

令和 2 年 9 月 11 日現在

機関番号：25406

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13074

研究課題名（和文）風船把持歩行の効果の謎に迫る：指先感覚情報の“揺らぎ”解析と風船型姿勢制御モデル

研究課題名（英文）The effect of walking with a floating balloon

研究代表者

島谷 康司 (Shimatani, Koji)

県立広島大学・保健福祉学部（三原キャンパス）・教授

研究者番号：00433384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：姿勢制御戦略では、身体状況に応じて視覚・体性感覚・前庭系の情報をどのように重みづけをすることが重要となります。著者らはヘリウムガス入り風船を把持させると歩行中の乳児の身体動揺が減少することを報告しました。

本研究では、「浮遊する風船を把持することによって被験者の立位姿勢制御戦略がどのような影響を受けるのか」を目的に、指先感覚情報の“揺らぎ”解析をし、風船把持歩行の効果の謎に迫りました。結果、風船との物理的な接続によって指先への体性感覚情報が変化（感覚情報の再重みづけ）し、風船を把持することによって姿勢制御システムの複雑性が増し、身体動揺を低減させることに有用であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期歩行期の乳児が風船を把持することによって歩行中の乳児の片脚支持期の身体動揺が軽減され、指先への体性感覚情報の重みづけが関連していることが明らかとなりました。

乳児の歩行が安定していく発達過程の重要な因子として「片脚支持期の身体動揺の減少」（Yaguramaki, 2002）が示唆されていることから、不安定な状態にある乳児の歩行を、風船を把持させることによって歩行の発達過程に近づけることができる可能性があり、風船把持は初期歩行支援法として有意義である可能性が示唆されました。

研究成果の概要（英文）：In standing and walking control strategy, the relationship linking visual/somatosensory/vestibular-system information and physical movement is important. The authors have reported that the body sway of a walking infant is mitigated when the subject holds a helium-filled balloon. (Grant-in-Aid for challenging Exploratory Research Grant Number JP25560388) So in this study was conducted to clarify how standing control strategy is influenced by subjects holding a balloon. A novel system was developed for quantitative monitoring and evaluation of the standing state in such a scenario. The influence on the standing state was also investigated using frequency analysis. The results of the experiments conducted indicate that attitude control strategy changes in response to somatosensory information provided by the physical connection with the balloon. Holding a balloon was also found to make the attitude control system more complex, which can also help to mitigate body sway.

研究分野：Physical Therapy

キーワード：floating balloon postural control fingertip somatosensory fluctuation analysis postural control model

1. 研究開始当初の背景

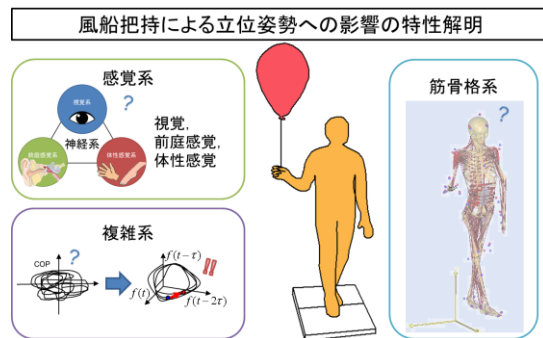
健やかな発達を促すために養育者による保育実践が展開されてはいるものの、初期歩行の遅れや不安定な歩行を呈する乳幼児の相談が増え、より具体的な対策が望まれている。しかし現状では、初期歩行発達遅延の確立した支援方法はない。我々は、初期歩行直後の乳児に風船付きの紐を把持させると身体動揺が減少して歩行が安定し、歩行距離が延長することに気付いた。このことは、初期歩行期における乳幼児の新しい歩行支援方法の可能性を示唆している。乳児の風船把持時の歩行特性として、片脚支持期の動揺を減少させることが明らかとなった。乳児の歩行の発達に関して Yaguramaki ら¹⁾は、乳児の歩行が安定していく過程の重要な因子として「片脚支持期の身体動揺の減少」を挙げていることから、不安定な状態にある乳児歩行を、風船把持によって歩行の発達過程に近づけることができる可能性があり、つまり風船把持は初期歩行支援法として有意義であることが示唆された。Shima ら²⁾は、風船を把持した状態で静止立位を取らせた場合の風船と身体動揺の関係性をシミュレーションによって検証した結果、身体の動揺が把持した風船の挙動に影響を与え、さらに風船の挙動がヒトの身体動揺に影響を及ぼすというインタラクション効果を示唆している。

風船把持歩行の姿勢制御の解釈として、①100g 以下の力で指尖が物に軽く触れること(light touch contact, LTC)によって身体各部位と外界との相対的な位置関係を知覚し、姿勢が調整される³⁾。そして、幼児や高齢者の運動学的歩行特性には多くの共通点があり⁴⁾、LTC がその不適当な戦略を好転換すること、②LTC が乳幼児の姿勢制御の力学的特性を自立歩行後の姿勢制御に類似するように変化させること⁵⁾、③乳幼児の手を介助することによって歩行時の姿勢制御を有意に改善すること⁶⁾、④体性感覚の応答潜時は短く、不安定性が生じた場合の姿勢制御は優先的に体性感覚に依存すること⁷⁾から、風船を把持することによって指先からの体性感覚による感覚情報転換戦略(Sensory Re-Weighting Theory)をとっていることが予想される。

Sensory Re-weighting とは、高位中枢がすべての感覚を統合し、常に状況に応じて各感覚の再調整と重みづけを行うことであり、多くの研究者に支持されている⁸⁻¹²⁾。この理論は、乳幼児にも適用可能な方法であることが報告されている^{5,13)}。つまり、風船把持によって指先からの体性感覚による感覚情報転換戦略をとっていることが予想される。

2. 研究の目的

本研究では、「浮遊する風船を把持することによって被験者の立位姿勢制御戦略がどのような影響を受けるのか」を明らかにすることを目的に、指先感覚情報の“揺らぎ”解析をし、風船把持歩行の効果検証を行った。



3. 研究の方法

(1) 静止立位時の浮遊する風船把持の影響

対象は、健常若年成人 67 名 (男性 : 30 名, 女性 : 37 名) とした。そのうち 28 名は動画像測定を同時に行った。重心動揺測定機器としてアニマ社製重心動揺計 (GP-6000) を使用した。また、揺らぐ風船を把持した場合の右手関節と体幹部の位置関係を測定するために microsoft 社製の KINECT for windows を使用した。なお、体幹部とは両肩関節と上前腸骨棘を対角に結んだ線の交点とした (Fig.1)。測定条件は、何も把持しない No Contact 条件 (以下, NC 条件), 風船を右手で把持する条件 (以下, BL 条件) の 2 条件を設定し、被験者ごとにランダム化して計測を行い、データを比較した。測定肢位は利き足を前に出して踵とつま先を接地させるタンデム立位とした。被験者にはアイマスクを装着させ、さらに閉眼させた。また、NC 条件の右上肢は「あたかも風船の紐を持っているかのような姿勢でお願いします」と指示して計測を行った。測定時間は 60 秒とした。測定の開始は被験者が安定したと感じた際に合図を出させ、その時点から測定を開始した。統計には、総軌跡長、実効値面積 (以下, RMS), 左右軌跡長、前後軌跡長の項目それぞれについて、NC 条件と BL 条件の 2 群間で対応のある t 検定を行った。なお、有意水準は 5% 未満とした。また、身体の位置関係については右手部と体幹部を指標として、NC 条件と LC 条件を一元配置分散分析および Tukey の多重比較検定にて処理を行った。

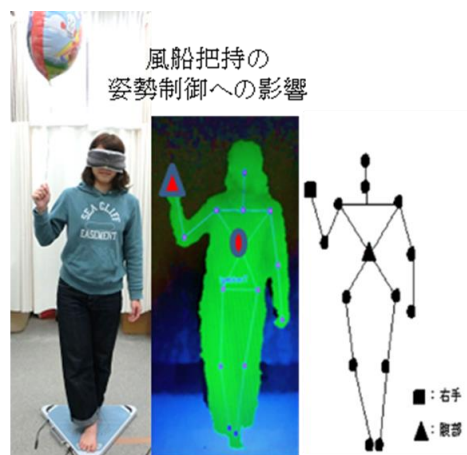


Fig.1 Evaluation scene for subjects standing with a floating balloon

(2) 浮遊する風船把持による立位姿勢制御戦略の解析 (スペクトル解析, 複雑系解析, 筋骨格モデルを用いた逆動力学解析)

対象は、健康若年者 28 名(男性 10 名, 女性 18 名, 20.7 ± 1.0 歳)とした。計測には新たに構築したシステム (Fig. 2) を用い、さらに 3 次元モーションキャプチャ Motive (サンプリング周波数: 120Hz), カメラ 15 台, マーカー点数(全身 41 点, 風船 18 点)を用いて、30 秒間の閉眼タンデム立位(アイマスク着用)にて風船把持(BG), 把持なし(NB)の 2 条件を各条件 7 施行実施し、スペクトル解析, 複雑系解析, 筋骨格モデルを用いた逆動力学解析を行った。

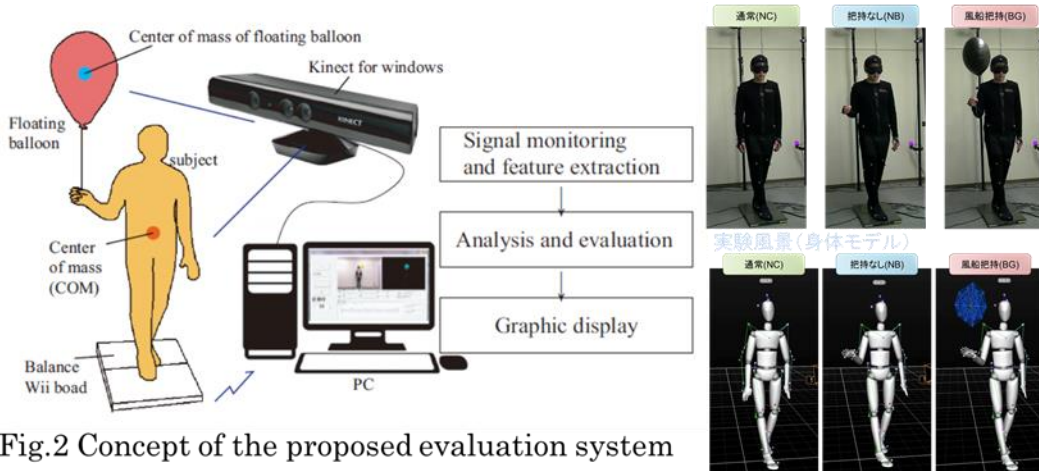


Fig.2 Concept of the proposed evaluation system

4. 研究成果

(1) 静止立位時の浮遊する風船把持の姿勢制御への影響

重心動揺計測の結果, NC 条件と BL 条件を比較したところ総軌跡長 ($p < 0.01$), 左右軌跡長 ($p < 0.01$), 前後軌跡長 ($p < 0.01$), RMS ($P < 0.05$) で有意差を認めた。KINECT 動画による各身体部位の位置情報から, NC 条件と BL 条件の右手部と体幹部の RMS について群間比較した結果, 右手部間・体幹部間の両部位に有意差は認められなかった (Fig. 3)。

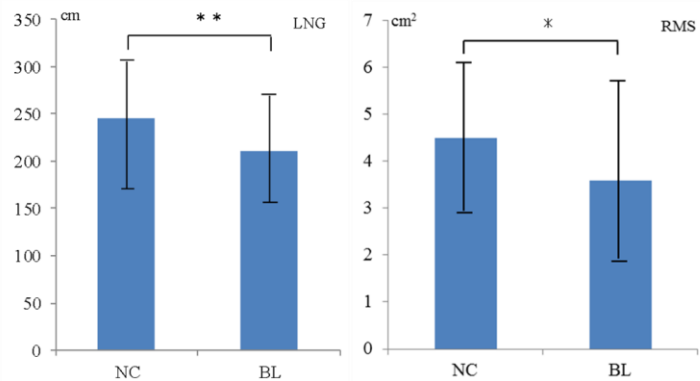


Fig.3 Results of LNG and RMS, compare with NC and Balloon

(2) 浮遊する風船把持による立位姿勢制御戦略の解析

重心動揺計測の結果, 風船を把持することにより COP の変化が抑制されることが明らかとなった (Fig. 4)。また, スペクトル解析の結果, 風船把持により高周波帯(HF)の割合の増加が認められることから, 体性感覚系優位な姿勢制御戦略にシフトしていることが明らかとなった (Fig. 5)。さらに, 最大リアプノフ指数では, 全ての値が 1 以下の正の数を示し, カオス性(非周期の規則性)を有していると考えられることから, 従来知見と位置した結果となった。またサンプルエントロピー値を算出すると, COP, COM とともに風船把持により増加傾向にあることから, 制御系への入力が増え, 立位制御システムがより複雑になったと考えることができる。筋骨格モデ

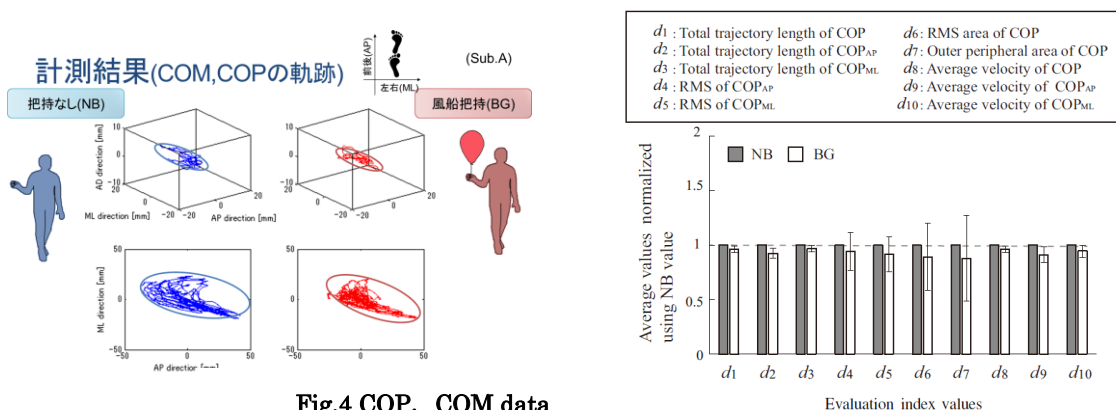


Fig.4 COP, COM data

ルを用いた逆動力学解析では、下肢における筋活動量の比較を行った結果、風船を把持することで、筋発揮力は増加傾向にあることが明らかとなり、風船を把持することで制御戦略が変化し、風船を把持することで下肢の筋全体を使う制御から主要筋を効率よく使う制御に変化するなど、筋の使い方が変化したことが示唆された。

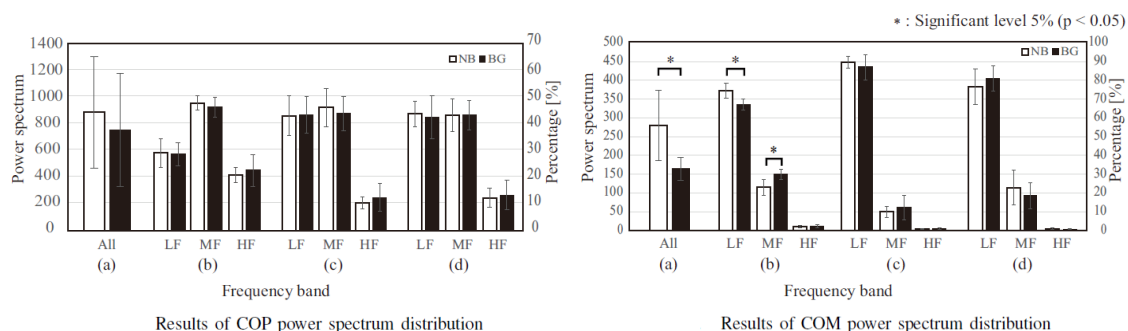


Fig.5 Results of power spectrum distribution of COP and COM

(3) 総合考察

風船把持の姿勢制御の影響を考察するために、健康成人の静止立位条件で身体重心 (COM) と足底圧中心 (COP) を検証した結果、健康成人の静止立位においても風船把持によって重心動揺が減少することが明らかとなった。同様に、3次元モーションキャプチャ Motive, カメラ 15 台, マーク点数 (全身 41 点, 風船 18 点) を用いて風船把持立位姿勢動揺を計測し、スペクトル解析を行った結果、風船把持によって高周波帯域の割合が増加したことから、風船把持が体性感覚系にとって有意な姿勢制御戦略に移行させた可能性が示唆された。さらに、最大リアプノフ指数を用いて解析を行った結果、やはり姿勢動揺はカオス性を示しており、COM, COP の縮小は従来研究の知見と一致した。この原因として、風船把持によりサンプルエントロピー値が増加傾向にあったことから、制御系への入力が増え、そのため制御システムがより複雑になったことが考えられる。また、筋骨格モデルを用いた逆動力学解析の結果、風船を把持することで筋発揮力は増加傾向にあり、風船を把持することで制御戦略が変化し、筋発揮戦略が変化したと考えられる。

神崎ら¹⁴⁾は指先触覚が身体と環境との定位に関する求心性情報となり、中枢神経系を介して姿勢制御に寄与していると述べている。また、ヒトの姿勢制御は、フィードバック制御とフィードフォワード制御の両方の形で行われ、様々な環境において平衡を保持しているとも述べている。今回の実験では、風船の紐を把持することで、浮遊する風船付きの紐からの触・圧覚や、指先から上肢にかけての固有受容感覚といった体性感覚情報のフィードバック量が増大し、指、手、腕、体幹部などの各身体部位と外界との相対的な位置関係を知覚することで、姿勢コントロールに働くと考えていた。しかし、KINECT データより風船を把持している右手部と腹部の RMS について比較を行った結果、NC 条件と BL 条件の右手部と体幹部の両部位の RMS にそれぞれ有意差は認められなかった。つまり、風船を把持した右手部と体幹部の位置関係には NC 条件と BL 条件では、想定したほど大きな違いがないことが明らかとなった。

ヒトの身体重心位置の動きと身体部位の左右、前後の動きには相関があり、立位時には各身体部位を前後、左右に微妙に動かしながらバランスをとっていると示していることが報告されている¹⁵⁾。本研究では、実際に風船条件では重心動揺が減少していること、風船把持という条件以外に実験条件に違いがないことから、風船を把持した紐を基準として、指先から得られる体性感覚情報を用いた感覚情報転換 (Sensory Re-weighting) によって姿勢制御戦略を移行するなど、風船が姿勢動揺の減少に影響を及ぼしている可能性が高いことが明らかとなった。

<引用文献>

- [1] Yaguramaki N, Kimura T.: Acquirement of stability and mobility in infant gait, *Gait and Posture*, vol.16, pp. 69-77, 2002.
- [2] Shima K et al: A Fundamental Study on How Holding a Helium-filled Balloon Affects Stability in Human Standing. International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), QEII Centre, London, UK, July 17-20, 2017.
- [3] Jeka JJ, Light touch contact as a balance aid, *Physical Therapy*, vol. 77, pp. 476-87, 1997.
- [4] Bril B and Brenie`re Y., Posture and independent locomotion in early childhood, learning to walk or learning dynamic postural control? , *The Development of Coordination in Infancy*, edited by Savelsbergh GJP, Amsterdam, Elsevier, pp. 337-358, 1993.
- [5] Chen LC, Metcalfe JS, Chang TY, Jeka JJ, Clark JE., The development of infant upright posture: sway less or sway differently?, *Exp Brain Res*, vol. 186, pp. 293-303, 2008.
- [6] Ivanenko YP, Dominici N, Cappellini G, Lacquaniti F., Kinematics in newly walking toddlers does not depend upon postural stability, *J Neurophysiol*, vol. 94, pp. 754-63, 2005.
- [7] Horak F. B., Diener H. C., Cerebellar control of postural scaling and central set in stance, *Journal of Neurophysiology*, vol. 72, pp. 479-493, 1994.

- [8] Hwang S, Agada P, Kiemel T, Jeka JJ., Dynamic reweighting of three modalities for sensor fusion, PLoS ONE, vol. 9, no.1 : e88132. doi:10.1371/ journal.pone.0088132, 2014.
- [9] Polastri PF, Barela JA, Kiemel T, Jeka JJ., Dynamics of inter-modality re-weighting during human postural control, Exp Brain Res, vol. 223, pp. 99-108, 2012.
- [10] Mahboobin A, Loughlin P, Atkeson C, Redfern M., A mechanism for sensory re-weighting in postural control, Med Biol Eng Comput, vol. 47, pp. 921-929, 2009.
- [11] Polastri PF, Barela JA, Kiemel T, Jeka JJ., Dynamics of inter-modality re-weighting during human postural control, Exp Brain Res, vol. 223, pp. 99-108, 2012.
- [12] Hwang S, Agada P, Kiemel T, Jeka JJ., Identification of the Unstable Human Postural Control System, Front Syst Neurosci., vol. 11, pp. 10-22, 2016.
- [13] Bair WN1, Kiemel T, Jeka JJ, Clark JE., Development of multisensory reweighting for posture control in children, Exp Brain Res, vol. 183, pp. 435-446, 2007.
- [14] 神崎素樹, 政二慶, 指先接触による求心性情報が高齢者の立位バランス能力向上に及ぼす影響, 第 25 回健康医科学研究助成論文集, pp. 52-62, 2010.
- [15] 山本撰, 柴田典子, 重心動揺と身体動揺, 理学療法 進歩と展望 8, pp. 28-29, 1993.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keisuke Shima, Koji Shimatani, Gen Sato, Mami Sakata, Psiche Giannoni and Pietro Morasso	4. 巻 2017 IEEE
2. 論文標題 A Fundamental Study on How Holding a Helium-filled Balloon Affects Stability in Human Standing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)	6. 最初と最後の頁 1061-1066
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 島谷康司
2. 発表標題 乳幼児期の運動発達と発達障害児の運動特徴
3. 学会等名 鳥取大学地域学部附属子どもの発達・学習研究センター公開講座（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Shima, Koji Shimatani, Gen Sato, Mami Sakata, psiche giannoni, Pietro Giovanni Morasso
2. 発表標題 A Fundamental Study on How Holding a Helium-filled Balloon Affects Stability in Human Standing
3. 学会等名 2017 IEEE-RAS-EMBS International Conference on Rehabilitation Robotics Submission number: 366（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 島谷康司
2. 発表標題 風船把持による乳幼児歩行支援
3. 学会等名 第22回発達保育実践政策学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 開一夫 , 齋藤慈子(編) : 第5章 感覚・運動の発達(伊村知子・白井 述・島谷康司)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 288
3. 書名 ベーシック発達心理学	

1. 著者名 大城 昌平, 儀間 裕貴 (編) : 第5章 幼児期	4. 発行年 2018年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 256
3. 書名 子どもの感覚運動機能の発達と支援 発達の科学と理論を支援に活かす	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	島 圭介 (Shima Keisuke) (50649754)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	