺乳類の四肢は、原始的な魚類の鰭から進化したものである [27]。陸上生活により四肢の配置は側方型から下方型へとシフトし、身体運動は四肢の動きに依存するようになった [6](図 2.2 参照)。生命の維持に重要な器官は胸部に集中し、胸部より後ろの脊椎を抱える尾部は少なくとも生命に関わるような重要性を失ったが、一方で身体運動に対して特徴的な役割を持つ例も数多くある。

カンガルーは尾を第5の足として移動の際の推進力を生み出す [28]。尾の構造は前肢よりも遙かに大きな筋肉を有し、跳躍時には上半身の反動を抑える役割を果たす他、闘争時には尾のみで自重を支えることもある (図 2.3¹)。また、猫はバランスを崩した際に尾を素早く振ることで重心位置の制御を行う [29]。尾を振ることで骨盤の位置を調整し、不安定な場所でも移動を行うことが可能になっている。同じくネコ科に分類されるチーターは時速約 100km ものスピードで獲物を追うが、太く長い尾を左右に振ることでバランスを取り、獲物の急な方向転換にも対応することができる [30](図 2.4²)。

1 <http://dailym.ai/1OoOJnN>

2 <https://www.quora.com/What-happens-if-a-cheetah-s-tail-is-cut-off>

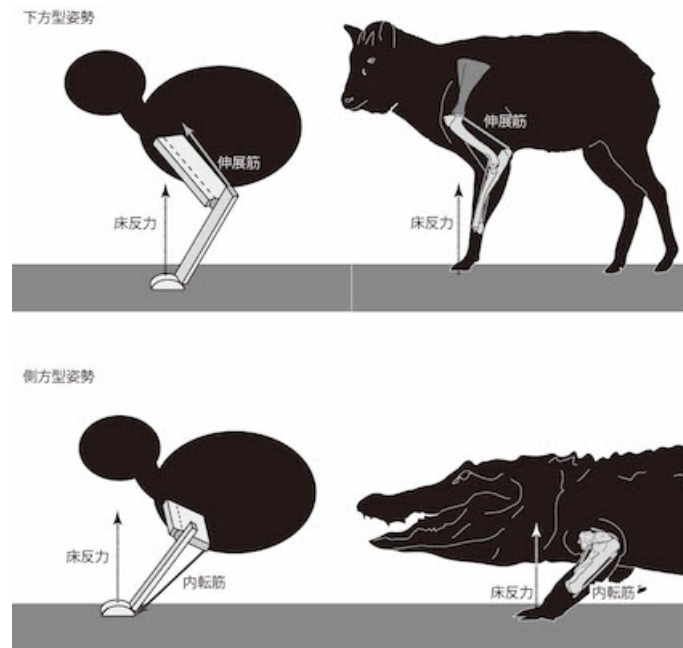


図 2.2 (上) 下方型姿勢と (下) 側方型姿勢の四肢動物 ([6] より抜粋)



図 2.3 尾で自重を支えるカンガルー¹

図 2.4 獲物を追うチーター²図 2.5 クロスジオマキザル³

クロスジオマキザルは細長く、毛に覆われた尾を持つ。普段は尾を枝に巻きつけながら樹上生活を送るが、この種は人類以外の霊長類でも珍しく石器を使って木の実を割る、つまり道具の使用を学習している。クロスジオマキザルは木の実を割るために台石とハンマーとなる石を用いるが、石を運搬する際に尾でバランスを取りながら二足歩行する。長い尾部を伸縮させながら地面に対して平行状態を保つことで重心位置を調整するのである [31](図 2.5)。

2.1.2 人間における尾

脊椎動物の尾は生物の環境への適応と進化を反映する特徴的な形質の一つであり、人間も例外ではない。私たち人間は尾を持たないが、胎児の発生段階では尾部の脊髄形成は起きており、生まれるときには退縮して尾は消失している。尾骨はその名残であり、痕跡器官と呼ばれる。ごく稀に隔世遺伝により、脊椎なしの血管・筋肉・神経だけの尾を持つ子供が生まれる事例も報告されている [32]。

1 <https://www.quora.com/Why-should-you-avoid-a-angered-red-kangaroo>

2 <https://www.quora.com/What-happens-if-a-cheetah-s-tail-is-cut-off>

3 <https://blog.nationalgeographic.org/2012/12/07/hercules-monkeys-lift-stones-to-crack-nuts/>

2.2. 人間の平衡維持能力

2.2.1 四足歩行動物から直立二足歩行への進化

かつて類人猿や人類の祖先は樹上生活を送る上で細い木の枝の上を歩くために尻尾を利用していましたが、体の大型化に伴い、懸垂運動での移動が腕で木の枝を把持するようになった [33]。このことは人類が尾を失う一因になったと考えられる。重心の安定しやすい四足歩行から、人間の大きな身体的特徴である直立二足歩行へと変化する過程で、人間のバランスは不安定さを増した [34]。四足歩行動物、ましてや前傾姿勢で二足歩行をする類人猿(ゴリラやチンパンジー)でも頭と身体の重心線は一致しない。しかし、直立姿勢の結果、頭と身体の重心線が一致した人間は歩行の際の衝撃が脳に直接伝わる事になる。四足歩行動物は足のつま先だけを地につけて歩くことで素早い前進運動を可能にする一方で、人間は踵をつけるようにして衝撃を抑えながら歩くようになったのである。さらに上半身の内臓を下から支える必要性が人間の骨盤の形状を大きく変化させた [35]。日常生活における平坦な地面では私たちは平衡維持能力に不足を感じることはあまりないが、足場の悪い環境や素早い前進運動を強いられるシーンではバランスを安定させにくい。

2.2.2 身体の平衡維持機構

前節で述べたように、直立二足歩行は四足歩行に比べて不安定な姿勢であり、これを補うために人間の身体では内耳前庭器官への重力等の入力、視覚入力、固有感覚(深部感覚)および表在感覚の体性感覚入力を用い、眼球運動や四肢、体幹の運動を中枢神経系で統合・制御することによって保たれている [36]。

- 前庭系への入力: 人間の内耳はその役割からみて、大きく聴覚系と平衡系に分けることができる。聴覚系に関与するのは音の感覚器官の蝸牛であり、平衡系の末梢受容器は三半規管と耳石器である。主に三半規管は回転加速度を感知し、耳石器は直線加速度を感知する。

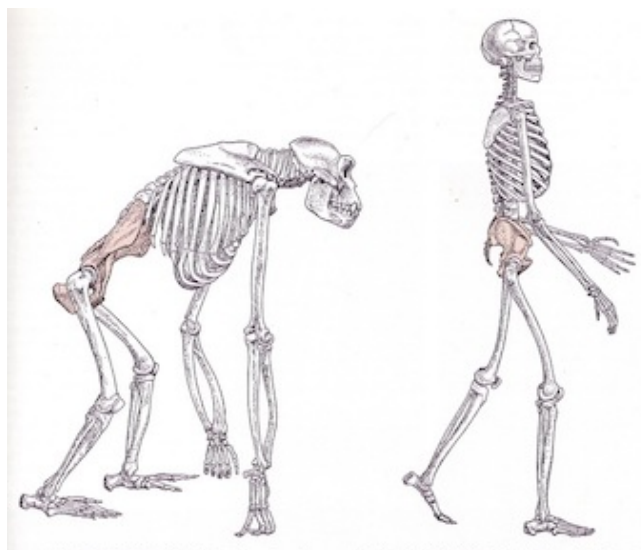


図 2.6 直立二足歩行への変化 [7]

- 視覚入力: 日常生活において自分の位置情報や姿勢情報を視覚から認知することは多い。静止状態で上下左右の位置関係を把握することはもちろん、運動時において周囲の景色が移動するのに対して眼球は反射的に進行方向と逆位相に動く。
- 体性感覚入力: 固有感覚(深部感覚)により、四肢や身体の様々な部位の静的な位置関係と四肢や頭部の動きの両者を感じることができる。また、触圧覚に代表される表在感覚も身体の平衡維持に寄与している。

これらの感覚入力の情報に基づき、中枢神経系が身体の平衡を維持するために身体諸器官の運動を制御している。自分の意志の判断により運動を始めたり、運動の仕方を変える随意運動を行う。また、小脳は姿勢・バランスの維持、筋肉の協調運動に寄与している。末梢前庭系や固有感覚系の情報をモニターしつつ、運動の意図と実際の運動の誤差を修正し、運動を円滑に行うようコントロールしている。随意的意志運動と不随意的反射運動が共に働いて、人間は目的にかなった動作や安定した姿勢をとることができるのである。

このような身体の平衡状態の維持に関与する系のどこかに機能低下が生じると、身体の平衡の維持が困難になってくる。機能低下は、様々な疾患や宇宙空間など

重力の変化 [37], また, 加齢に伴う変化として生じてくる場合もある (加齢性平衡障害). 入力系の受容器, 中枢神経系, 運動器のいずれか, もしくは複合的に生じた問題は, 高齢者の平衡状態に影響を与えうる. 結果として身体平衡の乱れを立て直すことが間に合わず転倒するリスクが増すことになる [38].

2.3. 人間拡張の研究事例

本節では，第1章で言及した人間拡張工学 (Human Augmentation) の分野における先行研究を示す。

2.3.1 身体部位拡張系

近年，失った身体部位を補綴するのではなく，新たな身体部位として人工装具を用いる身体拡張の手法に対して期待が高まっている。義足など人工装具のように装着することで人間の身体部位を新たに増やす研究としては，Prattichizzo らが提案する Sixth-Finger [8] がある。これは複数のサーボモータを連結させることで指の屈曲・伸展動作を再現する6本目の指としてのウェアラブルデバイスである。身体の欠損部分を補綴するのではなく，人間の作業スペースを拡張するための新たな身体部位として使用される。

また，拡張身体部位として腕を追加する研究として，Sasaki ら [9] は Metalimbs を提案している。これは装着した2つの拡張腕に対してユーザーの足の動きをリンクさせることで，直感的な操作を可能にしている。



図 2.7 Six-Finger [8]



図 2.8 Metalimbs [9]

2.3.2 感覚増強系

人間の平衡維持能力にアプローチする研究として前節で述べた前庭系への情報入力に対してアプローチするものがあげられる。安藤ら [10] は直接的に人間の運動を制御するために、前庭感覚への電気刺激を利用したインタフェースを提案している。人間は前庭系への情報入力に変化が生ずると反射として身体の重心位置を制御し、身体の平衡維持のために自然とバランスを保つような姿勢を取ろうとする。つまり、歩行中に前庭系へ電気刺激が与えられるとバランスを補正しようとし、歩行方向が変化する。この現象を利用すると、付与する電流方向や電流量の制御により人間の歩行を直接的に制御することが可能となる。



図 2.9 前庭感覚インタフェース [10]

また、工学的アプローチから、非設置型システムのウェアラブルデバイスで推力を生み、ユーザに力触覚を提示する研究もある。佐々木ら [11] はマルチロータを用いた空中触覚提示手法である Leviopole を提案している (図 2.10)。モータの回転数制御により各ロータの推力を変化させることで並進または回転方向に力の方向を生み、VR コンテンツ内での全身インタラクションに使用している。また、高田ら [12] はドローンをウェアラブルデバイスとしてユーザの頭部に装着することで歩行の牽引を試みている (図 2.11)。これらは広い可動範囲をもち、全身運動

を対象とするものの，人間の身体の平衡維持に対する体性感覚系への影響としては十分ではない．ドローンやプロペラ推力を用いた触覚提示手法としては他に，Haptic Drone [39] や Tactile Drones [40] がある．これら非設置型システムは力触覚提示する範囲を手の周囲など限定的にしているものが多い．



図 2.10 LevioPole [11]



図 2.11 ドローンを用いた歩行牽引デバイス [12]

2.4. 人工尾デバイス

身体・感情表現を拡張する尾

前節では人間の既存の肉体器官における身体拡張の事例について述べたが、尾を新たな身体部位として人間に追加しようと試みる研究や作品もいくつか存在する。氏間ら [13] が開発した義尾 (GIO) は臀部筋肉の筋電位変化を取得し、尾の制御に用いることで感情表現を可能とするデバイスである。また、尾の機構においてメッシュチューブとワイヤ駆動を用いることで軽量化を可能とし、生き物らしいしなやかな動作を実現した研究も存在する [41]。上記に加え、ユーザーの腰の動きに連動して動作する SiliFulin [14]、帽子型デバイスで取得したユーザの脳波と連動して動作する shippo [15]、装着者の心拍数に基づき尾を稼働させる Taily [16] 等の作品や商品も存在するが、これらはいずれも尾によるエンタテインメント、自己表現や感情表現を試みる目的が主である (図 2.12, 2.13, 2.14, 2.15)。

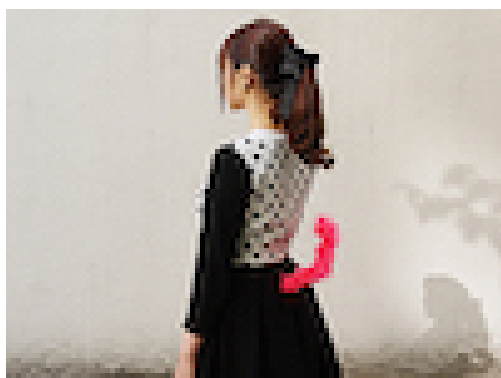


図 2.12 義尾 (GIO) [13]

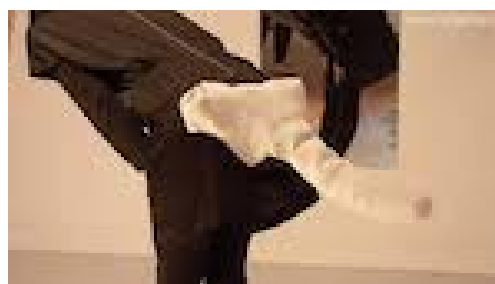


図 2.13 SiliFulin [14]

また、サンクステイル (Thanks Tail) [17] は感情表現を目的とした尾ではあるものの、これは人間ではなく自動車に装着することを目的としている (図 2.16)。車体の後方上部に取り付け、ワイヤレスで操作することでドライバーが後続の車に対して数種類に渡る意思表示を行うことを可能にする。サンクステイルはメディアアーティストである八谷和彦氏によって 1996 年に企画され、2004 年には実際にワコー社によって製品化されている。



図 2.14 shippo [15]



図 2.15 Taily [16]



図 2.16 サンクステイル (Thanks Tail) [17]

身体能力を拡張する尾

一方で, Xie ら [18] は感情表現に加えて, 人間の身体能力の拡張を目的とした人工尾デバイスとして RESTAIL を提案している (図 2.17). 椅子として使用する身体拡張モードとユーザの感情を表すために使用する表現拡張モードの 2 種類の使用方法があるとしており, 身体拡張モードでは尾部関節を連結させて 1 本の柱状の椅子に変形させることで, カンガルーのような尾を身体に追加している.



図 2.17 RESTAIL [18]

2.5. 本章のまとめ

本章では人間と脊椎動物における尾の機能分類と人間の平衡維持機能について述べた。また、人間拡張の領域における身体部位拡張と感覚拡張の先行研究を示した。身体拡張の研究が対象とする部位は数多く行われている一方で、尾のような現在人間が持たないような痕跡器官を対象とした研究は少ない。指や腕など、実生活において意識的に動かす頻度の高い身体部位と比較して、尾は人間の実生活における利用シーンが想定されにくい。したがって、人類の祖先が持っていた尾のような、身体の平衡維持機能の補助を役割とした身体部位をウェアラブルデバイスとして提案する研究は未だ行われていない。次章では、Arque のコンセプトデザインについて述べ、プロトタイプを作成する。

第 3 章

Arque の設計と開発

本章では、ウェアラブルな人工尾デバイスの開発における目標を述べ、提案手法のコンセプトをのべる。その後、複数のプロトタイプにおける設計方針と評価を述べ、ウェアラブルな人工尾デバイスシステムを構成する。

3.1. 目標設定

前章で述べたような猫やクロスジオマキザルのような尾の機能、つまり尾を振ることで身体の平衡維持機能を拡張することができれば、直立二足歩行では不安定な状況下 (運搬作業や高所での作業) や高齢者の加齢性平衡障害を推力提示によって補助することができると考えられる。しかし、従来の身体能力拡張の研究においては、尾のような現在の人体に適応していない器官を人工装具もしくはパワードスーツのように活用する提案がされていない。

提案するコンセプトは、尾を身体の平衡維持のために使う脊椎動物 (猫やクロスジオマキザル) のように、人間の平衡維持機能を拡張する人工尾システムである。もし、このようなシステムを実装し日常生活の中に溶け込ませることができれば、例えば、加齢によって前庭感覚や体性感覚が衰えてしまい平衡障害を抱える方の歩行補助や、高重量の荷物を抱えるような運搬作業の効率化が可能になるはずである。

本論文では、人間の身体平衡維持の補綴を目的としたシステム Arque の設計と開発を行う。本システムのコンセプトを図 3.1 に示し、次節以降では想定されるユースケースを述べた後、設計に必要な要素を確立するために行ったプロトタイプ作成について述べる。



図 3.1 Arque のコンセプト図

3.2. ユースケース

前節までで述べたように、本研究では人間拡張工学の文脈に則って義手や義足のような人工装具としての人工尾を作成し、推力提示により重心位置を制御するといった平衡維持能力を人間が持つことを目指す。一方で、現代の人体には尾はなく、人工尾デバイスの設計・実利用には人間の生活におけるユースケースを考慮する必要がある。私たちは日常生活において安定した直立二足歩行を無意識で行っているとはいえ、加齢による前庭感覚器官や体性感覚の機能低下や、高所や階段など足場の不安定な状況下での作業は転倒や転落の危険性を多く含む。この問題に対してウェアラブルデバイスとして不随意に動作し、装着者の重心位置を一定に保とうとすることが可能となる。また、猫やオマキザルのような平衡維持器官としての尾ではなく、魚類やワニのような移動に際する推力発生器官としての使用も想定されうる。これにより、水中や宇宙空間における移動の補助が可能となる。これらのユースケースは尾による推力を平衡維持のために利用するが、一方で推力により平衡を崩すシステムとしての利用も想定されうる。これによりエンタテインメントとしての VR コンテンツにおける全身力触覚フィードバック

システムとしての使用が可能となる。例として、非設置型の力触覚提示システムとして使用することで、VR コンテンツ内で発生した強風を装着者が体験した際、尾による推力で擬似的に風力を提示することが可能となる。

3.3. デザインコンセプト

前節で考慮したユースケースから、提案するデバイスの設計要件には以下が必要とされる。

- 現代人の肉体構造に基づいた筋骨格構造の再設計
- 装着者の肉体に合わせることを考慮した可変的な設計
- 実生活利用を考慮した安全性
- 人間の重心に変化を与えるのに十分な大きさの推力提示

本節では、これらを実現するための設計要件について検討を行う。

生物模倣による骨格デザイン

脊椎動物が持つような尾の平衡維持機能を人工尾で実現する上で、本論文では生物模倣による設計を試みる。建築や製造分野における生物模倣 (バイオミメティクス, バイオミミクリーなどとも呼ばれる) は、自然界に生じるプロセスを模倣、あるいは取り入れたビルや製品をデザインすることを意味している。具体例としては Spiber 社の非常に強靱な合成クモ糸繊維 [42] やヤモリの足をモデルにした接着テープ [43]、古くはライト兄弟による鳥の歩行メカニズムを取り入れた航空機の設計まで挙げられる。

現代の人間に適応するという点を考慮して尾部骨格を設計する上で、オマキザルや猫のような細い円柱状の尾は柔軟な動きに対応できるが、重量が軽く十分な推力を提示しにくい構造になる。そのため、Arque の設計においてはタツノオトシゴの尾部骨格を模倣した。Porter ら [19] によれば、タツノオトシゴの尾部は L

字型の骨盤プレートに囲まれた四角柱の形状をしており，捻りや変形に対して高い抵抗性を持つ (図 3.2)．この抵抗性はタツノオトシゴの繊細な脊椎の保護に役立つ．

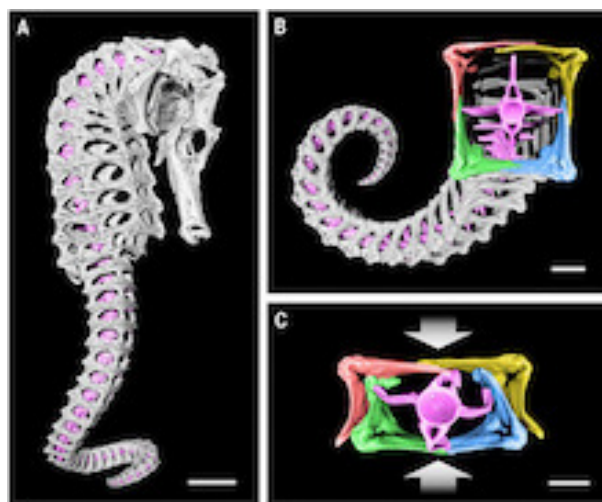


図 3.2 タツノオトシゴの尾部骨格 ([19] より抜粋)

人工筋肉を用いた筋構造の設計

骨格構造の設計と合わせて人工尾を動かすための筋構造についても考慮する必要がある．必要要件としては高い推力を提示する重量を動かすための高い出力密度と実生活での使用を想定した安全性・携帯性である．現在，パワーアシストや医療現場など人間とロボットが協調活動するためのシステムへの関心が高まり，安全性・親和性などの観点から人工筋肉がアクチュエータとして用いられている [44]．人工筋肉とは，ゴムや導電性ポリマー，形状記憶合金，カーボン・ナノチューブなどを材料とする伸縮性のアクチュエータ (作動装置) である．特に空気圧により駆動する空気圧式ゴム人工筋肉は特に軽量であり，出力重量比に優れる他，高い柔軟性・安全性を持つ．Arque の設計においては Mckibben 型人工筋肉を用いた．この人工筋肉はゴムチューブに網目状のメッシュスリーブを覆った構造となっており，空気圧の印加によりチューブが膨張した時にスリーブの網目の角度が変化

しメッシュスリーブが径方向に押し出されることで、軸方向に収縮する力が得られる。

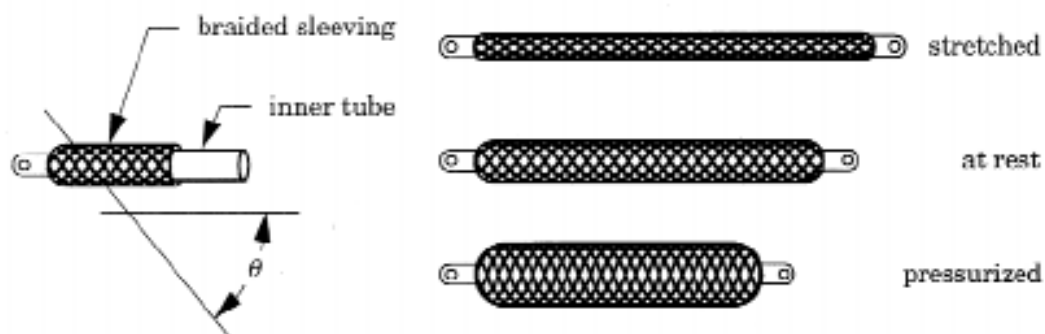


図 3.3 McKibben 型人工筋肉 ([20] より抜粋)

重量調整設計

装着者の重心の変化に影響を与える推力を提示するには、Arque 自体に十分な重量が必要である。Massaro ら [31] によれば、石の運搬時に尾によってバランスを取るオマキザルにおいて、尾の重量は体重の 5%程を占めており、運搬中に尾を伸縮させて推力を生むことで重心位置の安定させている。このことから、人間が尾を平衡維持器官として使用する際にも、尾の重量は少なくとも装着者の体重の 5%を超える必要があると考えられる。また、Arque の利用シーンが異なれば装着者の身体的特徴も大きく変化しうるため、Arque の重量設計においては可変的な調整が可能な設計にすることを考慮する必要がある。

制御システム

オマキザルや猫に備わっている平衡維持器官としての尾は、外部環境からの情報によって不随意で機能している。Arque の制御設計においては、装着者の重心

位置を推定し、任意の方向へ推力を提示することで重心位置を変化させることを目的とする。例として、崩れたバランスを補助する際は重心移動方向に対して逆位相に推力を提示する。また、同位相に推力を提示することでバランスを崩すような力触覚提示システムとして機能する。

重心位置の推定には圧力センサもしくはジャイロセンサ (MPU6050) を用いる。本論文では、底面 4 隅に圧力センサが内蔵されている任天堂社製の Wii Fit Board(以下 Wii Board) を用いた。

システムの動作として、図 3.4 に示すように、Wii Board 等センサで取得した入力信号はマイコンを通じて PC に送信され、ソレノイドの開閉を制御することでアクチュエータ内の気圧を調整し、Arque の挙動を決定する。

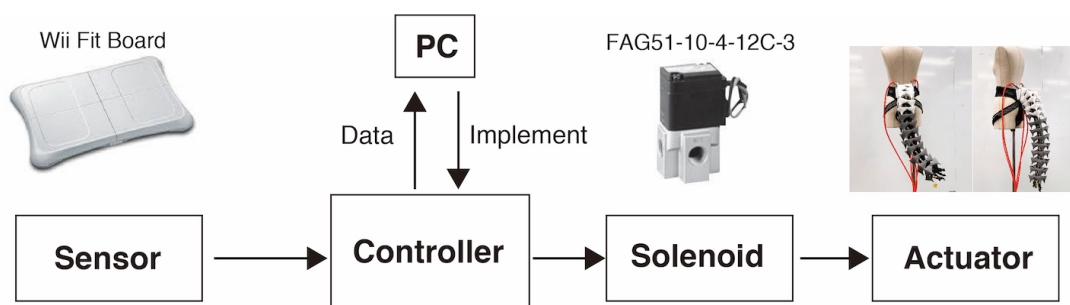


図 3.4 システムの構成図

3.4. 1st プロトタイプ

図 3.5 に最初に作成したプロトタイプの着用図を示す。前節で述べた設計要件に基づいて開発を行う前に、1st プロトタイプにおいては軽量かつ速い動作が可能な人工尾の作成を行った。



図 3.5 1st プロトタイプの着用図

3.4.1 実装

図 3.6, 3.7 に示すように、1st プロトタイプはアクリル製の円盤とケーブルグラウンドで構成される人工椎骨を連結して作成したものである。計 13 の椎骨は、中心を通るチューブと 4 本のワイヤを介して連結される (図 3.8)。1st プロトタイプの筐体は $L500 \times W50 \times H50\text{mm}$ 、重量は約 170g である。

システムの駆動はワイヤを 2 つのサーボモータ (Herkulex DRS-0201) で引っ張ることによって行う。図 3.9 に示すように、腰部に装着可能なベルトにサーボモータ



図 3.6 構成部品

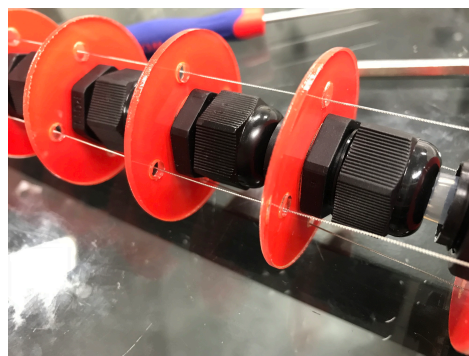


図 3.7 尾椎

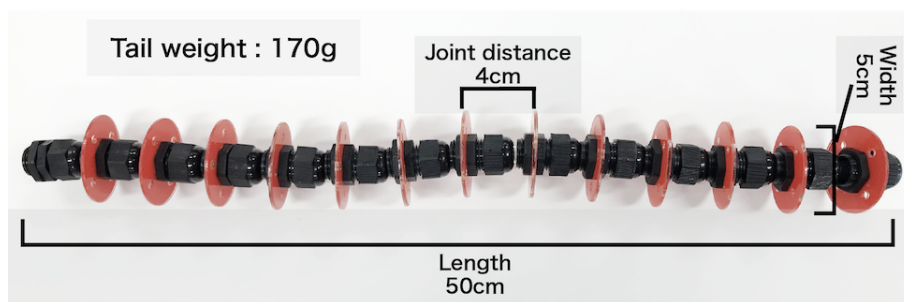


図 3.8 1st プロトタイプの概観図

を固定，加えて尾部を連結することで簡易的に着脱が可能な人工尾デバイスを作成した．1st プロトタイプ制作時においては，空気圧式人工筋肉ではなく，GIO [13] のような筋電位の変化を入力値として制御するシステムを構築した．GIO においては筋電位の取得に大臀筋を用いているが，ここでは動作の確認に留めるため筋電位の取得部位は前腕筋を対象とした．

システムの動作としては図3.10に示すように，電極パッドを前腕筋に貼り付け，筋肉を収縮させることでセンサから取得した筋電位の変化が入力信号としてマイコンを通じてPCに送られ，モータの動作を制御，尾部が動作する．

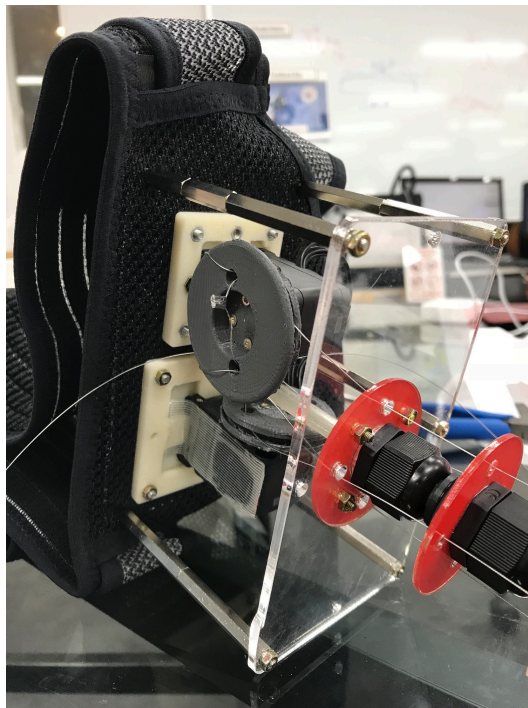


図 3.9 サーボモータによる駆動

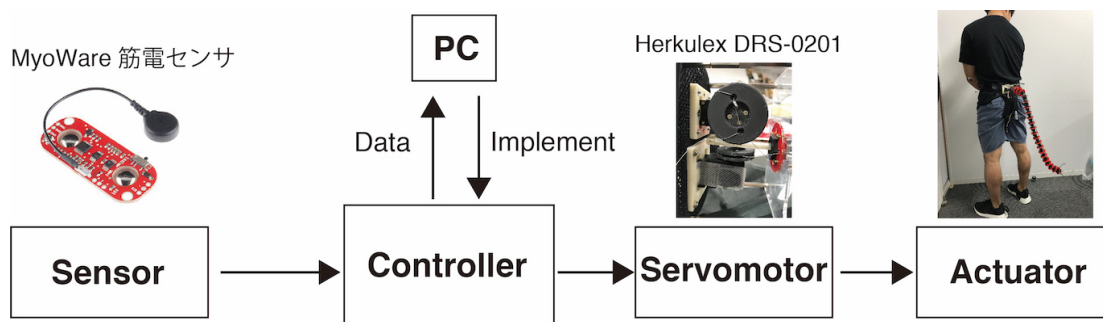


図 3.10 制御システム構成図

3.4.2 評価と考察

全体として、1st プロトタイプの設計は携帯性と軽量性の点に関しては優れるが、装着者の重心に影響を与えるような推力の提示、もしくは尾部に荷重を付加した際の実出力密度が不十分であった。また、システムの制御にあたって前腕部の筋電位変化を入力信号として用いたが、筋肉が弛緩しているか、収縮しているかをリアルタイムで判定することが尾の動作において重要である。しかし、表面筋電位測定において、高い精度で検出できる部位の特定が困難なことから筋電位の大きさが個人によって異なることが課題として挙げられる。

3.5. 2nd プロトタイプ

2nd プロトタイプ制作においては、以下の要件に基づき、人工尾デバイスの作成を行った。

- タツノオトシゴの尾部を生物模倣した骨格構造設計
- 可変的な重量調整設計
- 空気圧による制御システム

図 3.11 に 2nd プロトタイプの着用図を示す。

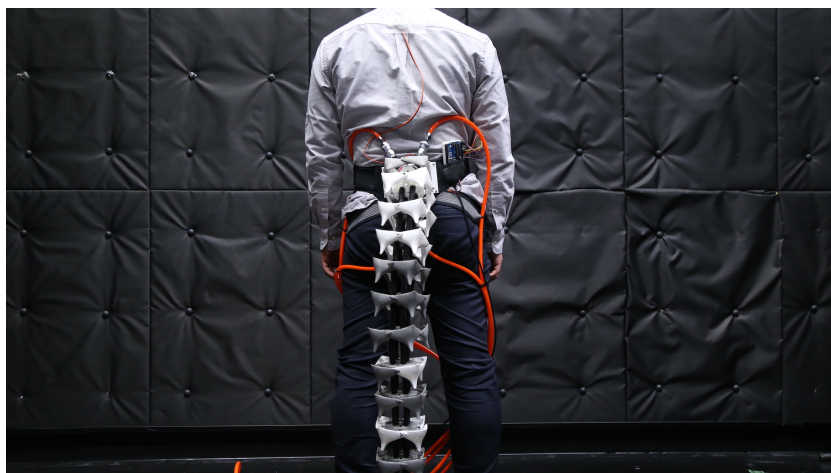


図 3.11 2nd Prototype の着用図

3.5.1 タツノオトシゴの尾部を生物模倣した骨格構造設計

設計要件に基づき 3DCAD ソフトウェア Fusion360¹にてタツノオトシゴの尾部骨格を模倣したモデルを作成した(図 3.12, 図 3.13)。設計にあたり、椎骨には人工筋肉を通すための 4 つの穴と重量調整のための矩形型の凹みを加えた。

1 <https://www.autodesk.co.jp/campaigns/design-now>

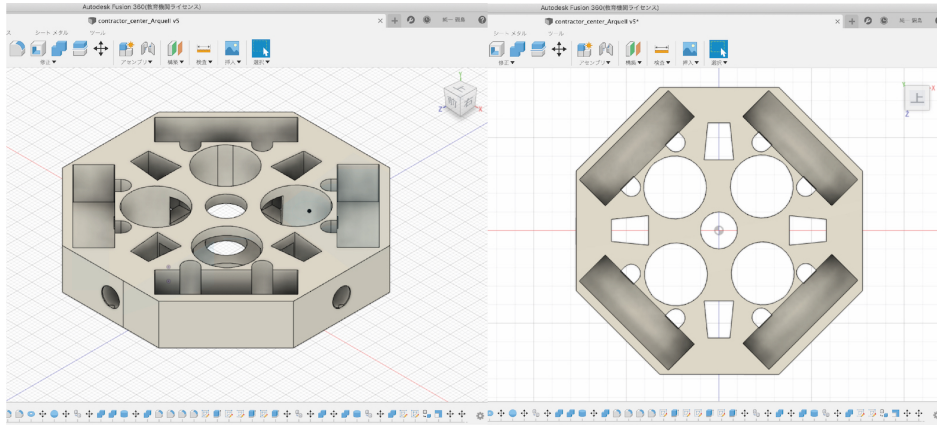


図 3.12 椎骨の 3D モデル (左) 横から見た図 (右) 上から見た図

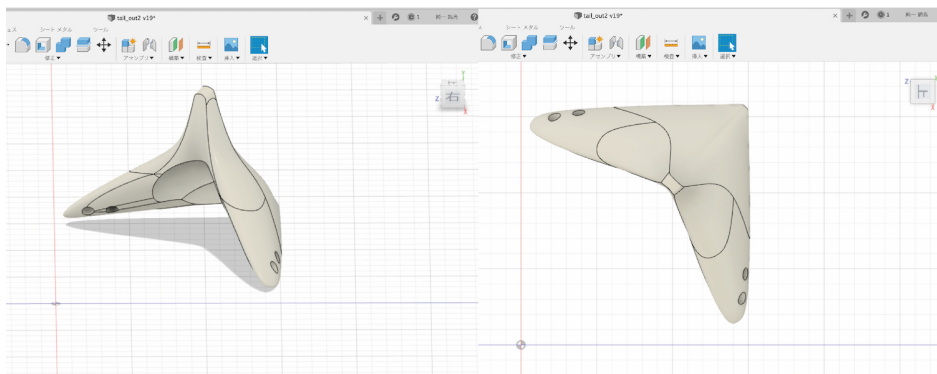


図 3.13 L字型外殻の 3D モデル (左) 横から見た図 (右) 上から見た図

これらを PLA 素材にて出力し，組み合わせてタツノオトシゴの尾部骨格を構築する．組み立てにあたり，タツノオトシゴの尾のねじりや衝撃に対する高い抵抗性を再現するために圧縮コイルバネを外殻と椎骨の間に接続した (図 3.14)．加えて，Mckibben 式人工筋肉を椎骨に挿入することで，空気圧式アクチュエータを構築した (図 3.15)．

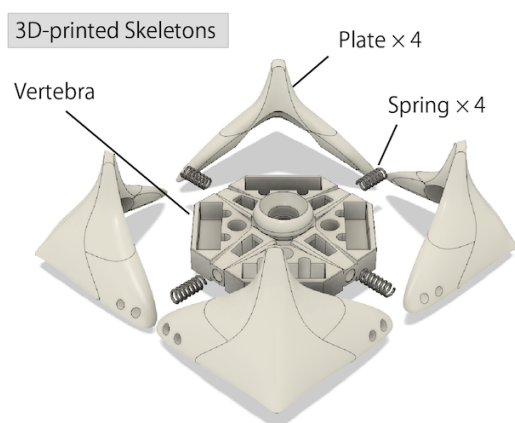


図 3.14 関節の 3D モデル

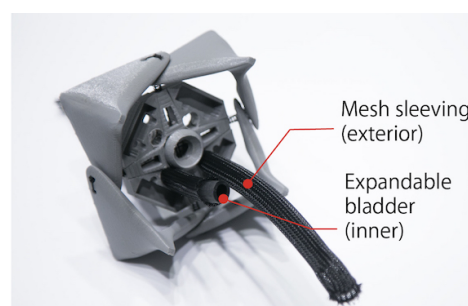


図 3.15 空気圧式アクチュエータ

図 3.16 に 2nd プロトタイプの概観図を示す．筐体は椎骨数が計 13 の状態で， $L7100 \times W115 \times H115\text{mm}$ ，基本重量は 1600g である．空気圧式アクチュエータは尾部の根元でエアホースと着脱可能な構造になっている．また，装着者はベルトを腰部に巻くことでシステムを装着する．

3.5.2 可変的な重量調整設計

設計要件に基づき，装着者の体重の 5% を上回ることに加え，可変的に重量を調整できるように設計した．椎骨の四方に矩形の凹みを作り，ここに装着者の体重に合わせて荷重を加えることで重量調整が可能となる．荷重には 1 つ 20g の鉛を用いる．椎骨 1 つあたりに 8 つの荷重が搭載可能であり，これによって各椎骨の重さは 24g～184g まで変化する (図 3.17)．全体としては，人工尾システムの基本重量 1600g から 3680g に調整することが可能である．人工尾の重量を装着者の体重

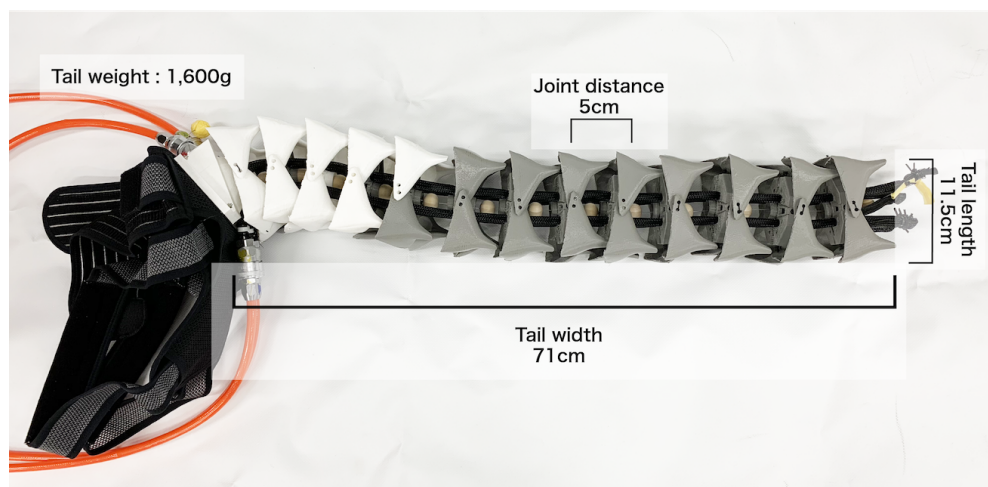


図 3.16 2nd プロトタイプの概観図

(W) に対して 5% に調整する時、付加すべき荷重の合計数 (N) は、式 3.1 を使用して計算できます。

$$N = \frac{W \times 5\% - 1600}{20} \quad (3.1)$$

また、椎骨自体の数を増減させることで、装着者の身長や体重に合わせてシステムの重量を調整することができる。

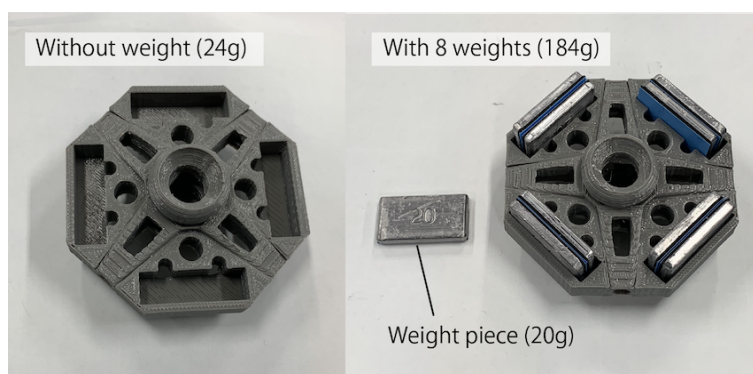


図 3.17 重量調整設計 (左) 荷重なし (右) 最大荷重

3.5.3 制御システム

人工尾の制御に用いる空気はエアーコンプレッサから吐出されており，最大 0.8MPa まで気圧の調整が可能である．吐出された空気は分岐管により 4 つに分岐され，ソレノイド (FAG51-10-4-12C-3) の開閉を制御することで任意のアクチュエータを加圧し，人工尾システムの挙動を変化させることができる (図 3.18)．

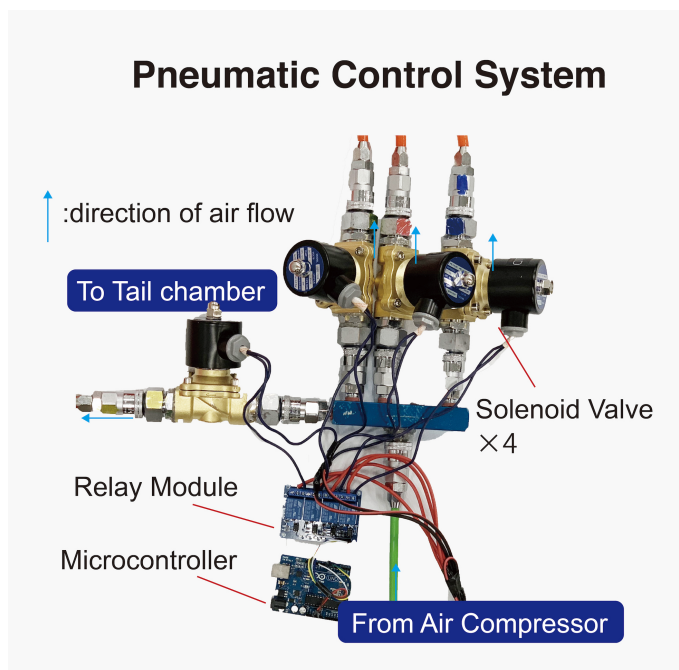


図 3.18 空気圧制御システム

人工尾システムには 4 つの空気圧式アクチュエータが通っており，図 3.19 に示すように空気圧を印加する筋肉に応じて 8 つの異なる方向に沿って尾を作動させることが可能である．例として，人工尾の上側 2 つの人工筋肉を加圧することで，人工尾システム全体も上方向へと収縮する．

Wii Board やジャイロセンサから取得した入力信号はマイコン (Arduino UNO) を通じて PC に送信される．これを元に Unity² の開発環境において人工尾システムの挙動をリアルタイムに反映したユーザインタフェースを制作した (図 3.20)．

² <https://unity3d.com>

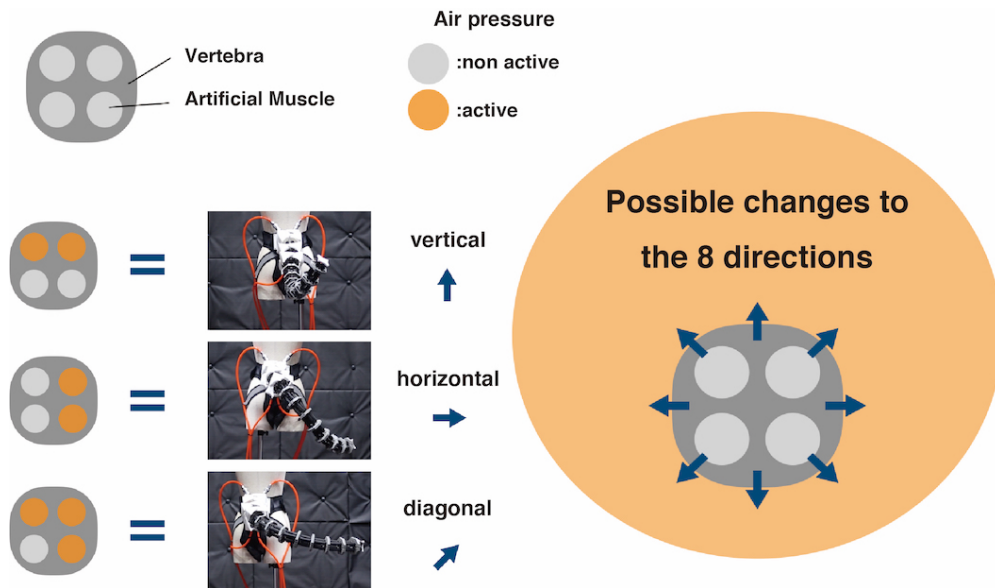


図 3.19 作動するアクチュエータにより 8 方向への挙動が可能

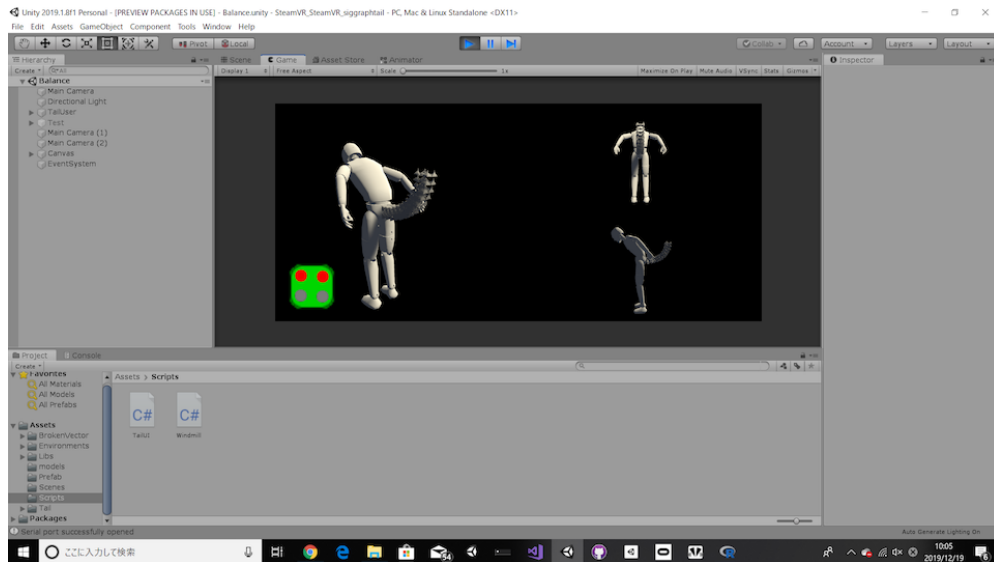


図 3.20 開発環境と動作の様子

3.5.4 評価と考察

本節では筆者の身体的特徴(身長 170cm, 体重 68kg)に合わせて重量調整を行った人工尾システムについての評価を述べる。椎骨の数は 13, 総重量は 3.4kg であった。1st プロトタイプと比較して, 設計要件に基づいた 2nd プロトタイプでは人工尾自体の重量を増やし, 高い出力密度を持つ空気圧式人工筋肉アクチュエータを用いることで, 人工尾の動作によって不安定な姿勢(片足立位)の装着者の重心には十分な影響を与える程の推力を提示することが可能であるとわかった。一方で, 安定した直立姿勢に対しては推力が提示されている感覚は弱く感じられた。原因としては重量の増加に対して, アクチュエータの駆動に用いる気圧を 0.8MPa 以上に増加できず, 結果として人工尾の動作範囲が狭くなることが主要であると考えられる。また, McKibben 型人工筋肉にはゴムチューブと網が擦れることによって特性が変動する, もしくはゴムが磨耗して寿命が短くなるなどの問題点もある。

3.6. 本章のまとめ

本章ではシステムの設計においてユースケースから想定される必要な要件から Arque の設計要件を述べ, 次にプロトタイプ制作を行った。次章では, 本章で述べた Arque のコンセプトを実際に体験してもらい, 重心に与える影響を数値化して評価する。また, 体験型展示を通して得たフィードバックと考察について記述する。

第 4 章

評 価

4.1. Arque による重心動揺の制御

4.1.1 目的

人間は直立した状態であっても無意識下でバランスを保ちつづけている。直立姿勢を保持させる機構は立ち直り反射と呼ばれ、この立ち直り反射は大脳皮質の随意的な制御を介さず起こるといわれており、生理学的には不随意的な調節機構によって司られている身体の平衡維持機能である。

平衡機能検査の一つとして施行される重心動揺検査 [45] は、平衡機能の総合的把握に対して有用である。本節では、重心動揺測定を用いることで、Arque を装着した際の身体動揺について比較を行う。

4.1.2 概要

対象と方法

被験者は整形外科的・神経学的疾患の既往を有しない健常な若年男女 8 名 (27.7 ± 2.03 歳) を対象に実験を行った。

重心動揺の計測には任天堂社製の Wii Fit Board(以下 Wii Board) を使用した。重心動揺計として Wii Board を活用する例は理学療法の臨床現場においても報告されている [46–51]。重心動揺計によって圧中心 (以下, COP) の移動軌跡を計測し、身体の動揺性の評価とした。重心動揺値の抽出には、兵頭ら [52] の WBBSS Ver2.1 及び WBBSS Analysis Ver1.1 を用いた。

実験は被験者が視覚刺激による偏位を生じさせず、また立ち直り反射を生じさせやすくするため、Wii Board の上で閉眼かつ片足立位の姿勢を保持させた (図 4.1)。検査の目的、姿勢の説明を行った後、Arque 非装着の状態では 30 秒間の重心動揺を記録した。その後、30 分間の休憩を挟んだ上で Arque を装着した状態で同様に計測した。



図 4.1 片脚立位のイメージ¹

4.1.3 検査事項

Arque 非装着時検査及び Arque 装着時検査で各サンプリング時間における x-y 座標を記録し、各指標の算出を行う。得られた計測データは、x: 右を正とする左右方向、y: 前方を正とする前後方向として重心位置の時系列に変換し、重心動揺

¹ <https://burkelawvt.com/dui-one-leg-stance>

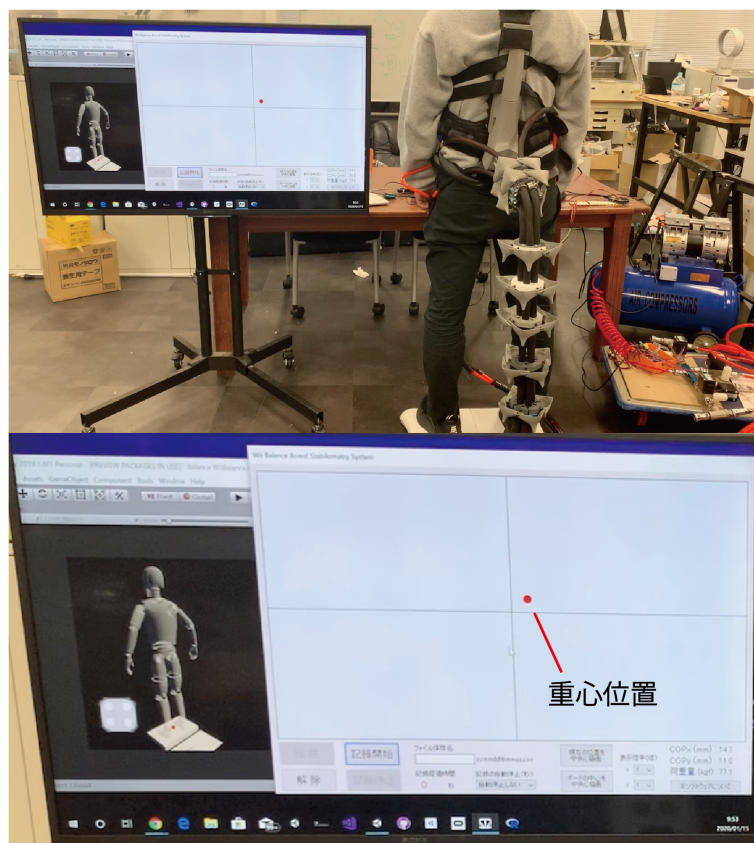


図 4.2 重心測定の様子と測定画面

の指標として一般に用いられている総軌跡長，外周面積，単位面積軌跡長を代表値として算出した．各指標の定義については以下の通りである．

- ・総軌跡長 (重心動揺距離)：計測時間内の COP の移動軌跡の全長を示し，値の増加は動揺の不安定性を示す．

- ・外周面積：重心動揺の軌跡の最外部によって囲まれる内側の面積であり，値の増加は動揺の不安定性を示す．

- ・単位面積軌跡長：総軌跡長を外周面積で除した値であり，単位面積内を移動した COP 軌跡の長さを表している．値の減少は動揺の不安定性を示す．

Arque 非装着時と Arque 装着時の重心動揺データを対応のある t 検定を用いて比較した．有意水準は 1%とした．

4.1.4 結果及び考察

Arque 装着前後での閉眼片足立位姿勢における重心動揺図の例を以下に示す．(同一被験者)

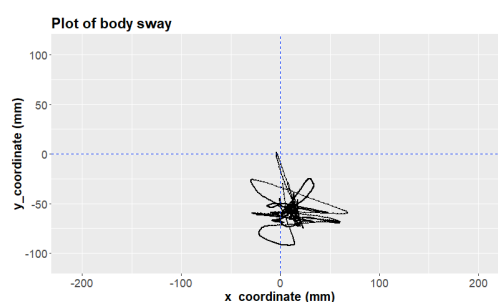
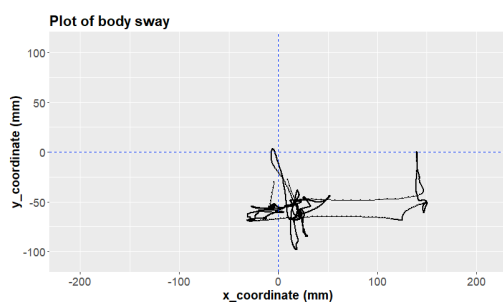
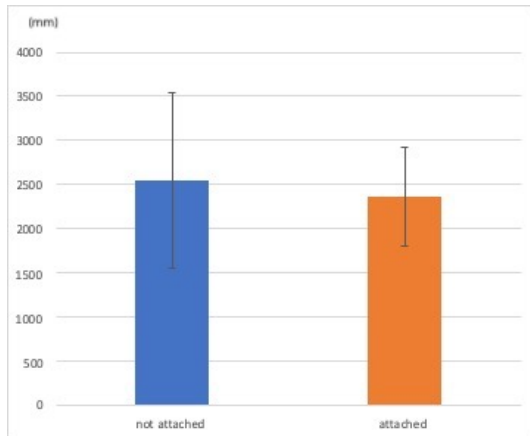
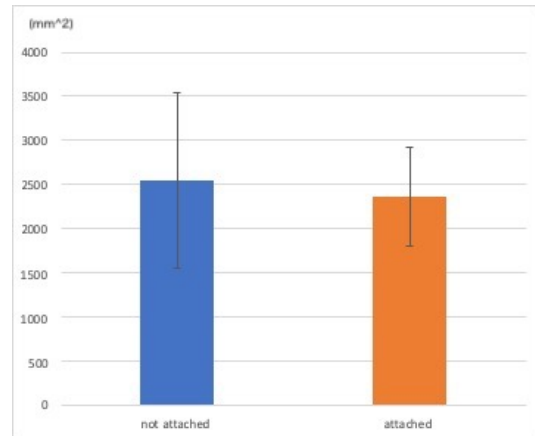
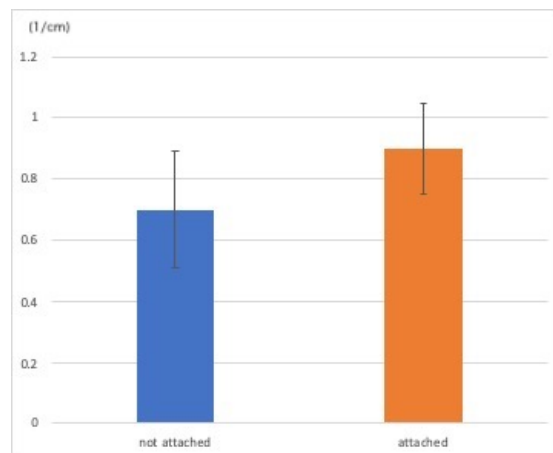


図 4.3 重心動揺図の例 (Arque 非装着時) 図 4.4 重心動揺図の例 (Arque 装着時)

得られた重心動揺図から各解析指標を算出し，比較を行った．その結果を図 1-3 に示す．

重心動揺の総軌跡長は表 4.1 のごとくで，Arque 装着前後で有意の差は見られなかった．重心動揺の外周面積は表 4.2 のごとくで，Arque 装着前後で有意の差は見られなかった．重心動揺の単位面積軌跡長は表 4.3 のごとくで，Arque 装着

図 4.5 総軌跡長 (Average \pm SD)図 4.6 外周面積 (Average \pm SD)図 4.7 単位面積軌跡長 (Average \pm SD)

	Arque 非装着時	Arque 装着時
平均値	2548	2362
標準偏差	993	559
有意差	なし	

表 4.1 装着前後の総軌跡長

	Arque 非装着時	Arque 装着時
平均値	4201	2861
標準偏差	1538	830
有意差	なし	

表 4.2 装着前後の外周面積

	Arque 非装着時	Arque 装着時
平均値	0.7	0.9
標準偏差	0.19	0.15
有意差	p<0.01	

表 4.3 装着前後の単位面積軌跡長

前後で有意差が生じた ($p<0.01$)。総軌跡長と外周面積においては有意な差は生じなかったものの減少傾向にあることがわかった。閉眼片足立位は日常生活では生じにくい姿勢であり、元々の平衡維持能力の個人差によって数値にばらつきが出るのが問題としてあげられる。平衡維持能力の補綴という目的から考えると閉眼片足立位などバランスを崩しやすい体勢もしくは状況下で人工尾の制御システムを変更する必要性が考えられる。一方で、全身力触覚フィードバックを提示する、つまりバランスを崩すためのシステムとして Arque を考えると、開眼両足立位などの安定した姿勢に対象を変更して、どれだけ重心移動の影響を与えられるか検討する必要がある。これらの問題においては、人工筋肉アクチュエータの出力密度をあげる他、重心位置の変化に対してシステムの反応速度を高めることやソレノイドの開閉を流動的に行うことで人工尾の挙動を細かく制御する手法を検討する必要がある。

4.2. 展示を通じたユーザビリティテスト

本研究は力触覚を提示する人工尾型システム「Arque」を設計し、人間の平衡維持能力を補綴することを目指すことを目的としている。身体能力の拡張にアプローチする人工尾デバイスに関しては制作例が少ないため、Arqueの設計上における理想的要件の確立においてはプロトタイプの実成を重ねることに加え、体験型展示を通じて体験者の様子とフィードバックを得ることが重要であった。本節では国際学会であるSIGGRAPH2019と本学メディアデザイン研究科におけるKMD Forum2019でのArqueの体験型展示の様子について述べる。

4.2.1 概要

2019年7月28日から同年8月1日にかけて、米国のロサンゼルス・コンベンションセンターにて開催された国際学会SIGGRAPHでデモンストレーションを兼ねた展示を行った。SIGGRAPHは世界最大規模のコンピュータグラフィックスの学会であり、発展途上の先端技術を扱うセッション「Emerging Technologies」には、VRや人間拡張に関する学術系の展示が数多く見られる。本展示も同セッションにて展示を行い、約300名の体験者がArqueを体験した。

また、2019年11月2日には、KMD Forum2019にて展示を行い、約30人に体験してもらった。

4.2.2 方法

Arqueに関して説明をした後、来場者には片足立位の姿勢を保持してもらい、Arqueによって重心を崩す体験をしてもらった。Arqueの操作にはWii Boardやセンサーではなくジョイスティックコントローラを用いたが、これはまず説明をしながら操作することで体験者に提示される力触覚への集中を図ってもらい、その後で体験者自身がArqueを操作してみるといった2段階の体験フローにするためである。1人あたりの体験時間は約4分間である。体験者一人一人に合わせた重量調整をすることは難しいのでArqueの重量は2100gに設定した。

4.2.3 結果とフィードバック

体験者の多くが Arque の挙動による推力を感じており、片足立位姿勢において Arque を作動させることで平衡維持を十分に崩せており、重心位置を動かしている様子が観察された。一方で、体験者によっては装着部のベルトが体にフィットせず、尾部の根元と体験者の腰部の間に空間が生まれてしまい推力が十分に伝わっていない様子が見られた。体験者からは「感じたことのない変な感覚」「奇妙だ」「尾が生えた気分」などといった驚きの感情が多く含まれるような意見を得られた。一方で「あまり推力を感じられなかった」「(身長が標準より極端に高く)尾の位置が合わない」という意見を得ることができた。これは主に体躯の大きな体験者に対して今回のシステム重量から生まれる推力が不足していたことによるものが大きいと考えられる。



図 4.8 SIGGRAPH2019 における体験型展示の様子 (1)

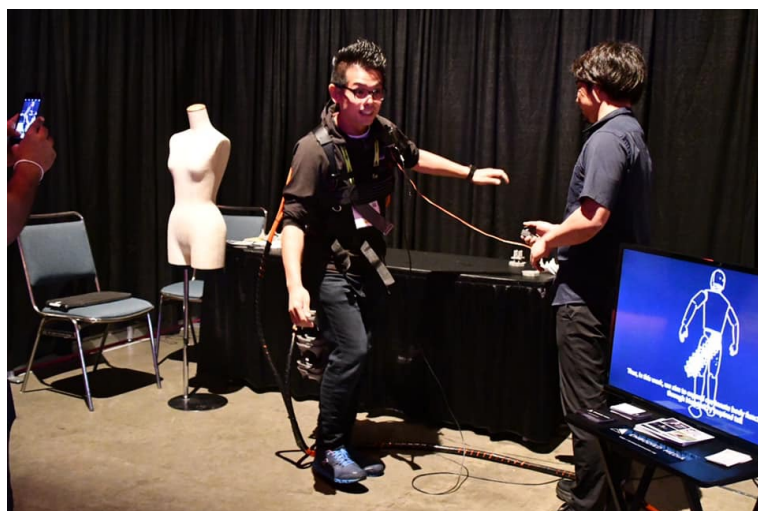


図 4.9 SIGGRAPH2019 における体験型展示の様子 (2)



図 4.10 KMD Forum2019 における体験型展示の様子

第 5 章

結 論

本論文では、人間拡張工学の文脈に則って義手や義足のような人工装具としての人工尾を作成し、推力提示により重心位置を制御するといった平衡維持能力を人間が持つことを目標に、生物模倣による筋骨格構造の設計と空気圧式人工筋肉アクチュエータを用いた制御システムによる人工尾デバイス Arque を提案した。このシステムの実用に向けて、重心動揺計測と体験型展示を通して評価を行った。

第 1 章では、人類の進化における道具の使用から人間拡張技術の発展と、人間から失われた尾を身体拡張により補綴することの必要性や重要性を示すことで本研究の目的を示した。

第 2 章では、脊椎動物における尾の機能分類と人間の平衡維持能力を述べた後に、身体拡張や人工尾デバイスに関する研究を紹介した。人間の平衡維持能力に関しては、脊椎動物と比較した人間の最大の特徴とも言える直立二足歩行の獲得が重心の不安定性を高めていることと、前庭感覚など平衡維持機構によって私たちが普段どうやって身体の平衡を維持しているか、また平衡維持能力に関する課題を述べた。

第 3 章では、まず人工尾デバイス Arque の設計における目標について述べた後、Arque における想定されるユースケースとそれに基づいた設計要件を示した。加えて、2 種類のプロトタイプを制作し、それぞれを比較、評価を行った。ワイヤとサーボモータを用いた 1st プロトタイプは設計要件における携帯性では優れるが重心位置を変化させるための十分な推力は提示できなかった。2nd プロトタイプにおいては生物模倣による筋骨格構造と可変的な重量調整の設計、さらに空気圧式人工筋肉アクチュエータによる駆動方法を用いたことで、1st プロトタイプと比較して大きな推力を装着者に提示することができた。一方で、崩れたバランス

を立て直す平衡維持器官としての尾と評価できる程の出力密度と操作性を示すことはできなかった。

第4章では、重心動揺計測によって人工尾システムの評価実験を行い、過去の体験型展示を通したユーザビリティテストから得たフィードバックを元に人工尾デバイス Arque の評価と考察を述べた。重心動揺計測では平衡維持能力の補綴という目的において統計上有意な数値は生じなかったものの、装着者の重心移動が安定する傾向が見られた。また、体験型展示を通したフィードバックからは「しっかりと重心が変わるのを感じる事ができた」「尾が生えた気分になった」「感じたことのない感覚で面白い」など肯定的な意見が多く得られた。

今後の展望としては、体験型展示や重心動揺計測による評価実験から得られた考察と設計要件に基づき、改めて人工尾システムの制作を行う。より多くの装着者に対して普遍的に重心移動の補綴が可能な人工尾システムの完成を目的とする。また、現状では平衡維持能力に問題のない人やシチュエーションにおいての評価を中心としているため、今後は高齢者や高所作業・運搬作業など実利用を見据えたユーザビリティテストを行う。本研究を今後発展させていくことによって、身体拡張技術の普及、更には「身体的な欠陥を補綴する」というマイナスな印象を受けやすい人工装具に対してより多くの人々が実利用したいと考えるシステムを制作したいと考える。人工尾「Arque」による身体拡張体験の普及で、多くの人々がテクノロジーによる新たな人間の身体の形を想像し、新たな身体変容/感覚を体験することができると考えられる。

謝 辞

本研究の指導教員であり、多くの学会投稿や展示の機会を頂き、幅広い知見からの確かな指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました。慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太教授に心から感謝いたします。Embodied Media Project で過ごしたこの2年間は非常に刺激的な期間であり、これからの人生のあり方にも影響を与える大切な時間を過ごすことができました。

研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科のムハマドヤメンサライジ特任講師に心から感謝いたします。研究に関する相談や議論、開発において感謝しきれない程のサポートをしていただきました。

研究指導以外にも授業などの場で数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の中村伊知哉教授に心から感謝いたします。

Embodied Media Project のスタッフ、先輩、同期、後輩、特に研究生活において多くの時間を過ごした下川和俊さん、鷗重誠さん、また Hacking Studio で仲良くしていただいた中尾拓郎さんに心から感謝いたします。

最後に我がままばかりの私を育ててくれ、進学や生活面で多くのサポートをしていただいた家族に感謝いたします。みなさま本当にありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] Stanley Kubrick. *2001: A Space Odyssey*. Metro-Goldwyn-Mayer Inc., 1986.
- [2] Kai Kunze, Kazutaka Inoue, Katsutoshi Masai, Yuji Uema, Sean Shao-An Tsai, Shoya Ishimaru, Katsuma Tanaka, Koichi Kise, and Masahiko Inami. Meme: Smart glasses to promote healthy habits for knowledge workers. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '15, pp. 17:1–17:1, New York, NY, USA, 2015. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2782782.2792491>, doi:10.1145/2782782.2792491.
- [3] JOIN Capital. Pioneering “Human Augmentation”: Why We’ve Invested in German Bionic. URL: <https://elib.maruzen.co.jp/elib/html/BookDetail/Id/3000026234/>.
- [4] Kasey Panetta. Top trends in the gartner hype cycle for emerging technologies,2017, 08 2017. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>.
- [5] Kristian W. Sanggaard, Carl Chr. Danielsen, Lise Wogensen, Mads S. Vinding, Louise M. Rydtoft, Martin B. Mortensen, Henrik Karring, Niels Chr. Nielsen, Tobias Wang, Ida B. Thøgersen, and Jan J. Enghild. Unique structural features facilitate lizard tail autotomy. *PLOS ONE*, Vol. 7, No. 12, pp. 1–8, 12 2012. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051803>, doi:10.1371/journal.pone.0051803.
- [6] 藤原慎一. 絶滅四肢動物の生息姿勢をより確からしく復元するために, 第 17

- 卷. 東京大学総合研究博物館, 10 2012. URL: http://www.um.u-tokyo.ac.jp/web_museum/ouroboros/v17n2/v17n2_fujiwara.html.
- [7] Tyler Reynolds. *Human Evolution Timeline*. Sutori, 6 2018. URL: <https://www.sutori.com/story/human-evolution-timeline--M51oiCAcu4cMgCBEN9bxenEV>.
- [8] Domenico Prattichizzo, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, and Gionata Salvetti. The sixth-finger: a modular extra-finger to enhance human hand capabilities. In *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Vol. 2014, 08 2014. doi:10.1109/ROMAN.2014.6926382.
- [9] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metalimbs: Multiple arms interaction metamorphism. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, pp. 16:1–16:2, New York, NY, USA, 2017. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3084822.3084837>, doi:10.1145/3084822.3084837.
- [10] Hideyuki Ando, Junji Watanabe, Maki Sugimoto, and Taro Maeda. Theory and applications of the vestibular sensation interface. *Transactions of Information Processing Society of Japan*, Vol. 48, No. 3, pp. 1326–1335, mar 2007. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/110006223870/>.
- [11] Tomoya Sasaki, Richard Sahala Hartanto, Kao-Hua Liu, Keitarou Tsuchiya, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. Leviopole: Mid-air haptic interactions using multirotor. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '18, pp. 12:1–12:2, New York, NY, USA, 2018. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3214907.3214913>, doi:10.1145/3214907.3214913.
- [12] 峻介高田, 渉山田, 宏幸真鍋, 文太郎志築. ドローンを用いたウェアラブルな歩行牽引デバイスの構築. Technical Report 9, 筑波大学大学院システム情報

- 工学研究科コンピュータサイエンス専攻, NTTドコモ先進技術研究所, NTTドコモ先進技術研究所, 筑波大学システム情報系, 1 2018.
- [13] Kaori Ujima, Azusa Kadomura, and Ichiro Sio. Gio: Artificial tail to redevelop vestigial functions. pp. 349–354, 02 2015.
- [14] Ryota Kuwakubo. Silifulin, 2009. URL: <http://www.mot-art-museum.jp/exhibition/cyberarts/ja/artist.html>.
- [15] neurowear, 2012. URL: http://neurowear.com/projects_detail/shippo.html.
- [16] Shota Ishiwatari, 2013. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/shota/tailly-the-tail-that-wags-when-you-get-excited/description>.
- [17] Kazuhiko Hachiya, 1996. URL: <http://www.petworks.co.jp/~hachiya/works/ThanksTail.html>.
- [18] Haoran Xie, Kento Mitsuhashi, and Takuma Torii. Augmenting human with a tail. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, AH2019, pp. 35:1–35:7, New York, NY, USA, 2019. ACM. URL: <http://doi.acm.org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/3311823.3311847>, doi: 10.1145/3311823.3311847.
- [19] Michael Porter, Dominique Adriaens, Ross L Hatton, Marc Meyers, and Joanna Mckittrick. Why the seahorse tail is square. *Science (New York, N. Y.)*, Vol. 349, , 07 2015. doi:10.1126/science.aaa6683.
- [20] Frank Daerden and Dirk Lefeber. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, Vol. 47, , 03 2002.
- [21] Marshall McLuhan. *Understanding Media: The Extensions of Man*. McGraw-Hill, 1964.

- [22] b temia. URL: <https://www.b-temia.com/>.
- [23] 富田京一, 荒俣幸男, さとう俊. おもしろくてためになる 魚の雑学事典. 日本実業出版社, 11 2004.
- [24] 足田努. 爬虫類の進化. 東京大学出版会, 4 2002.
- [25] Larry D. Martin. *The Origin of Birds and of Avian Flight*, pp. 105–129. Springer US, Boston, MA, 1983. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6781-3_4, doi:10.1007/978-1-4615-6781-3_4.
- [26] 黒沢令子. 鳥—優美と神秘、鳥類の多様な形態と習性. シーエムシー出版, 11 2012.
- [27] 遠藤秀紀. 哺乳類の進化. 東京大学出版会, 12 2002.
- [28] Shawn M O'Connor, Terence J Dawson, Rodger Kram, and J Maxwell Donelan. The kangaroo's tail propels and powers pentapedal locomotion. *Biology letters*, Vol. 10, No. 7, p. 20140381, 2014.
- [29] Curt Walker, Charles J. Vierck Jr., and Louis A. Ritz. Balance in the cat: role of the tail and effects of sacrocaudal transection. *Behavioural Brain Research*, Vol. 91, No. 1-2, pp. 41–47, March 1998. doi:[https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(97\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(97)00101-0).
- [30] Amir Patel. Understanding the motions of the cheetah tail using robotics. 2015.
- [31] Luciana Massaro, Fabrizio Massa, Kathy Simpson, Dorothy Fragaszy, and Elisabetta Visalberghi. The strategic role of the tail in maintaining balance while carrying a load bipedally in wild capuchins (*sapajus libidinosus*): a pilot study. *Primates*, Vol. 57, , 01 2016. doi:10.1007/s10329-015-0507-x.

- [32] 秀人吉岡, 隆文後藤, 卓士秋山. Human tail の 1 例 : 本邦報告 49 例の検討. 日本小児外科学会雑誌, Vol. 37, No. 5, pp. 831–836, 2001. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/110002113149/>, doi:10.11164/jjsps.37.5_831.
- [33] Jay Kelley. *Paleobiological and Phylogenetic Significance of Life History in Miocene Hominoids*, pp. 173–208. 01 1997. doi:10.1007/978-1-4899-0075-3_9.
- [34] 佐藤幸治. 人間はどこまでサルか—有限性の問題 [iv]—. 教育学研究論集, Vol. 5, pp. 61–74, 2010.
- [35] Laura Gruss and Daniel Schmitt. The evolution of the human pelvis: Changing adaptations to bipedalism, obstetrics and thermoregulation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Vol. 370, , 03 2015. doi:10.1098/rstb.2014.0063.
- [36] 室伏利久. 加齢とめまい・平衡障害. 新興医学出版社, 2013. URL: <https://elib.maruzen.co.jp/elib/html/BookDetail/Id/3000026234/>.
- [37] 野村泰之. 前庭・平衡機能と重力適応. バイオメカニズム学会誌, Vol. 34, No. 1, pp. 17–22, 2010. doi:10.3951/sobim.34.17.
- [38] Christopher K. Zalewski. Aging of the human vestibular system. *Seminars in hearing*, Vol. 36 3, pp. 175–96, 2015.
- [39] Muhammad Abdullah, Minji Kim, Waseem Hassan, Yoshihiro Kuroda, and Seokhee Jeon. Hapticdrone: An encountered-type kinesthetic haptic interface with controllable force feedback: Initial example for 1d haptic feedback. In *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 115–117, New York, NY, USA, 2017. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3131785.3131821>, doi:10.1145/3131785.3131821.

- [40] Pascal Knierim, Thomas Kosch, Valentin Schwind, Markus Funk, Francisco Kiss, Stefan Schneegass, and Niels Henze. Tactile drones - providing immersive tactile feedback in virtual reality through quadcopters. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, pp. 433–436, New York, NY, USA, 2017. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3027063.3050426>, doi:10.1145/3027063.3050426.
- [41] Daiki Sato, Hironori Mitake, and Shoichi Hasegawa. Wearable cat tail device that can make s-shape using mesh tube and wires. pp. 386–389, 09 2015.
- [42] Spiber. URL: <https://www.spiber.jp/>.
- [43] 木崎健太郎. 「ヤモリの足」から生まれた最先端のテープ. URL: https://www.nikkei.com/article/DGXNASDD27050_X20C12A4000000/.
- [44] 千田益生. 人工筋肉とりハビリテーション医学. 岡山医学会雑誌, Vol. 124, No. 3, pp. 211–216, 2012. doi:10.4044/joma.124.211.
- [45] Naoaki KIMURA Nobuyoshi KUME and Koki TAKAHASHI. Is an evaluation of body sway with use of wii fit board useful for an effect measurement of judo therapy? *Journal of Tokyo Ariake University of Medical and Health Sciences*, Vol. 7, , 2015.
- [46] 茂樹横山, 昌平大城, 司松本, 光司高柳, 誠應松坂, 富太郎穂山. 足底部感覚が立位姿勢調整および歩行に及ぼす影響. 長崎大学医療技術短期大学部紀要, No. 6, pp. 127–129, mar 1993. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/120000911375/>.
- [47] 猪飼哲夫, 辰濃尚, 宮野佐年. 歩行能力とバランス機能の関係. リハビリテーション医学, Vol. 43, No. 12, pp. 828–833, 2006. doi:10.2490/jjrm1963.43.828.

- [48] 宗樹高田, 正起雨森, 康之松浦. アルコール摂取時における座位重心動揺に関する研究. 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌 = The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. C, A publication of Electronics, Information and Systems Society, Vol. 132, No. 10, pp. 1558–1562, oct 2012. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10031120098/>, doi:10.1541/ieejeiss.132.1558.
- [49] 鈴木哲, 平田淳也, 栗木鮎美, 富山農, 植田一輝, 小田佳奈枝, 高橋正弘, 渡邊進. 不安定面上座位における体幹筋活動と重心動揺との関係. 理学療法科学, Vol. 24, No. 1, pp. 115–119, 2009. doi:10.1589/rika.24.115.
- [50] 洋高橋, 直子中村. 弱視者における下腿三頭筋ストレッチ前後の重心動揺変化. 理学療法学 Supplement, Vol. 2007, pp. A0474–A0474, 2008. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/130005014807/>, doi:10.14900/cjpt.2007.0.A0474.0.
- [51] 茂井口, 吉英大島, 俊哉鶴崎, 裕之中野. 立位姿勢における重心動揺解析の一考察. 長崎大学医療技術短期大学部紀要, No. 3, pp. 103–105, mar 1990. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/120000911295/>.
- [52] 兵頭勇己, 2018. URL: <https://researchmap.jp/yhyohdoh/%E8%B3%87%E6%96%99%E5%85%AC%E9%96%8B/>.

関 連 発 表

国際学会

1. Junichi Nabeshima, Mhd Yamen Saraiji and Kouta Minamizawa, “ Prosthetic Tail: Artificial Anthropomorphic Tail for Extending Innate Body Functions ”, Augmented Human 2019, France, 2019.

国内学会

1. 鍋島 純一, MHD Yamen Saraiji and 南澤 孝太, “ Prosthetic Tail : 身体機能を補綴する拡張身体としての人工尾 ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2019.

展示

1. Junichi Nabeshima, Mhd Yamen Saraiji and Kouta Minamizawa, “ Artificial Prosthetic Tail for Augmentative and Full-body Haptic Feedback ”, World Haptics 2019 Design Showcase, 2019.
2. Junichi Nabeshima, Mhd Yamen Saraiji and Kouta Minamizawa, “ Arque: Artificial Biomimicry-Inspired Tail for Extending Innate Body Functions ”, SIGGRAPH 2019, America, 2019.

受賞

1. アジアデジタルアート大賞展 FUKUOKA 2019, 一般カテゴリーインタラクティブアート部門 優秀賞受賞.

メディア掲載

1. "A Wearable Robotic Tail Turns Anyone Into a Furry With Improved Balance", GIZMODO, 2019.08.05, <https://gizmodo.com/a-wearable-robotic-tail-turns-anyone-into-a-furry-with-1836974428>
2. "This robotic tail gives humans key abilities that evolution took away", MACH, 2019.08.13, <https://www.nbcnews.com/mach/science/robotic-tail-gives-humans-key-abilities-evolution-took-away-ncna1041431>
3. "Japanese researchers build robotic tail to keep elderly upright", Reuters, 2019.08.14, <https://www.reuters.com/article/us-japan-robotic-tail/japanese-researchers-build-robotic-tail-to-keep-elderly-upright-idUSKCN1V411X>
4. "人間が装着する「ロボットしっぽ」を開発中 一体何のため?慶応大の開発者に聞いた", FNNjp プライムオンライン, 2019年8月16日, <https://www.fnn.jp/posts/00047760HDK/201908161830-FNNjpeditorsroom-HDK>
5. "高齢者の転倒防止にしっぽ誕生", テレビ朝日, グッド!モーニング, 2019年8月23日放送
6. "孫悟空になれるかも?バランスを補助する尻尾型のウェアラブルロボット「Arque」", bouncy, 2019年8月29日, <https://bouncy.news/48844>
7. "「しっぽ」があってもいいんじゃないか」再生回数46万回 開発者に作ったわけを聞いてみた", 毎日放送, ミント!, 2019年9月5日放送, <https://www.mbs.jp/mint/news/2019/09/06/071974.shtml>

8. ”人にしっぽがあったら”，朝日小学生新聞，2019年10月1日発行
9. ”生物まねた尻尾で高齢者支援”，朝日中高生新聞，2019年10月27日発行

イベント登壇

1. Material Meetup TOKYO vol06 「先端材料とデザイン」，2019年10月30日，<https://mtrl.com/tokyo/event/material-meetup-tokyo-vol-6/>
2. SOFT ROBOTICS Collective 生命と機械の学校 vol02 「生き物から学ぶしっぽから考える これからのロボティクス Talk Session」，2020年1月26日，<https://mtrl.com/tokyo/event/tokyo/soft1-robotics-collective-vol-02>