

2010（平成 22）年度
（財）在宅医療助成 勇美記念財団
在宅医療助成（一般公募）完了報告書

「身体の認識に着目した知覚トレーニング開発と在宅医療
への応用可能性の検討」

安田 和弘

首都大学東京大学院 人間健康科学研究科 知覚運動制御研究室 博士課程 3 年

提出日：平成 23 年 8 月 31 日

1. 目的

本研究プロジェクトでは、リハビリテーション（以下リハビリと略す）が必要な在宅医療の対象者（高齢者や神経疾患患者など）が、特殊な装置や機材を用いず安全に運動機能の維持・改善を得ることを目的とした知覚トレーニングの開発と応用可能性を検討することであった。今回の取り組みは、その基礎研究として、身体の認識を促すことがその後の立位姿勢制御へ与える影響を検証した。リハビリの治療場面または健康増進のために行う太極拳やヨガなどの古典的体操では、しばしば身体状況を積極的に認識することを推奨している。しかし、このような試みが運動機能面に好影響を与えているという科学的検証は驚くほど少ないのが現状である。そこで本研究では、運動行動の最も基盤となる立位姿勢制御を対象として、身体の認識を促す知覚トレーニングが重心制御様式に及ぼす影響を、重心動揺の量的解析（重心移動量を示す）および非線形時系列解析（重心の振る舞い方の特性を示す）のひとつである再帰性定量化解析（Recurrence Quantification Analysis; RQA）を用いて検証した。

第1の研究目的は、比較的短時間の身体感覚の認識がその後の立位姿勢制御に影響し得るかを検証することであった。身体感覚を積極的に認識させることを推奨する太極拳やヨガなどの効果を示した研究では、実施期間が数週間に及ぶものが多く、身体感覚の認識という認知過程自体が直接的に姿勢制御の効率化に影響しているか明確になっていない。この点をより直接的に検証するため、課題直前に肢節の身体感覚の認識を行うことの即時的な立位姿勢制御への影響を検証した。第2の研究目的は、認識を積極的に促す身体部位により効果に違いが出るかを検証することであった。ここでの作業仮説は、足関節の認識を促すことがトレーニングにおいて特に有効であるとした。立位姿勢制御の基礎研究では、生体力学的側面・感覚機能面において足関節が重要であることが多数報告されている。このような観点から、我々の作業仮説が正しいかを判断するために手関節を比較対象として認識を行う部位の影響を検証した。第3の目的は、足底に対する

触圧覚刺激を認識する知覚トレーニングの効果を検証することであった。リハビリでは、身体感覚の認識を行う方法として、セラピストが道具を用いて足底に触圧覚刺激を加え、その刺激を積極的に認識させることがある。そこで本研究では、運動を伴わない外的な足底への触圧覚刺激の認識が直後の立位姿勢制御様式に及ぼす影響を検証した。

2. 方法

実験 1

目的

実験 1 では、姿勢制御課題直前の身体感覚の認識の効果を検証するために足関節と手関節（コントロール）条件でその効果を検証した。

実験参加者

中枢神経疾患・整形外科疾患を持たない健常成人 20 名（男性 10 名，女性 10 名，平均年齢 22.6 ± 2.2 歳）であった。

実験機器

重心動揺測定装置として、床反力計（キスラー社製）および関節角度を算出するために電子角度計（バイオメトリクス社製）を用いた。

介入課題

介入課題は身体感覚を認識させる認識条件と認識を阻害するコントロール条件の 2 つであった。実験参加者は椅子座位の状態でアイマスクを装着し、視覚情報を遮断した。認識条件では、実験者が参加者にターゲット角度である足関節背屈 20° 位（手条件では手関節伸展 20° 位）を予め指定し、関節運動を可能な限り正確に反復することを要求した。反復する関節運動回数は 20 回であり、運動は 1 反復につき 4 秒間で非常にゆっくりとした速度で行った。コントロール条件は、関節運動と同時に二重認知課題（暗算で 100 から順に 3 つずつ引く暗算）を課した。運動と同時に別の認知課題を付加するこ

とで、身体感覚を正確に認識することを阻害した。順序効果を除外するために、各条件間でカウンターバランスを取った。

手続き

実験は研究棟内の姿勢制御解析室で実施された。実験前に関節運動の反復角度の正確性を定量化するため、二軸電子関節角度計を装着した。姿勢制御能力の評価のために、介入前にプレテストとして重心動揺を測定した。実験参加者は、裸足で床反力計に立位となり 30 秒間姿勢動揺を測定した。測定中、実験参加者は目の高さに設置された 2m 先のマーカーを注視し、出来るだけ身体が揺れないようにした。ベースラインの姿勢動揺を 3 回測定した 2 分後に介入セッションに移行した。関節運動の反復動作の練習として、実験者が実験参加者の関節をターゲット角度に誘導し、3 秒間保持した。この練習を 5 回実施した。介入課題の際の関節運動は 2 軸電子角度計を用いて、反復角度を計測した。介入セッションの 30 秒後にポストテストとして、再び姿勢動揺を 3 回床反力計で測定した。

解析

姿勢動揺の量的指標は、床反力計の圧中心座標データから得られた総軌跡長、矩形面積、平均速度、実効値の 4 つであった。床反力計データのサンプリング周波数は 20Hz であった。得られたデータは 6Hz のローパスフィルター処理を行った。姿勢動揺量の変化を検証するために、介入後のデータから介入前のデータの差分値を算出した（マイナス値は姿勢動揺を示す指標が減少したことを示す）。算出した差分値を従属変数とした。

RQA では、遅れ値 13, 8 次元の遅延座標系を再構成し、遅延座標系内の 2 点間の最大距離の 10% 内に再帰した点を再帰点と定めた。指標として、%recurrence (状態の再帰率)、%determinism (時間変化の予測可能性)、Maxline (時間変化の安定性)、Trend (定常性) の 4 項目を算出し (値が低いことは姿勢制御が柔軟且つ多様であることを示す)、介入条件とコントロール条件で比較した。RQA 解析には、MathWorks 社製ソフト

ウェア MATLAB を使用した.

関節反復運動（足・手関節）の正確性は、2 軸電子角度計により測定された。関節角度を算出するためのデータ計測ソフトウェアは m-BIOLOG（S&ME 社製）を用いた。ターゲット角度からの誤差を再現誤差として 20 回の反復の平均再現誤差を算出した。

統計学的解析は、姿勢動揺測定を行った両脚立位・片脚立位で別々に実施し、二要因分散分析（認識要因・運動部位要因）を行った。有意水準は 5%以下に設定した。分散分析で有意差を認めたときの多重比較検定としてフィッシャーの LSD テストを行った。関節再現誤差は、対応のある T テストを用いて認識条件・コントロール条件を比較した。有意水準は 5%以下に設定した。

実験 2

目的

実験 2 では、姿勢制御課題直前の身体感覚の認識の身体部位による効果を再検証した。また、運動イメージによる認識条件を加えることで実運動を伴わない純粋な認知活動としての身体認識の効果を検証した。

実験参加者

中枢神経疾患・整形外科疾患を持たない健常成人 20 名（男性 10 名、女性 10 名、平均年齢 25.6 ± 3.2 歳）であった。

実験機器

実験に用いた機器は実験 1 と同様であった。

介入課題

介入課題は①関節運動の認識条件②関節運動+暗算課題（コントロール条件）③運動イメージによる認識条件④暗算課題のみ（コントロール条件）の 4 つであった。実験参加者は椅子座位の状態でアイマスクを装着し、視覚情報を遮断した。①関節運動の認識

条件では、実験者が参加者にターゲット角度である足関節背屈 20° 位（手条件では手関節伸展 20° 位）を予め指定し、関節運動を可能な限り正確に反復することを要求した。反復する関節運動回数は 20 回であり、運動は 1 反復につき 4 秒間の速度で行った。

②関節運動+暗算課題（コントロール条件）は、関節運動と同時に二重認知課題（暗算で 100 から順に 3 つ引く暗算）を課した。運動と同時に別の認知課題を付加することで、身体感覚を正確に認識することを阻害した。③運動イメージ条件では、実験参加者に足関節背屈 20° 位（または手関節伸展 20° 位）をターゲットとして、運動イメージによる関節運動を 20 回反復させた。条件④では、関節運動および運動イメージを行わずに暗算課題のみを 80 秒間実施した。順序効果を除外するために、各条件間でカウンターバランスを取った。

手続き

実験は研究棟内の姿勢制御解析室で実施された。実験前に関節運動の反復角度の正確性を定量化するため、2 軸電子角度計を足関節（手関節）に装着した。姿勢制御能力の評価のために、介入前にプレテストとして重心動揺を測定した。実験参加者は、裸足で床反力計に立位となり 30 秒間×3 回姿勢動揺を測定した。測定中、実験参加者は目の高さに設置された 2m 先のマーカーを注視し、出来るだけ身体が揺れないようにした。ベースラインの姿勢動揺を測定した 2 分後に介入セッションに移行した。関節運動の反復動作の練習として、実験者が実験参加者の関節をターゲット角度に誘導し、3 秒間保持した。この練習を 5 回実施した。運動イメージの練習として、実運動の練習と同様の方法でターゲット角度の確認を 3 回行い、その後運動イメージによる関節運動を 2 回行った。介入セッションの 30 秒後にポストテストとして、再び姿勢動揺を 3 回床反力計で測定した。

解析

姿勢動揺の量的指標・RQA・関節反復運動の正確性は実験 1 と同様の方法で算出した。

統計学的解析は、姿勢動揺測定を行った両脚立位・片脚立位で別々に実施し、三要因分散分析（認識要因・身体部位要因・運動有無要因）を行った。有意水準は5%以下に設定した。分散分析で有意差を認めたときの多重比較検定としてフィッシャーのLSDテストを行った。関節再現誤差は、対応のあるTテストを用いて認識条件・コントロール条件を比較した。有意水準は5%以下に設定した。

実験 3

目的

実験 3 では、接地面である足底に対する刺激の認識を積極的に行うことが直後の立位姿勢制御に与える影響を検証した。

実験参加者

中枢神経疾患・整形外科疾患を持たない健常成人 20 名（男性 10 名，女性 10 名，平均年齢 25.6 ± 3.2 歳）であった。

実験機器

床反力計および関節角度計は実験 1.2 と同様の機器を用いた。足底を刺激する器具として、モノフィラメント（オーウェンマムフォード社製）の Neuropen[®]を使用した。

介入課題

介入課題は足底感覚刺激を認識させる認識条件と認識を阻害するコントロール条件の2つであった。実験参加者は椅子座位の状態でアイマスクを装着し、視覚情報を遮断した。認識条件では、実験者が実験参加者の足底に知覚検査用のモノフィラメントを使用し、左右足底（拇指球・小指球・踵部）に特定の回数と順序で刺激を呈示した。実験参加者は、刺激回数を可能な限り正確にカウントすることを要求された。足底の刺激回数と順序は、右拇指球 5 回，左小指球 5 回，右踵 4 回，左踵部 6 回，右小指球 6 回，左拇指球 4 回で左右各々 15 回，計 30 回の刺激を 1Hz の速度で加えた。コントロール条件

では、実験条件と同様の触圧覚刺激中に 100 から 3 を順に引く暗算課題を付加することで、触圧覚刺激の正確な認識を阻害した。順序効果を除外するために、触圧覚刺激に対する認識あり・なし（コントロール）の両条件間でカウンターバランスを取った。

手続き

手続きとして、実験参加者に床反力計上に裸足で足を揃え、立位姿勢を取らせた。両上肢は体側に下垂させ、手掌面は大腿に向けた状態にした。実験者は事前に「できるだけ身体が動揺しないようにして下さい」と教示を与えた。実験者の合図で測定を開始し、30秒間立位姿勢を保持させた。測定中は2m前方のスクリーンに貼り付けた1マーカを注視させた。測定間の休憩は10秒間とし、連続して3回姿勢動揺を測定した。事前の3回の測定後、予め準備した椅子に坐位を取らせた。アイマスクを装着し、実験者の誘導で介入課題を実施した。介入後に、再び床反力計上に立位姿勢を取らせ、介入前の手続き同様に姿勢動揺を30秒間3回測定した。

解析

姿勢動揺の量的指標・RQA・関節反復運動の正確性は実験 1 と同様の方法で算出した。統計学的解析は、姿勢動揺測定を行った両脚立位・片脚立位課題で対応のある T 検定を行った。有意水準は 5%以下に設定した。

3. 結果

実験 1

二要因分散分析の結果、片脚立位課題では認識要因に主効果を認め、認識条件において総軌跡長・平均移動速度がコントロール条件よりも有意に減少した ($p < 0.05$)。両脚立位課題では、運動部位要因に主効果を認め、足関節条件において総軌跡長・平均移動速度が手関節条件よりも有意に減少した ($p < 0.05$)。一方 RQA 解析では、両脚立位・片脚立位課題ともに 4 つの指標全てにおいて有意差を認めなかった。関節角度の反復正

確性では、片脚立位課題、両脚立位課題のどちらにおいても認識条件が障害条件に比べて、有意に誤差が小さかった ($p < 0.01$) .

以上の結果から、身体状況の認識の効果は足・手関節の認識に関わらず比較的難易度の高い姿勢制御課題で、姿勢動揺量を減少させ得る可能性が示唆された。また、難易度の低い両脚立位課題では、認識の有無に関わらず事前の足関節の運動が姿勢動揺量を減少させることが明らかになった。

実験 2

三要因分散分析の結果、片脚立位課題では認識要因に主効果を認め、認識条件において総軌跡長・平均移動速度がコントロール条件よりも有意に減少した ($p < 0.05$) . また、認識要因と運動要因に交互作用を認め、運動あり条件において認識ありが認識なしに比べ有意に低値を示した。両脚立位課題では、認識要因に主効果を認め、総軌跡長・平均速度において認識あり条件よりも認識なし条件が有意に高値を示した ($p < 0.01$) . また、運動要因に主効果を認め、総軌跡長・平均速度において認識あり条件よりも認識なし条件が有意に高値を示した ($p < 0.05$) . 一方 RQA 解析では、片脚立位課題は、前後方向の %determinism (%DET) において、認識要因および部位要因に主効果を認めた ($p < 0.05$) . 下位検定の結果、認識あり条件が認識なし条件よりも有意に低値を示した。両脚立位課題は前後方向の %determinism (%DET) において、認識要因および部位要因に主効果を認めた ($p < 0.05$) . 下位検定の結果、認識あり条件よりも認識なし条件が有意に低値を示した。関節角度の反復誤差値では、片脚立位課題、両脚立位課題のどちらにおいても認識条件が障害条件に比べて、有意に誤差が小さかった ($p < 0.01$) .

以上の結果から、実験 1 と同様に身体状況の認識の効果は足・手関節の認識に関わらず比較的難易度の高い姿勢制御課題で、姿勢動揺量を減少させ得る可能性が示唆された。また、運動イメージ条件でも実運動同様の認識の効果が得られた。反面、難易度の低い

両脚立位課題では、身体感覚を認識をさせることが姿勢動揺量を増加させた。

実験 3

両脚立位課題に対する総軌跡長・矩形面積・平均移動速度・実行値では条件間の統計的な有意差を認めなかった。一方 RQA 解析では、%recurrence, Trend で統計的な有意差を認め、認識条件がコントロール条件に比べ低値を示した ($p < 0.05$)。片脚立位課題では総軌跡長・平均移動速度に有意差を認め、介入条件で変数が増加し、障害条件で減少した ($p < 0.05$)。

以上の結果から、両脚立位などの比較的簡単な課題では足底の触圧覚刺激に対する認識をすることで、姿勢動揺パターンの多様化と、時間変化における定常性の向上が共起することが示唆された。この姿勢動揺の時間構造の特徴は、多様な仕方で立位の安定を達成する姿勢制御の柔軟性を示す。

4. 考察

本研究プロジェクトでは、在宅医療の対象者が特別な器具を用いず安全に行える知覚トレーニングの開発と応用可能性を検討した。ここでは、その基礎研究として事前に身体感覚の認識を促すことが立位姿勢制御へ与える影響を検証した。実験 1 および 2 の結果から、姿勢制御課題の直前に身体感覚の認識を促す介入の効果は、両脚立位課題・片脚立位課題で異なる可能性が示唆された。片脚立位では認識を促すことで姿勢動揺が減少し、認識の効果は足関節に限定されるものではなく手関節などの一見重心制御には無関係と思える部位でも効果が得られることが明らかになった。また片脚立位課題における RQA の結果では、認識を促すことが重心動揺の多様性・柔軟性の向上に寄与した。一方、両脚立位課題では、身体感覚を認識させることで姿勢動揺を増加させ、RQA においても定型化された重心動揺パターンが誘発された。足底感覚の認識の効果を検証した実験 3 では、RQA の

結果から足底への感覚刺激を認識することが、両脚立位課題の重心制御の多様且つ柔軟なパターンを誘発した。反面、片脚立位課題では量的動揺が増加する結果となった。

これらの一連の結果から、知覚トレーニングの応用可能性としては、以下のポイントが挙げられる。①身体感覚の認識を促す知覚トレーニングは、比較的難易度の高い姿勢制御課題（例えば、片脚立位課題や跨ぎ動作、階段昇降など）において特に効果が期待できるかもしれない②片脚立位課題への効果は、接地面である足関節の認識のみでなく手関節などの支持基底面から遠位にある身体部位においても同様の効果が期待できる③認識を行う場合は実運動同様に運動イメージを利用することでも効果が期待できるかもしれない④両脚立位課題などの細かな姿勢制御を要する課題においては、姿勢動揺を増加させる可能性がある⑤足底感覚の認識を促す知覚トレーニングでは、両脚立位課題などの安定した立位場面で、姿勢制御の柔軟性の向上に寄与できるかもしれない。

5. 結論

本研究プロジェクトにより身体感覚の認識を促す知覚トレーニングの特性が一部明らかになった。姿勢制御課題の直前に身体感覚の認識を促すことは、難易度の高い姿勢制御（片脚立位など）の効率化に貢献し得る可能性が明らかになった。その効果は、荷重関節である足関節に限定されず、遠位部である手関節でも効果が期待できる可能性がある。加えて、認識を行うためには実運動のみではなく、運動イメージを利用することが可能かもしれない。また、足底感覚の認識を促すことは、両脚立位課題において重心制御様式の多様化（柔軟な姿勢制御パターン）の実現に貢献し得る可能性が示された。これらの知見は、在宅医療現場でのトレーニングにおける科学的根拠の一部として応用されることが期待される。

謝辞

本研究の検討を開始した時より論文をまとめるまで、長期間にわたり終始親切なご指導とあたたかいご鞭撻をいただきました首都大学東京大学院 人間健康科学研究科 准教授 樋口貴広先生に心より深く感謝いたします。また再帰性定量化解析の姿勢制御分析への応用に関して、ご指導とご協力をいただきました吉備国際大学 保健福祉研究所 野中哲士博士に心より感謝致します。本研究は公益財団法人 在宅医療助成 勇美記念財団の助成を受けて実施されました。ここに謝意を表します

感想

研究プロジェクト期間に感じたことは、本プロジェクトが円滑に遂行できたのは、自分一人の力ではなく、私を取り巻く諸々の環境からの影響が大きかったという点です。まず、現場レベルの問題を基礎的研究の手法で解決する力を学ばせていただいた研究室の存在があります。今回実施するに至ったプロジェクトは、基礎と臨床の中継地点に位置するために、誰にどのような情報発信をするのか常に自問自答する必要がありました。そのような中で私の持つ研究の特性とバランスの難しさを良く理解し、建設的意見を与え続けてくれた研究室のメンバーが居なかったならば、プロジェクトを上手く進めることは出来ませんでした。また、貴財団の研究に対する理解および援助が、プロジェクトを具体的に進行させる原動力となりました。貴財団から助成を受けたことは、プロジェクトを社会還元するための具体的戦略を熟考するための機会となりました。研究遂行上最も難しかった点は、プロジェクトのタイムラインを設定し、情報公表手段である論文化を明確にターゲットとして具体化させることでした。これを実現できたのは貴財団から研究プロジェクトとしての機会を与えていただいたからに他なりません。今後は、今回の助成期間で学んだスキル活かし、可能な限り高齢化社会に有効な情報を発信できるように自助努力を続けていこうと考えています。

主要参考文献

- Connors, K.A., Galea, M.P., Said, C.M., 2009. Feldenkrais Method Balance Classes Improve Balance in Older Adults: A Controlled Trial. *Evid Based Complement Alternat Med*
- Feldenkrais, M., 1977. *Awareness Through Movement: Health Exercises for Personal Growth*. Arkana, London.
- Gage, W.H., Winter, D.A., Frank, J.S., Adkin, A.L., 2004. Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing. *Gait Posture* 19, 124-32
- Hart, C.E., Tracy, B.L., 2008. Yoga as steadiness training: effects on motor variability in young adults. *J Strength Cond Res* 22, 1659-69
- Jacobson, B.H., Chen, H.C., Cashel, C., Guerrero, L., 1997. The effect of T'ai Chi Chuan training on balance, kinesthetic sense, and strength. *Percept Mot Skills* 84, 27-33
- Jeka, J.J., Lackner, J.R., 1994. Fingertip contact influences human postural control. *Exp Brain Res* 100, 495-502
- Lackner, J.R., DiZio, P., Jeka, J., Horak, F., Krebs, D., Rabin, E., 1999. Precision contact of the fingertip reduces postural sway of individuals with bilateral vestibular loss. *Exp Brain Res* 126, 459-66
- Li, J.X., Xu, D.Q., Hong, Y., 2008. Effects of 16-week Tai Chi intervention on postural stability and proprioception of knee and ankle in older people. *Age Ageing* 37, 575-8
- Li, J.X., Xu, D.Q., Hong, Y., 2009. Changes in muscle strength, endurance, and reaction of the lower extremities with Tai Chi intervention. *J Biomech* 42, 967-71
- Perrin, P.P., Jeandel, C., Perrin, C.A., Bene, M.C., 1997. Influence of visual control, conduction, and central integration on static and dynamic balance in healthy older adults. *Gerontology* 43, 223-31
- Riemann, B.L., Myers, J.B., Lephart, S.M., 2003. Comparison of the ankle, knee, hip, and trunk corrective action shown during single-leg stance on firm, foam, and multiaxial surfaces. *Arch Phys Med Rehabil* 84, 90-5
- Soames, R.W., Atha, J., 1982. The spectral characteristics of postural sway behaviour. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 49, 169-77
- Son, J., Ashton-Miller, J.A., Richardson, J.K., 2009. Frontal plane ankle proprioceptive thresholds and unipedal balance. *Muscle Nerve* 39, 150-7
- Thornton, E.W., Sykes, K.S., Tang, W.K., 2004. Health benefits of Tai Chi exercise: improved balance and blood pressure in middle-aged women. *Health Promot Int*

19, 33-8

- Ullmann, G., Williams, H.G., Hussey, J., Durstine, J.L., McClenaghan, B.A., 2010. Effects of Feldenkrais exercises on balance, mobility, balance confidence, and gait performance in community-dwelling adults age 65 and older. *J Altern Complement Med* 16, 97-105
- Wikstrom, E.A., Naik, S., Lodha, N., Cauraugh, J.H., 2009. Balance capabilities after lateral ankle trauma and intervention: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 41, 1287-95
- Winter, D.A., Patla, A.E., Frank, J.S., 1990. Assessment of balance control in humans. *Med Prog Technol* 16, 31-51
- Xu, D., Hong, Y., Li, J., Chan, K., 2004. Effect of tai chi exercise on proprioception of ankle and knee joints in old people. *Br J Sports Med* 38, 50-4