

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：10107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06131

研究課題名(和文)非負値行列因子分解による姿勢制御メカニズム解明のためのヒトの感覚統合モデルの構築

研究課題名(英文)Construction of Multi-sensory Integration Model of human postural control by Non-negative Matrix Factorization

研究代表者

千葉 龍介 (Chiba, Ryosuke)

旭川医科大学・医学部・准教授

研究者番号：80396936

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、数理モデルによりヒトの感覚統合を調べることが目的であった。特に従来提唱されている線形和モデルが複数の感覚変容時に筋活動においても適用可能であるかを調べた。その結果、感覚変容による姿勢変容は従来研究の通りであっても、筋活動は各感覚の線形和とならないこと、再重み付けも他の感覚を単純に強化するわけではないことがわかった。定性的な分析から次の事柄が考えられる。視覚による位置補正は大きい。閉眼によって再重み付けが起きる。他の感覚の変容は再重み付けを起こさない可能性がある。未知の感覚や感覚同士の齟齬に対し、全身のstiffnessを向上させることで対応しようとした可能性がある。

研究成果の概要(英文)：To investigate multisensory integration in postural control of humans, we tried to verify proposed models of integration of multisensory inputs which alterations induce postural alterations. From the results of the experiments, we observed valid alterations of posture by the manipulations of the sensations physiologically. However, we found that the muscle activities are not linear summations for each activity of sensory input and could not be explained simply by a reweighting model. As a qualitative analysis, we found out that 1) vision has large weight in postural control, 2) reweighting would be caused by closing eyes, 3) reweighting would not be caused by alterations of other sensations and 4) humans would increase of body stiffness for unknown sensory inputs or discrepancy between sensory inputs.

研究分野：人間医工学

キーワード：姿勢制御

1. 研究開始当初の背景

本国における高齢化によって、脳神経疾患や運動器疾患に伴う適応的運動機能障害が急増している。これは、転倒・転落による不慮の事故死が高齢者に極めて多いことにも反映されている。これは日常運動の基本とも言える姿勢維持運動の異常も一因であるとされている。姿勢維持障害は、筋骨格系の脆弱化はもちろんのこと、脳神経系の運動制御および感覚器の機能低下によってももたらされる。なぜならば、姿勢制御は脳神経系において感覚がフィードバックされることで行われるためである。すなわち、適切な感覚が得られ、適切な運動制御が行われれば、障害の多くを解消可能であると言える。リハビリテーションでは感覚改善が運動機能改善に重要との見識もあり、片麻痺患者の歩行運動において音情報を付与することにより歩行機能が改善された報告もある。したがって、障害された感覚を他の感覚で代償することや感覚の健全化による姿勢制御の改善の可能性は極めて重要である。

そこで感覚入力群が姿勢制御に及ぼす影響を詳細に知ることが重要となる。国内外で姿勢制御メカニズムに関する感覚の影響を論じる研究がいくつか存在するが、いずれも感覚が姿勢制御に与える影響は各感覚の線形和であると報告している。しかし、ここで対象としている感覚の種類・組み合わせは限定されている。我々は、申請者らはこれまでに感覚の変化に基づく姿勢変化に関する研究を行っており、次の知見を得ている。

- 視覚・前庭感覚をそれぞれ障害しても、姿勢や筋活動に有意な変化はない。
- 視覚・前庭感覚を同時に障害すると、大きく身体が傾き立位姿勢維持が困難になる。この時、筋活動は有意に亢進する。
- 他者が外部から接触（指で触れる程度）することで体性感覚を強調すると、立位姿勢が改善し、筋活動も平常時と近いものとなる。

これらを説明可能な実験結果と解析および数理モデルは極めて重要となる。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究課題では、「感覚統合を含めた姿勢制御メカニズムを解明するため、ヒトの感覚統合モデルにより調査すること」を目指した。

上記の従来研究の通りにもし各感覚による筋活動の単純な線形和ならば、視覚や前庭感覚障害を独立に行ったとしても、筋活動は変化するはずであるが、そこには有意な差は観られず、同時障害時のみに有意な差となった。以上の研究結果から、次の作業仮説を得るに至った。

作業仮説：各感覚は独立に参照されておらず、統合され参照されている。すなわち、単純な線形和ではなく、高度な組み合わせとして表

現され、参照されている。

上記の作業仮説を受け、本研究課題では各感覚がどのように統合され、どのように姿勢制御に参照され、寄与しているのかを数理モデルにより明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成する方法として、本研究課題では以下のアプローチを採択した。

(1) 感覚障害実験系の構築

姿勢制御に重要であると考えられる視覚・前庭感覚・体性感覚に関し、各感覚障害を組み合わせ、網羅的に姿勢制御実験を行う。これにより、感覚入力と姿勢・筋活動という出力の関係を明らかにする。姿勢制御におけるこれらの感覚の組み合わせを筋活動と共に調べた研究は見当たらず、したがって実験系の構築が必須となる。また、同一の姿勢でも異なる筋活動を示す可能性があり、これは制御の出力が異なることを意味し、姿勢の計測のみでは解析できない。つまり、筋活動を計測することが重要となる。

(2) 数理モデルによる感覚統合の理解

上記の実験系によって感覚入力パターンとそれに対応した筋活動パターンを得た後、これに非負値行列因子分解を適用することにより、数理モデルを構築する。これにより、どの感覚の組み合わせ（感覚成分）がどの筋活動の組み合わせ（筋成分）を出力するかを、明確化する。

更に近年注目を集めている再重み付けモデル[①]に基づく考察を行う。これにより、感覚変容による姿勢変容の説明を行う。

4. 研究成果

(1) 実験系の構築と姿勢変容と筋活動計測

上記の方法に従い、実験系の構築を行った。その外観を図1に示す。視覚は閉眼によって、前庭感覚は直流前庭刺激(GVS)によって、体性感覚は前脛骨筋腱への振動刺激によって、感覚を変容させている。

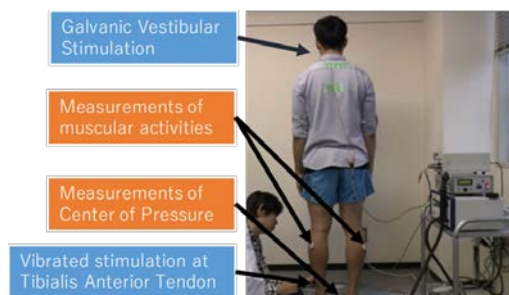


図1 Settings of Experiments

すなわち、感覚状態の組み合わせは8通りとなる。条件を表1にまとめた。GVSは左乳様突起に貼付した電極がプラスとなるようにし、振動刺激は左足に限定した。これら8条件において30秒の起立を3セット行った（不調などにより中断したものも含む）。被験者は健常な20代の男性13名である。

実験における計測は30秒間の重心位置(水平面上)と筋電図(前脛骨筋・腓腹筋・大腿直

筋・ハムストリング・背筋)である。

その結果、各条件での重心位置の平均は図2のようになった。左側 GVS によって左後方へ、左足前脛骨筋腱振動刺激によって左前方へ重心が移動することは先行研究通りであり、これは実験系が十分に構築できたことを意味する。

表1 Conditions of Experiments

	Vision	proprioception	Vestibule
Condition 1	Normal	Normal	Normal
Condition 2	Closed Eyes	Normal	Normal
Condition 3	Normal	Vibration	Normal
Condition 4	Closed Eyes	Vibration	Normal
Condition 5	Normal	Normal	GVS
Condition 6	Closed Eyes	Normal	GVS
Condition 7	Normal	Vibration	GVS
Condition 8	Closed Eyes	Vibration	GVS

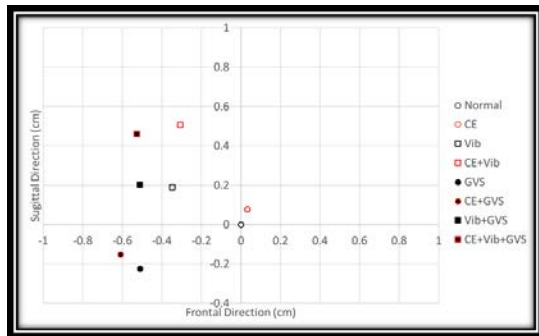


図2 Positions of conditions

(2)

①非負値行列因子分解による感覚・筋成分解析

上記の実験における筋電図を計測し非負値行列因子分解によって感覚成分と筋成分に分解した。その結果、以下の通りとなった。

$$\text{感覚成分} = \begin{bmatrix} 1.0504 & 0.9433 & 1.0677 & 0.1375 \\ 1.5585 & 0.6303 & 0.8676 & 0.2203 \\ 1.2501 & 0.8852 & 0.1865 & 0.9285 \\ 1.2863 & 0.7555 & 0.4355 & 0.8171 \\ 1.8501 & 0.9981 & 0.0984 & 0.3301 \\ 2.1108 & 0.7849 & 0.0999 & 0.4034 \\ 2.2450 & 0.4862 & 0.3060 & 0.2763 \\ 2.4220 & 0.2043 & 0.7179 & 0.0377 \end{bmatrix}$$

$$\text{筋成分} = \begin{bmatrix} 0.3102 & 0.3544 & 0.3371 & 0.3320 & 0.2762 & 0.3049 & 0.2850 & 0.3006 & 0.2909 & 0.3590 \\ 0.3887 & 0.3521 & 0.2778 & 0.2128 & 0.3577 & 0.2665 & 0.4076 & 0.2980 & 0.2659 & 0.2790 \\ 0.2604 & 0.2461 & 0.3149 & 0.3832 & 0.3376 & 0.3439 & 0.2639 & 0.3302 & 0.3654 & 0.2833 \\ 0.2374 & 0.3272 & 0.2929 & 0.3879 & 0.1121 & 0.3754 & 0.2113 & 0.3416 & 0.4129 & 0.3391 \end{bmatrix}$$

上記の結果を見ると、感覚成分の第一列(視覚成分)は平常(奇数行)と閉眼条件(偶数行)で相関がみられない。同様に体性感覚(第二列)・前庭感覚(第三列)でもそれぞれの感覚において平常時と刺激時の係数に相関が見られない。これにより、感覚への刺激に対し、各感覚は独立に筋活動を変容させるわけではないことがわかった。

②再重み付けモデルによる位置変容の説明

上記の解析により、各感覚の状態が相互に影響を及ぼしていることが分かったことから、近年有力な仮説となっている再重み付けモデルにより本研究課題の結果が説明可能であるか、解析した。

再重み付けモデルは下記の式のように推定姿勢 \hat{S} は各感覚による推定位置の重み付き線形和であると考えられるモデルであり、この重

みをヒトは経験・学習により獲得し、状況に合わせて変容させているという仮説である。

$$\hat{S} = w_{vi} \cdot \hat{S}_{vi} + w_{ve} \cdot \hat{S}_{ve} + w_s \cdot \hat{S}_s$$

このモデルを基に実験結果の位置変容を解析すると、視覚の重みが極めて低い(およそ $0 \sim 0.25$) こととなった。しかしながら、下の式のように、この重みは重心動揺の標準偏差に反比例すると言われており、図3の実験結果とは反対の結果と言える。図3の結果ではむしろ閉眼時に偏差が大きくなることから、視覚は信頼性が高く重みが大きくなることとなる。

$$w_{vi} = \frac{1/\sigma_{vi}^2}{1/\sigma_{vi}^2 + 1/\sigma_{ve}^2 + 1/\sigma_s^2}$$

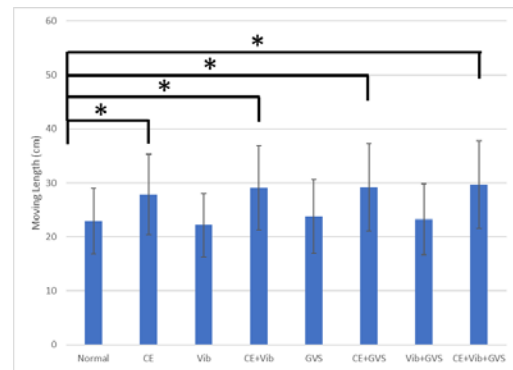


図3 Standard deviations of conditions

(3)結果のまとめ

本研究課題では、数理モデルによりヒトの感覚統合がいかに行われているかを調べることが目的であった。特に従来提唱されている線形和のモデルが複数感覚の変容時に適用可能であり、筋活動においても適用可能であるかを調べた。その結果、感覚変容による姿勢変容は従来研究の通りであっても、筋活動は各感覚の線形和とならないこと、再重み付けも他の感覚を単純に強化するわけではないことがわかった。

この結果の定性的な分析を行うと、以下の事柄が考えられる。

- 閉眼のみによる姿勢変容は少ないものの偏差は大きくなる。すなわち、視覚による位置補正は大きい。
- 閉眼による効果は、他の感覚変容による位置変容を強調する。すなわち、閉眼によって再重み付けが起き、他の感覚を強調している可能性がある。
- それに対し、他の感覚の変容は再重み付けを起ささない可能性がある。これは、GVS や腱振動刺激が経験にないものであるのに対し、閉眼は日常的に経験しているからである可能性がある。
- 筋活動を見ると、感覚変容時に全体的に上昇傾向が見られる。すなわち、未知の感覚や感覚同士の齟齬に対し、全身の stiffness を向上させることで対応しようとした可能性がある。

<参考文献>

- ① C. R. Fetsch, A. Pouget, G. C. DeAngelis, D. E. Angelaki, Neural correlates of reliability-based cue weighting during multisensory integration. *Nature neuroscience*, 15(1), 146-154, 2012.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① R. Chiba, S. Shiraishi, K. Takakusaki, J. Ota, (2017). A model for the initial diagnosis of cerebellar disease. *Advanced Robotics*, 査読有, 31 (3), pp. 143-154.

DOI: 10.1080/01691864.2016.1272490.

- ② P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2017). A postural control model incorporating multisensory inputs for maintaining a musculoskeletal model in a stance posture. *Advanced Robotics*, 査読有, 31 (1-2), pp. 55-67.

DOI: 10.1080/01691864.2016.1266095.

- ③ 高草木 薫, 高橋 未来, 千葉 龍介, (2017) パターンジェネレータとしての網様体, *Clinical Neuroscience 別冊*, 査読有, 35(6), pp. 675-679.

- ④ K. Takakusaki, M. Takahashi, K. Obara, R. Chiba, Neural substrates involved in the control of posture, *Advanced Robotics*, 査読有, 2017, 31 (1-2), pp. 2-23.

DOI: 10.1080/01691864.2016.1252690.

- ⑤ K. Takakusaki, R. Chiba, T. Nozu, and T. Okumura, (2016). Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems, *Journal of Neural Transmission*, 査読有, 123 (7), pp. 695-729.

DOI: 10.1007/s00702-015-1475-4.

- ⑥ P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2016). Generation of the human biped stance by a neural controller able to compensate neurological time delay. *PLoS ONE*, 査読有, 11 (9): e0163212.

DOI: 10.1371/journal.pone.0163212.

- ⑦ A. Yozu, M. Sumitani, M. Shin, K. Ishi, M. Osumi, J. Katsuhira, R. Chiba, and N. Haga, (2016) Effect of Spinal Cord Stimulation on Gait in a Patient with Thalamic Pain, *Case Reports in Neurological Medicine*, 査読有, 2016, Article ID 8730984.

DOI: 10.1155/2016/8730984.

- ⑧ A. Yozu, N. Haga, T. Funato, D. Owaki,

R. Chiba, J. Ota, (2016). Hereditary sensory and autonomic neuropathy types 4 and 5: Review and proposal of a new rehabilitation method. *Neuroscience Research*, 査読有, 104(2016), pp. 105-111.

- ⑨ R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, A. Yozu, N. Haga, (2016). Human upright posture control models based on multisensory inputs; in fast and slow dynamics. *Neuroscience Research*, 査読有, 104(2016), pp. 96-104.

[学会発表] (計10件)

- ① K. Kaminishi, P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2017). Proprioceptive postural control of a musculoskeletal model against horizontal disturbances. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1270-1275, Macau, China.

DOI: 10.1109/ROBIO.2017.8324592

- ② R. Chiba, K. Kaminishi, K. Takakusaki, J. Ota, (2017). Multisensory alterations in visual, vestibular and proprioceptive cues for modeling of postural control. *IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, pp. 1-4. Nagoya, Japan.

DOI: 10.1109/MHS.2017.8305207

- ③ R. Chiba, S. Shiraishi, K. Takakusaki, J. Ota, (2016). Proposal of a model for initial diagnosis of cerebellar disease with rats, *SICE Annual Conference 2016*, pp. 1530-1531, Tsukuba, Japan.

- ④ P. Jiang, S. Shirafuji, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2016). Proposal of a stance postural control model with vestibular and proprioceptive somatosensory sensory input. *International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-14)*, pp. 305-316, Shanghai, China.

- ⑤ R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2016). Postural control on movable inclined platform with synergic analysis, the 1st International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (EmboSS 2016), pp. 36. Tokyo, Japan.

- ⑥ P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2016). Proposal for a neural controller incorporating vestibular and proprioceptive sensory inputs, the 1st International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (EmboSS 2016), pp. 22, Tokyo, Japan.

- ⑦ P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2015). Generation of biped stance motion in consideration of neurological time delay through forward dynamics simulation. IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science (MHS2015), pp. 205-208, Nagoya, Japan.
- ⑧ R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, (2015). Posture Control Strategy Analysis on Movable Declined Floor, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milan, Italy.
- ⑨ S. Shiraishi, K. Takakusaki, R. Chiba, J. Ota, (2015). Quantitative Evaluation of Muscle Tonus in Rats with Medial and Bilateral Cerebellar Ablation, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Milan, Italy.
- ⑩ P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota. (2015). Proposal of a neural controller able to compensate neurological time delay for stance postural control, SICE Annual Conference (SICE2015), pp. 1528-1531. Hangzhou, China.

[その他]

旭川医科大学脳機能医工学研究センターホームページ

<http://www.asahikawa-med.ac.jp/brain/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 龍介 (CHIBA, Ryosuke)

旭川医科大学・医学部・准教授

研究者番号：80396936

(2) 研究分担者

高草木 薫 (TAKAKUSAKI, Kaoru)

旭川医科大学・医学部・教授

研究者番号：10206732