

新規な外乱環境下での予測的姿勢制御活動の学習機構

進矢 正宏

広島大学大学院総合科学研究科

1. 背景

サッカーのシュートや野球の打撃など、我々を魅了するアスリートの四肢の運動は、先行して無意識的に行われる予測的姿勢制御活動（Anticipatory postural adjustment = APA）に支えられている。アスリートは様々に変化する環境下で、適切な APA を行うことが求められる。APA には、その後に行われる自らの運動が引き起こす外乱を予測して、それを予め補償するという役割がある(Maki, 1993)。APA のパラメータ、すなわち、姿勢制御の大きさや方向は、その後の運動に応じて合目的的にかつ適切に制御されるということが知られており、その後の運動の種類や大きさや方向、あるいは反応時間課題か否か、タスクのゴールとして何に重きを置くか、などといったパラメータの影響を受けるということが明らかとなっている (Mohapatra & Aruin, 2013; Phanthanourak, Cleworth, Adkin, Carpenter, & Tokuno, 2016; Schmidt & Lee, 2011)。これらの知見は、APA のパラメータを合目的にするためにアップデートをするという、何らかの学習機構の存在を示唆している。しかしながら、これまでのところ、APA の学習や適応が、どのような情報を用いてどのようなメカニズムで行われているかは明らかになっていない。

運動のパラメータを修正・適応させるような学習機構は、マニピュランダムやペンタブレットを用いた腕リーチング課題によって数多くの研究がなされてきた。腕リーチング課題ではしばしば、運動学習の過程の研究するために、視覚運動外乱や力場学習課題といった実験パラダイムが用いられる。視覚運動外乱は、実際の運動とその運動に対する視覚フィードバックとの対応関係を、実験者が恣意的に操作するというもので(J W Krakauer, Pine, Ghilardi, & Ghez, 2000; John W. Krakauer, Ghilardi, & Ghez, 1999)、力場学習課題は、コリオリ力やロボットコントロールされたマニピュランダムを通して、被験者のリーチング運動をする腕に対して物理的な外乱を加えるという方法である(Lackner & Dizio, 1998; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994)。これらの研究手法において重要な点は、被験者にとってこれらの外乱が、これまでに体験したことのない新規な外乱であるということである。新規な外乱に曝露された被験者は、当初はその外乱により大きな運動誤差を生じるが、試行を重ねるにつれ誤差を修正することができる。そして、十分に学習した後に外乱のないもとの環境に戻された際には、外乱に曝露された当初の誤差とは逆方向の誤差を生じてしまう。これは後効果 (after effect) として知られている。このような新規な外乱環境への学習と、それに伴う後効果は、能動的な運動コマンドの生成を伴わない受動的な運動の場合には生じないことが明らかとなっており (Held & Freedman, 1963)、自身の運動計画とそれに伴う感覚情報予測と実際の感覚入力との差、すなわち感覚予測誤差、によって運動学習が進むということが示唆されている。

そこで本研究では、APA の学習メカニズムを明らかにするために、これまでに体験したこと

ない新規な外乱としてジャイロ式の外乱装置を製作し、外乱に対する適応と後効果を観察することにより、APA の学習過程を定量することを目的とした。

2. 方法

2. 1. 外乱装置の開発

これまでに体験したことのない外乱環境を構築するために、広島大学ものづくりセンターに依頼し、樹脂製のカバーの内部でフライホイールが回転するという外乱装置の開発を行った(図1)。フライホイールを回転させることによって、錘に角運動量を発生させることができる。被験者が錘を持ち上げる際に、フライホイールの回転軸の向きが変化すれば、角運動量保存則に従い、外乱トルクが生じることとなる。



図1. ジャイロ式外乱装置としての錘。左図：錘と DC 電源。右図：樹脂製のカバーの内部にはフライホイールが入っており、これを DC モーターで回転させることにより角運動量を生じさせ、錘を持ち上げる際に回転軸の向きが変化するのに伴い、角運動量保存則に従って新規な姿勢外乱を引き起こす。

フライホイールの回転数は、DC モーターに印加する電圧によって制御した。DC モーターへの印加電圧を 4V から 1V ごとに 9V まで変化させて、外乱装置のフライホイールを回転させ、ロータリーエンコーダーの Z 相出力をオシロスコープを用いて観察することにより、それぞれの印加電圧に対応するフライホイールの回転数を確認した。以下に Z 相確認結果を示す。

表 1. モーターへの印加電圧に対応するフライホイールの回転数。

表中の回転数[rpm]は Z 相出力間隔を回転数に換算し、少数第 1 位で四捨五入したもの。

印加電圧[V]		DC4V	DC5V	DC6V	DC7V	DC8V	DC9V
周期	[ms]	104.0	81.20	66.40	56.80	48.80	43.20
回転数	[rpm]	577	739	904	1056	1230	1389

印加電圧を x 、回転数を y として一次関数によりフィッティングを行った結果、 $y = 162x - 73$ により、 $R^2 = 0.9998$ と高い線形性が観察された。外乱装置は、フライホイールやその回転軸および樹脂製のカバー等を含めて 2.4 kg の重さとなった。本実験では、外乱として、DC9V を印加したものをを用いた。

2. 2. 実験概要

被験者は健康成人男性 2 名とした。初期姿勢は足を肩幅に広げ両足で立ち、錘を持った両手を前方に下した状態とした。1 秒間隔で鳴るメトロノームの音を頼りに、1 秒間で腕を水平まで挙上し、次の 1 秒間で再び初期姿勢に戻るよう教示した。その際、錘内部のフライホイールの回転軸は、腕の向きと同様に、下向きから水平前向きに変化した。フライホイールの回転軸の変化に伴い、被験者の腕には、錘を挙上する際には水平面で時計回り（上からみた時の右回転）に、錘を下垂する際には反時計回りの外乱が与えられる。被験者には、錘を挙上・下垂する際に、できるだけ錘が正中線上を移動するようにしてください、との教示を与えた。

フライホイールが回転していない状態での錘の上げ下ろしを、10 回程度練習した後に、実験試技に移った。実験の最初の 12 試行はフライホイールが回転していない baseline 条件、13 試行目から 48 試行目まではフライホイールが回転している adaptation 条件、51 試行目から 60 試行目までは再びフライホイールが回転していない washout 条件とした。Adaptation 条件のうち、特に最初の 3 試行（13～15 試行目）を early adaptation 試行、31～40 試行目を mid adaptation 試行、41～50 試行目を late adaptation 試行と定義した。

被験者の体表面の解剖学的特徴点、および錘の左右面に赤外線反射マーカーを貼付し、8 台のカメラ（Miquis M3 カメラ、Qualisys 社製）によって 250Hz で撮影し、モーションキャプチャーを行った。2 台のフォースプレート（Bertec 社製）を用いて、両足からの床反力およびモーメントを記録した。無線表面筋電図測定装置（Cometa 社製）を用いて両側の前脛骨筋・ヒラメ筋・腓腹筋・中殿筋・脊柱起立筋・僧帽筋・三角筋の合計 16 筋から、表面筋電図を記録した。フォースプレートおよび筋電図の信号は 1000Hz で記録した。

2. 4. 分析

各マーカーの3次元座標データは、カットオフ周波数 10Hz の4次のバターワースデジタルフィルタによって平滑化された。錘の左右に貼付したマーカーの平均位置を錘の位置とし、錘の鉛直方向の速度を計算した。錘の鉛直方向の速度がピーク値の3%に達した瞬間、挙上に伴う正のピーク値をとった瞬間、正から負に移り変わった瞬間、下垂に伴って負のピーク値をとった瞬間、およびその後再び下向き速度がピーク値の3%未満となった瞬間を、それぞれ、挙上開始・挙上速度ピーク・腕最高到達・下垂速度ピーク・下垂終了時刻と定義した。

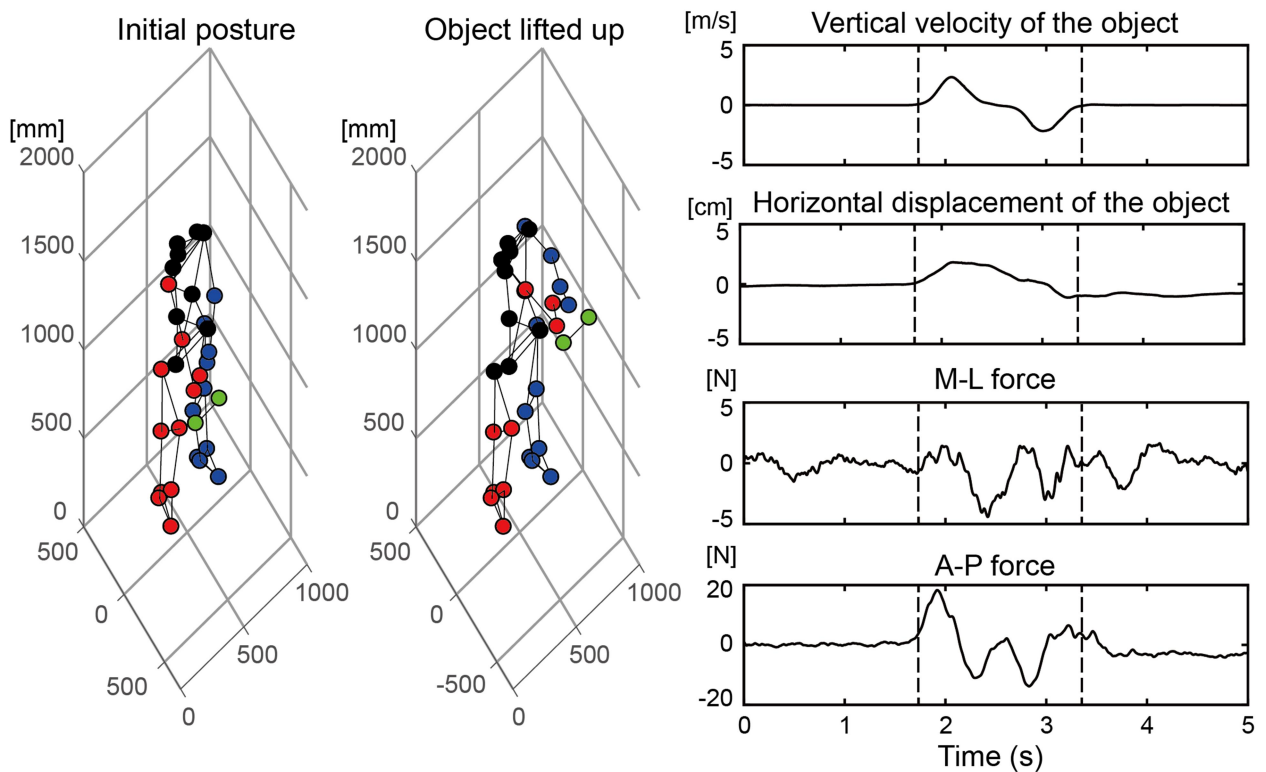


図2. モーションキャプチャーおよび床反力の典型例。

左図：初期姿勢と錘を持ち上げた時の姿勢。被験者の解剖学的特徴点（体幹・頭部：黒、右半身：赤、左半身：青）および錘（緑）に貼付したマーカーの位置を計測することにより、被験者の姿勢制御を測定した。右図：錘の位置・速度、並びに、床反力の左右成分・前後成分。錘が鉛直方向へ動き出した瞬間、および鉛直方向の動きを止めた瞬間を以て、動作の開始および終了を定義した（縦点線）。また、錘の挙上・下垂に伴い、床反力の水平成分が観察されている。

床反力のデータは、ゼロ値のオフセットを取り除いたあと、カットオフ周波数 20Hz の 4 次のバターワースデジタルフィルタによって平滑化された。床反力の左右成分 (M-L) と前後成分 (A-P) それぞれに対して、腕挙上開始のタイミングを基準に時系列を揃え、baseline 試行・mid adaptation 試行・late adaptation 試行の平均波形を算出した。Baseline, early adaptation, mid adaptation, late adaptation, washout の各試行の波形を重ね合わせた結果、腕最高到達時刻から下垂速度ピーク時刻にかけて、条件間の差が観察されたため (図 3)、挙上速度ピーク・腕最高到達・下垂速度ピークのそれぞれの時刻における左右成分および前後成分の床反力をもって、学習量の定量化を行った。

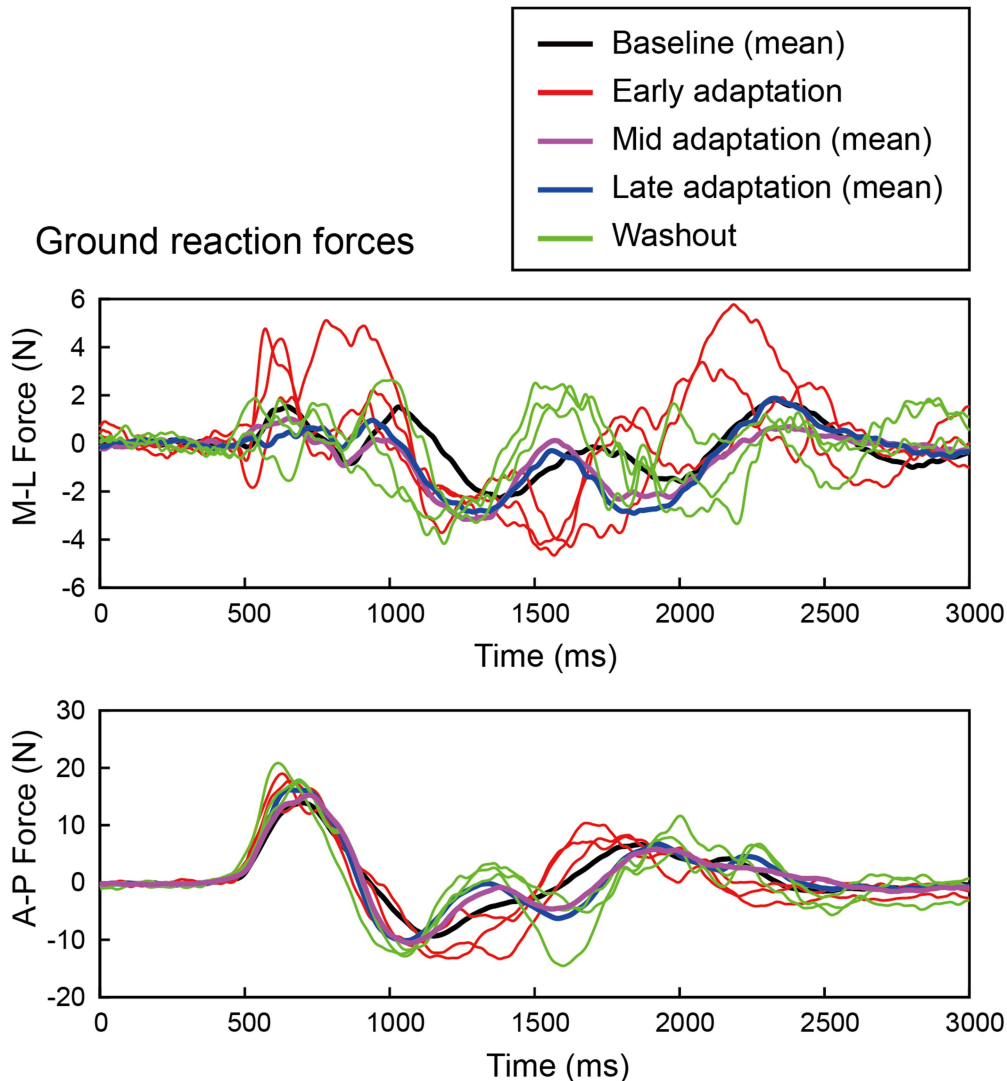


図 3. 外乱を加えた際の床反力データ。

上図：床反力左右方向成分。下図：床反力前後方向成分。フライホイールを回転させていない Baseline 試行 (黒線) の波形に対して、外乱が与えられたばかりの Early adaptation 試行 (赤線、3 試行分) では、外乱によって左右方向・前後方向ともに床反力データに乱れが観察される。外乱試行に対する学習が進むにつれ、Mid adaptation や Late adaptation では、Baseline に近い床反力波形が観察される。学習後にフライホイールの回転を再び止めた Washout の初期の試行では、Adaptation 試行で見せた適応分が加えられたような波形が観察される。これらの結果は、新規な外乱に対して、運動学習が行われたことを示している。

3. 結果

図 3 にタスク実行時の床反力波形を示した。錘の中のフライホイールを回転させていない Baseline 試行（黒線）の波形に対して、外乱が与えられたばかりの Early adaptation 試行（赤線、3 試行分）では、外乱によって左右方向・前後方向ともに床反力データに乱れが観察された。外乱試行を重ねるにつれ、Mid adaptation や Late adaptation では、Baseline に近い床反力波形が観察されている。このことは、角運動量による外乱を補償するような力を発揮する学習が行われたことを示唆している。さらに、フライホイールの回転を再び止めた Washout 試行では、Adaptation 試行で見せた適応分が加えられたような波形が観察された。これらの結果は、新規な外乱に対して、baseline 時と同様の運動を行うために、床反力を調整するような運動学習が行われたことを示している。

床反力の学習を定量するために、挙上速度ピーク・腕最高到達・下垂速度ピークのそれぞれの時刻における左右成分および前後成分の床反力を、学習段階ごとに計算した（図 4）。たとえば、挙上速度ピーク時の左右成分（左上）では、外乱が加えられない baseline の試行では 0 N 程度だったものが、外乱を与えられることで early adaptation では、-4 N 程度の値をとるようになっている。その後学習が進んだ mid adaptation や late adaptation では、再び 0 N 程度となっている。再び外乱が与えられない washout の 1 試行目では、約 2 N の値を示しており、挙上ピーク時に右向きの床反力を得るような学習がされていた、ということを示している。同様に、挙上ピーク時には後ろ向きの、腕最高到達時には左向きの床反力を得るような学習が観察された。

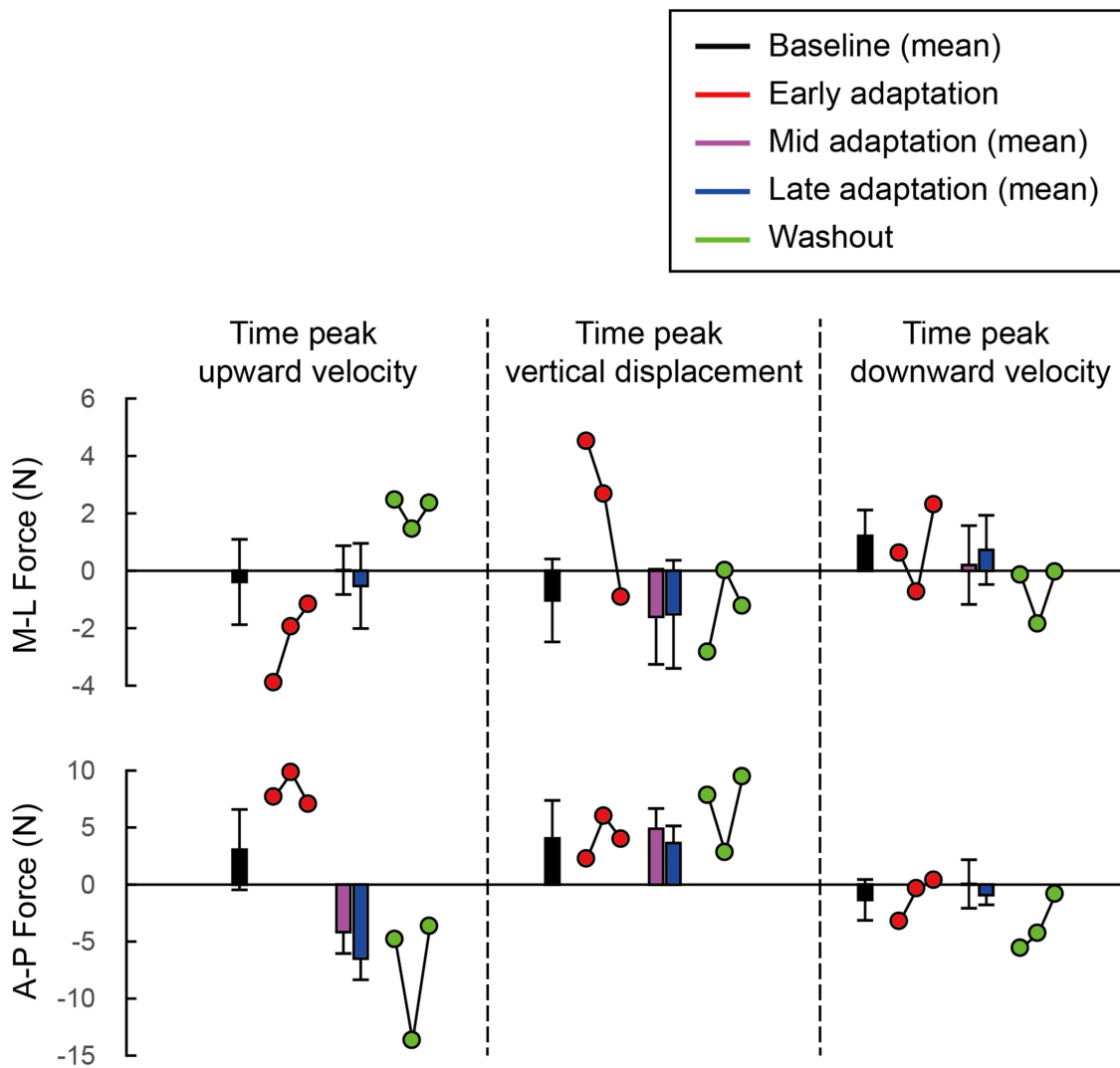


図4. 外乱に対する適応。

挙上速度ピーク・腕最高到達・下垂速度ピークのそれぞれの時刻における左右成分および前後成分の床反力を、学習段階ごとに示している。たとえば、挙上速度ピーク時の左右成分（左上）では、外乱が加えられないbaselineの試行では0 N程度だったものが、外乱を与えられることでearly adaptationでは、-4 N程度の値をとるようになっている。その後学習が進んだmid adaptationやlate adaptationでは、再び0 N程度となっている。再び外乱が与えられないwashoutの試行では、プラスの値を示しており、挙上ピーク時に右向きの床反力を得るような学習がされていた、ということを示している。同様に、挙上ピーク時の前後成分、腕最高到達時の左右成分でも学習が観察されていることが分かる。

4. 考察

本研究では、APA の学習機構を明らかにするためのデバイスとして、ジャイロ式の外乱装置の開発を行った。この 2.3 kg の錘状の外乱装置の内部では、約 1.0 kg のフライホイールが高速回転しており、腕の挙上に伴いその回転軸の向きが変化すれば、角運動量保存則に従ってこれまでに経験したことがないような外乱を受けることになる。具体的には、本研究で用いたタスクでは、被験者は腕を前方に挙上する際に右回転、下垂する際には左回転の外乱を受けた。本研究では、挙上および挙上から下垂に切り替わる局面で、外乱を経験するに従って床反力の値が変化しており、また、フライホイールの回転を止めた試行では後効果がみられたことから、新規な外乱に対して学習が行われたことが示された。

通常、主動作を腕挙上としたときの APA は、腕を上げる前のタイミングでの何らかの姿勢制御活動と定義される。しかしながら、腕を挙上する前のタイミングでは、足圧中心・床反力・筋電図のデータには運動学習の兆候を観察することはできなかった。腕を動かしている途中の床反力の制御は、その瞬間の腕運動に関連する主動作であるという見方も、その次の瞬間の腕運動に先行した姿勢制御活動であるという見方も可能である。したがって、今回観察された運動学習は、姿勢制御活動であることは間違いないが、当初の研究計画で研究対象とする予定であった予測的姿勢制御 (APA) であるとは言えない。腕挙上前に APA が見られなかった原因として、外乱の大きさが小さかったことが考えられる。腕運動中に床反力データに観察された学習量は、2~5 N といった大きさであり、制御対象である全身の質量から考えると、 0.01 m/s^2 程度しか加速度を生じないという、決して大きな力ではなかった。APA の役割は、事前に予測される外乱をあらかじめ補償するというものであるから、転倒やふらつきを生じない程度の外乱であれば、特に事前に補償する必要もなく、そのことが腕挙上前に姿勢制御が行われなかった原因であった可能性が考えられる。今後、より大きな外乱を与えることが可能なデバイスを用いるか、あるいは、片足立ちのように不安定な姿勢課題を課すことで比較的小さな力でも脅威となるような状況を作るといった工夫が必要だろう。

外乱装置の開発における課題としては、2.3 kg とデバイス自体の質量が重くなってしまったことや、外側に飛び出たハンドルを持つという機構を採用したために、錘を持った際に手首に大きなモーメントがかかってしまうことから、被験者の負担が比較的大きくなってしまったことが挙げられる。腕リーチング課題を用いた運動学習研究では、学習に数百試行を費やすようなプロトコルがしばしば用いられる。そのような研究の知見を活かして姿勢制御の学習機構を研究しようとした際に、疲労のため今回開発した装置では同様なプロトコルを用いることができなかった。腕挙上課題は、APA を研究する際にしばしば用いられる主動作ではあるが、今後は、腕挙上にこだわらず、大きな外乱を与えることは可能だが小さくて軽いデバイスを開発する必要があるかもしれない。

5. 参考文献

- Held, R., & Freedman, S. J. (1963). Plasticity in human sensorimotor control. *Science (New York, N. Y.)*, *142*(3591), 455-62. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14064442>
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M.-F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature Neuroscience*, *2*(11), 1026-1031. <http://doi.org/10.1038/14826>
- Krakauer, J. W., Pine, Z. M., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (2000). Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *20*(23), 8916-24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11102502>
- Lackner, J. R., & Dizio, P. (1998). Movements Adaptation to Coriolis Force Perturbations of Reaching Gravitoinertial Force Background Level Affects Gravitoinertial Force Background Level Affects Adaptation to Coriolis Force Perturbations of Reaching Movements. *J Neurophysiol Journal of Neurophysiology by Guest On*, *80*, 546-553. <http://doi.org/10.1016/j.cuor.2005.09.003>
- Maki, B. E. (1993). Biomechanical approach to quantifying anticipatory postural adjustments in the elderly. *Medical & Biological Engineering & Computing*, *31*(4), 355-62. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8231297>
- Mohapatra, S., & Aruin, A. S. (2013). Static and dynamic visual cues in feed-forward postural control. *Experimental Brain Research*, *224*(1), 25-34. <http://doi.org/10.1007/s00221-012-3286-2>
- Phanthourak, A. L., Cleworth, T. W., Adkin, A. L., Carpenter, M. G., & Tokuno, C. D. (2016). The threat of a support surface translation affects anticipatory postural control. *Gait and Posture*, *50*. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.031>
- Schmidt, R. a., & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning: A behavioral emphasis (5th ed.)*. Human Kinetics Pub.
- Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. a. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, *14*(5), 3208-3224. <http://doi.org/8182467>