

# 空気圧アクチュエータを用いた 頭部ハンガー反射回旋角度制御の試み

今悠気<sup>†1</sup> 中村拓人<sup>†1†2</sup> 梶本裕之<sup>†1</sup>

**概要:** ハンガー反射は、針金ハンガーを頭に被ると意図せず頭が回ってしまう現象である。これまでに直動アクチュエータを用いてハンガー反射を再現するデバイスが提案されているが、大型かつ重いため、HMDのようなウェアラブルなデバイスに内蔵するには適していなかった。本稿では、小型かつ軽量の空気圧アクチュエータを用いた頭部ハンガー反射再現デバイスを提案する。本デバイスは空気圧によって頭部への圧迫量を調整することで頭部の回旋角度が制御される。実験の結果、提示する圧迫量を変化させることでハンガー反射による頭部回旋角度を制御可能なことが確認された。

## Controlling Angle of Hanger Reflex using Pneumatic Actuator – Preliminary Trial

YUKI KON<sup>†1</sup> TAKUTO NAKAMURA<sup>†1†2</sup>  
HIROYUKI KAJIMOTO<sup>†1</sup>

**Abstract.** The Hanger Reflex is a phenomenon in which the head rotates unintentionally when force is applied via a wire hanger placed on the head. The Hanger Reflex control device using a linear actuator has been proposed. However, it cannot be embedded wearable devices such as head mounted display because it is large and heavy. In this paper, we propose the head-type Hanger Reflex control device using a compact and lightweight pneumatic actuator. The angle of the head is controlled by adjusting the pressure. Preliminary experiment suggested that it is possible to control angle of the head by adjusting pressure.

### 1. はじめに

従来、人の身体に対して力覚提示をするためには比較的大規模な装置が必要であった。これら大規模な力覚提示装置は大きな力を提示することが可能であったが、持ち運びやウェアラブルな環境で使用することは難しく、使用できる環境に制限があった。この問題を解決する手法として、近年では疑似力覚を用いてユーザに力覚提示する手法が多く提案されている[1][2][3][4][5][6][7]。これらは従来の大型な力覚提示装置と比べて小型であり、これらのような疑似力覚を用いた力覚提示装置の実現により、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)やスマートウォッチなどのウェアラブルデバイスに組み込み可能な力覚提示装置となると考えられる。

疑似力覚を提示する手法の一つとしてハンガー反射がある(図1)。これははじめに針金ハンガーを頭に被ると意図せず頭が回ってしまう現象として報告され[8]、近年では手首や腰、足首で類似の回旋現象の報告がされている[9]

[10]。また、力覚提示の方向も最初に発見されたYaw軸回旋方向の力覚提示に加えて、Pitch軸とRoll軸回旋方向の力覚と前後左右への並進方向の力覚の生起が報告されている[11]。ハンガー反射は楕円形の身体部位に対して互いに交わらない2点圧迫とその際に生じる皮膚変形によって生起することが報告されており[12]、直動アクチュエータを用いてYaw軸回旋方向のハンガー反射を再現するデバイスが提案されている[8][13]。しかし、提案されたハンガー反射再現デバイスは直動アクチュエータを用いているため大型かつ比較的重たいデバイスであり、ウェアラブルデバイスに組み込むためには小型なアクチュエータを用いた軽いデバイスが求められる。また、これまでのハンガー反射再現デバイスは回旋量を調整する機構は備わっていたが、実際に調整可能であるかどうかは調査されていなかった。

本稿では、将来的にHMDに組み込むことを目指し、小型軽量の空気圧アクチュエータを用いた頭部ハンガー反射再現デバイスについて報告する。また、開発したデバイスを用いて、空気圧アクチュエータが提示する圧迫量を変化

†1 電気通信大学  
The University of Electro-Communications

†2 日本学術振興会特別研究員  
JSPS Research Fellow

させることによる頭部回旋角度の変化についても報告する。



図 1 ハンガー反射の様子

Figure 1 The Hanger Reflex. He wore a wire hanger on his head.

Hanger Reflex occurred and his head rotated to the left.

## 2. 関連研究

### 2.1 ハンガー反射

ハンガー反射を再現するデバイスはこれまでいくつか提案されている。頭部と手首のハンガー反射に関して、4個の直動アクチュエータを用いてハンガー反射が効率的に生起する圧迫位置を圧迫することでハンガー反射を再現するデバイスが提案されている[8][13]。これらのデバイスはYaw軸回旋方向のハンガー反射の再現に成功しているが、直動アクチュエータを用いているため大型かつ重いデバイスとなっている。

腰のハンガー反射に関しては、直動アクチュエータを用いたハンガー反射再現デバイスの問題点であるサイズと重さを解決するために空気圧アクチュエータを用いたハンガー反射制御デバイスが提案されている[14]。このデバイスは空気圧アクチュエータを使用しているため直動アクチュエータと比較してデバイス本体が小型かつ軽量のデバイスとなっている。また、空気圧アクチュエータを独立に動かすことで、任意の組み合わせの圧迫とそれに伴って発生する皮膚変形を提示することが可能であるため、回旋方向のハンガー反射に加えて、前後左右への並進方向のハンガー反射の再現が可能である。

ハンガー反射を再現するためには、圧迫の提示とそれに伴って発生する皮膚変形が提示できることが求められるが、直動アクチュエータを用いた手法と比較して空気圧アクチュエータを用いた手法は小型かつ軽量の手法で実現できるため、HMDやスマートウォッチのようなウェアラブルデバイスにハンガー反射による力覚提示及び運動提示を付与するために好適であると考えられる。

ハンガー反射を力覚提示装置として用いるためには角度調整機能が必要であると考えられる。しかし、従来報告されてきたハンガー反射再現デバイスは回旋角度の制御は機構的には可能であったと考えられるが、実際に回旋角度の調整が可能であったかどうかに関しては報告されていない。

### 2.2 力覚提示内蔵型 HMD

力覚提示を内蔵した HMD としてフライホイールを用いたジャイロ機構による衝突感を提示する手法[15]が提案

されている。これは HMD に力覚提示を内蔵するという点で新しい体験を提案するものであるが、ジャイロ機構に使用しているフライホイールが非常に重い、比較的応答性が悪い、提示力覚が衝突感のみ、ユーザが静止した状態では力覚提示できないという問題点があり、使用できるコンテンツと場面に制限があると考えられる。

これを解決するためには、小型軽量の機構による応答性が高い力覚提示を用いた、複数の種類の力覚提示が可能な機構が求められる。

## 3. 提案デバイス

今回我々は将来的に HMD に内蔵することを目的として、空気圧アクチュエータを用いた頭部ハンガー反射再現デバイスを製作した。

提案デバイスは4つの空気圧アクチュエータを用いて、頭部ハンガー反射が効率的に発生する圧迫位置と報告されている位置に圧迫を提示し、外側のフレームによる変形と弾性によって皮膚変形を提示するものである(図2左上)。空気圧アクチュエータはそれぞれ真空ポンプ(R-14 A221, MITSUMI社)とソレノイドバルブ(SC415GF 6.0V, SEJOMOTION社)によって駆動され、気圧センサ(MIS2503-015G, Metrodyne Microsystem社)によって空気圧アクチュエータ内の気圧を計測する(図2右上)。これらはマイクロコントローラ(mbed1768, NXP社)により制御する。外側のフレームとして、ハンガー反射誘発装置の特許をベースに開発された一般医療機器非能動型簡易牽引装置ラクビ(製造販売:株式会社TSS, 以下ラクビと表記)[16]を用いており、ベルクロによるサイズ調整が可能な機構となっている。

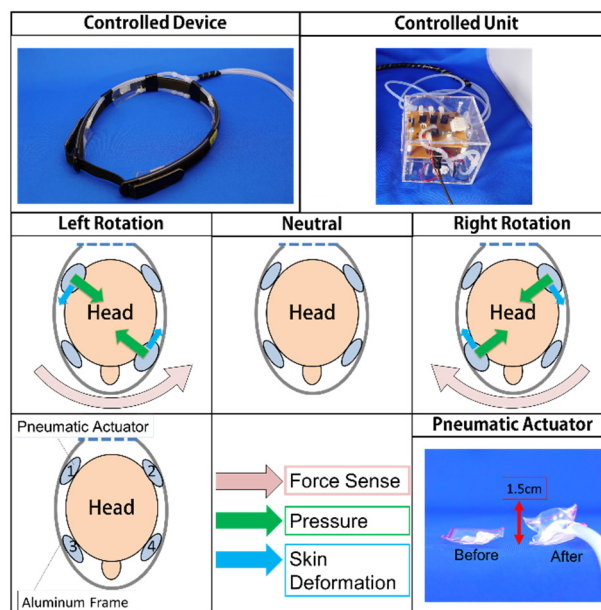


図 2 提案デバイス概要

Figure 2 Control of the head-type Hanger Reflex device.

本デバイスが提示する空気圧アクチュエータによる圧迫

と皮膚変形とハンガー反射による力覚の関係を示した(図2中段及び下段左・中央)。4つの空気圧アクチュエータを右前方と左後方,左前方と右後方の組み合わせで駆動させ,皮膚への圧迫及び皮膚の変形を生じさせる,これらによって矢印方向の力覚が生じることを期待している。

空気圧アクチュエータは縦2.6cm,横5.6cmであり,最大変位が約1.5cmである(図2右下)。今回の実験において5種類の気圧センサ値(1058hpa, 1097hpa, 1135hpa, 1174hpa, 1213hpa)まで駆動する場合,空気圧アクチュエータ2つを1つのポンプで駆動すると,駆動時間は図3のようになる。1.2秒程度で最大値に達しており,ハンガー反射による頭部回旋が比較的遅い運動であることを考えると十分な応答性を持っていると言える。

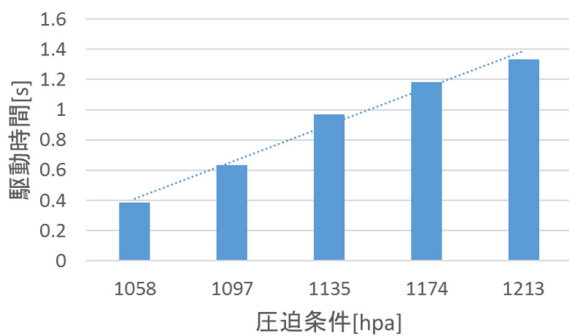


図3 負荷の無い状態での駆動時間

Figure 3 Response of pneumatic actuator.

## 4. 実験

### 4.1 実験概要

提案デバイスを用いて,空気圧アクチュエータからの圧迫調整による頭部ハンガー反射の回旋運動制御を試みる実験を行った。本実験では,異なる複数の種類の圧迫を提示した際の頭部の角度を計測した。4つのアクチュエータを提案デバイスのように配置することで左右のハンガー反射を再現できることは先行研究で確認されており,空気圧アクチュエータを用いた提案デバイスにおいても予備実験で確認した。そのため,本実験では空気圧アクチュエータを2つのみ使用し,提示するハンガー反射の向きは左回旋のみを提示した。

### 4.2 実験条件

#### 4.2.1 圧迫提示

本実験では,異なる5種類の圧迫を空気圧アクチュエータによって提示した。使用した5種類の圧迫は1058hpa, 1097hpa, 1135hpa, 1174hpa, 1213hpaである。これらの圧迫提示条件は,実験従事者がハンガー反射を知覚可能な最小値,及び実験従事者の頭部が限界まで回旋したと知覚した最大値に基づき設定した。

真空ポンプにより駆動された空気圧アクチュエータは空気の流入により膨張し,頭部に接触する。この際に,装着者に提示される力[N]は空気圧アクチュエータと頭部の接

触面積によって変化する。ただし,提案デバイスの構成では空気圧アクチュエータと頭部との接触面積の検出が行えないため,今回は気圧センサによるセンサ値を用いて圧迫提示を行う。

圧迫条件は被験者毎にランダムに順序を決定し,同じ順序で圧迫提示を行わないように配慮した。

### 4.3 実験手続き

被験者は男性10名,女性2名の合計12名(21歳~25歳)であった。被験者は提案デバイスを装着し,座面が回転しない椅子に座った状態で実験を行った。提案デバイスの装着に際して,実験従事者によってラクビのサイズ調整を行った。実験開始前に,提示する圧迫条件の内,1058hpa・1135hpa・1213hpaの圧迫条件を提示し,提案デバイスによる頭部圧迫に慣れてもらった。

各試行中では閉眼するように被験者に指示をした。さらに,力あるいは運動を知覚した場合には抗わずに自然な状態であるように被験者に指示をした。各試行終了後に頭部を正面に戻すように指示した。

デジタル分度器を用いて被験者の頭上より計測を行い,被験者の正中線を0度とし,被験者の鼻の頂点までの角度を計測した。

実験従事者は各試行が終わる度に被験者に対して,知覚した頭部の回旋運動について質問し,左回旋・回旋無し・右回旋,の中から一つを回答させた。また,同様にして,知覚した頭部の回旋力について質問し,左回旋・回旋無し・右回旋の中から一つを回答させた。

### 4.4 実験結果

図4は全被験者の実験結果を平均したものである。縦軸は頭部角度[degree],横軸は圧迫条件を示している。エラーバーは標準偏差を示す。また,線形近似したものをグラフ内に示した。図4により,提示圧迫の増加に伴って頭部の回旋量が増加する傾向が確認できる。

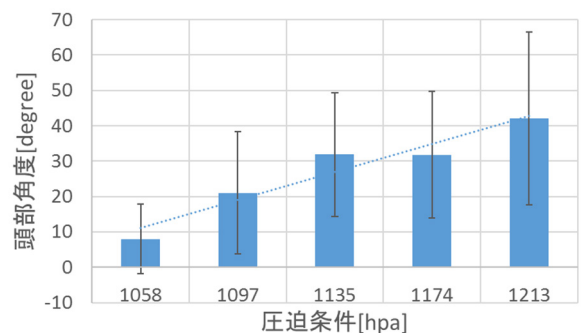


図4 平均化した実験結果

Figure 4 Head angle under each pressure condition.

図5は各被験者における圧迫条件毎の頭部角度を示している。縦軸は頭部角度[degree],横軸は圧迫条件を示している。また,線形近似したものをグラフ内に示した。各提示条件の上のアルファベットは被験者が知覚した運動の向きと力の向きを示しており,一つ目の文字が運動の向き,

二つ目の文字が力の向きである。Nは回旋無し、Lは左回旋を示す。図5より、User07を除く全ての被験者において頭部回旋運動の生起が確認できる。さらにほぼ全ての被験者において提示圧迫の増加に伴って頭部の回旋量が増加する傾向が確認できる。

#### 4.5 考察

##### 4.5.1 実験結果に関して

図5より、提案デバイスによる頭部回旋運動の生起が確認されたが、被験者間の個人差が確認された。例えばUser01とUser05の最大頭部回旋角度の差は約31度であった。

一部の被験者では提示した圧迫条件が最大値では無いにも関わらず計測された頭部回旋角度がピーク値となる現象が確認された(例: User03, User05の提示圧迫 1135hpa)。また、一部の被験者ではある圧迫条件を提示した際に他の圧迫条件の頭部回旋角度と比べて明らかに小さい頭部回旋

角度が確認された(例: User2, User8の提示圧迫 1135hpa)。これらに関して、実験終了後の被験者のコメントとして「強い圧迫を感じた時に大きく回旋運動しない時があった」「弱い圧迫でも大きく頭が回る感じがした」というコメントがあった。これらに関して調査するために今後は、空気圧アクチュエータの位置と頭部形状の関係性の調査、頭部とデバイスの位置・角度関係、皮膚変形に関して定性的・定量的な調査を行っていく。

##### 4.5.2 HMDへの力覚提示機能の付与

実験結果より、提案デバイスによるハンガー反射の生起の確認、及び頭部角度の制御の可能性が示された。これによりHMDに本機構を内蔵した場合、HMDの映像提示に合わせてユーザの頭部に対して回旋方向の力提示ができるということを示している。例えばHMDに映るキャラクターに頭を回されるような場面のときに適切な力覚提示がで

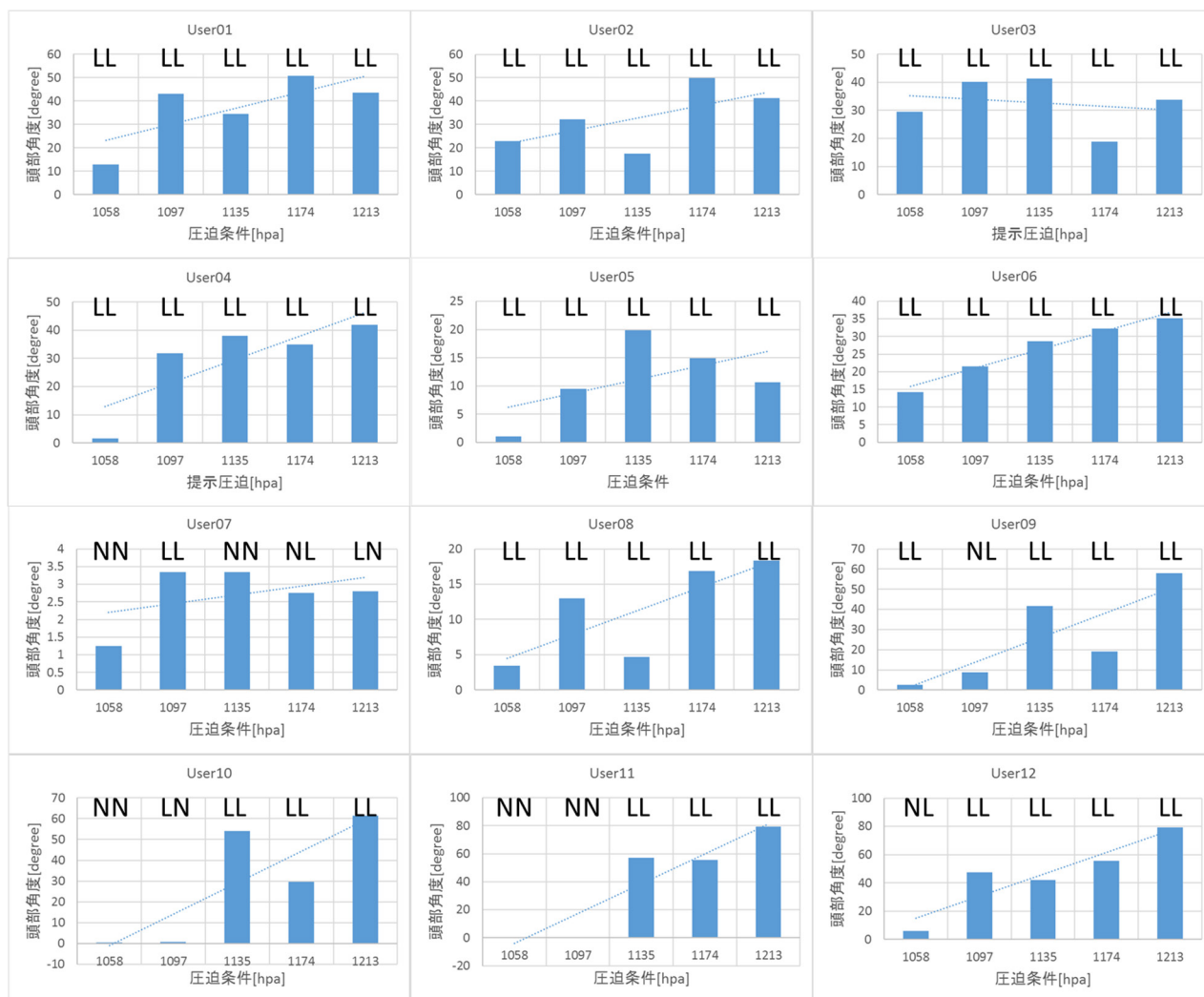


図5 全被験者の実験結果

Figure 5 Experimental results of all participants.

(各条件の上の2つの記号は1つ目が知覚した運動、2つ目が知覚した力の向きを示している。Lは左回旋、Nは回旋無しを示す)

きるということである。あるいは、HMDを使用したゲームにおいて、見せたくない方向がある時、逆方向にハンガー反射を提示することで見にくくすることができると思われる。

本実験で扱わなかった提案デバイスが有すると考えられる可能性について述べる。第一に、空気圧アクチュエータを単独で駆動させることでその方向からの圧迫を提示することが可能である。これは物と衝突するようなコンテンツに対して好適な力覚提示であると考えられる。第二に、ポンプとバルブを段階的に駆動させることで空気圧アクチュエータを介して一種の振動を提示することも可能であると考えられる。これは車のような振動する乗り物に乗るようなコンテンツにおいて走行時の振動を提示することが可能であると考えられる。第三に、ポンプで空気を入れることで力覚を提示するのではなく、すでに提示されている力覚をバルブで空気を抜くことで、負荷としての力覚が減少し身体的に楽となったと感じられる可能であると考えられる。これはコンテンツで緊張感を出したい場面や逆にリラックスをさせたい場面で使用できると考えられる。第四に4つの空気圧アクチュエータを全部駆動し、単純に頭部を締め付けるような圧迫を提示することが可能であると考えられる。これは頭部を締め付けられるような場面、例えば孫悟空が緊縮児で頭を締め付けられる体験をするコンテンツや、ヘルメットや帽子を被る場面などで使用できると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、従来大型かつ重い直動アクチュエータを用いて再現されていた頭部ハンガー反射を小型軽量化することを目的として、一般医療機器非能動型簡易牽引装置ラクビと空気圧アクチュエータを組み合わせた小型軽量の頭部ハンガー反射再現デバイスを提案した。提案デバイスでは空気圧アクチュエータによって提示される頭部への圧迫量を調整することで頭部の回旋角度を制御するアプローチを採用し、実験の結果、頭部ハンガー反射再現デバイスによって頭部ハンガー反射による頭部回旋運動の生起を確認した。さらに、提示する圧迫量を変化させることで頭部回旋角度を制御可能なことが確認された。

今後は本提案装置をHMDに内蔵し、実際のコンテンツとハンガー反射による擬似力覚とを組み合わせた際の没入感や違和感等の評価や、こういったコンテンツがハンガー反射との組み合わせに適するののかという調査を行っていく。さらに、Yaw軸以外にもPitch軸とRoll軸の回旋及び前後左右の並進方向のハンガー反射の再現と制御も行っていく。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 15K12079 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] T. Tanabe, H. Yano, H. Iwata: Proposal and Implementation of Non-Grounded Translational Force and Torque Display Using Two Vibration Speakers, AsiaHaptics, 2016.
- [2] T. Amemiya, H. Gomi: Distinct Pseudo-Attention Force Sensation by a Thumb-Sized Vibrator that Oscillates Asymmetrically, EuroHaptics, pp.88–95, 2014.
- [3] J. Rekimoto: Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation, Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 427–432, 2013.
- [4] Y. Imamura, H. Arakawa, S. Kamuro, K. Minaizawa, S. Tachi: HAPMAP -haptic walking navigation system with support by the sense of handrail, ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, Article No.6, 2011.
- [5] A. J. Spiders, A. M. Dollar: Outdoor Pedestrian Navigation Assistance with a Shape-Changing Haptic Interface and Comparison with a Vibrotactile Device, Haptics Symposium, 2016.
- [6] Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, H. Kajimoto: Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin, Augmented Human International Conference, Article No.16, 2012.
- [7] Yem, V., Kuzuoka, H., Yamashita, N., Ohta, S., Takeuchi, Y.: Hand-Skill Learning using Outer-Covering Haptic Display, EuroHaptics, pp. 201–207, 2014.
- [8] 佐藤未知, 松江里佳, 橋本悠希, 梶本裕之: ハンガー反射—頭部圧迫による頭部回旋反応の条件特定と再現—, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.2, pp. 295–301, 2014.
- [9] T. Nakamura, T. Nishimura, M. Sato, H. Kajimoto: Application of Hanger Reflex to wrist and waist, IEEE VR, pp. 181–182, 2014.
- [10] Y. Kon, T. Nakamura, M. Sato, H. Kajimoto: Effect of Hanger Reflex on Walking, Haptics Symposium, pp.313–318, 2016.
- [11] Y. Kon, T. Nakamura, M. Sato, T. Asahi, H. Kajimoto: Hanger Reflex of the Head and Waist with Translational and Rotational Force Perception, AsiaHaptics, 2016.
- [12] 佐藤未知, 中村拓人, 梶本裕之: ハンガー反射における皮膚せん断変形による触錯覚と運動誘発, 第5回レイグジスタンス研究会, 2014.
- [13] T. Nakamura, N. Nishimura, M. Sato, H. Kajimoto: Development of Wrist-Twisting Haptic Display Using the Hanger Reflex, ACE, Article No.47, 2014.
- [14] 今悠気, 中村拓人, 梶本裕之: ハンガー反射を用いた腰部への回旋・並進力提示デバイス, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2016.
- [15] GyroVR: Simulating Inertia in Virtual Reality using Head Worn Flywheels, UIST2016, 2016.
- [16] 一般医療機器 非能動型簡易型牽引装置 ラクビ . 2015: 35519001.