

氏名	外山 寛
生年月日	
本籍	北海道
学位の種類	博士（学術）
学位記番号	博乙第136号
学位授与の日付	平成9年3月25日
学位授与の要件	論文博士（学位規則第4条第2項）
学位授与の題目	上肢運動と下肢運動の干渉現象からみた自動化水準の検討
論文審査委員	（主査） 高野 成子 （副査） 藤原 勝夫, 定塚 謙二 山本 長三郎, 永坂 鉄夫

学位論文要旨

It may be necessary to consider the functional specialization of the upper and lower limbs acquired as a result of the upright position to investigate human motor control. From such a reason, I investigated functional specialization of the upper and lower limbs from a view point of automatization of motor control. The results may be summarized as follow: (1) The automatization level of limb movement can be precisely evaluated by analyzing the degree of interference between upper and lower limb movements when the subjects perform transitory upper or lower limb movement during periodic movement of the other limb. (2) The automatization level of upper limb movement is lower than that of lower limb movement in children and adults. (3) The developmental progression of automatization of upper and lower limb movements of females is faster than males. (4) The automatization level of limb movement changes by learning repeatedly motor skills of limbs. (5) In company with the automatization of periodic limb movement, transitory limb movement is inserted only at certain time phases of periodic limb movement, in which phases the interference between upper and lower limb movements is extremely small.

I. 目的

ヒトの随意運動の調節について研究する場合には、直立二足性の獲得による上肢と下肢の機能分化を考慮に入れる必要があると考えられる。基本的なロコモーション様式が直立二足性へ移行することで、下肢は体を支持し移動する機能を果たすようになり、上肢はそれらの機能から解放されて多様で緻密な作業動作ができるというように、機能分化が生じたと考えられている。上肢運動と下肢運動の調節様式を比較すると、下肢では姿勢保持や歩行に代表されるような自動的な調節が多く行われ、上肢では視覚などの感覚情報の強い

関与のもとで随意的な調節が多く行われている。

日常生活やスポーツで行われる各種の運動は、上肢と下肢の機能分化を基礎としておりと考えられ、しかも上・下肢の運動を組み合わせることが多々なされる。このような組み合わせ運動では、両運動間の干渉が小さいことが有利に作用することもしばしばあると推察される。上肢ないし下肢の左右同時の運動を扱った研究では、一方の運動の自動化が進むにつれて、他方の運動を同時に行った場合の干渉が減少すると報告されている。自動化による運動間の干渉の減少は、運動調節に関与する中枢の主体が上位から下位へ移行することで、上位中枢は他の身体部位の運動を随意的に遂行することが可能になることで生じると仮定されている。このような運動間の干渉という観点を上・下肢の組み合わせ運動に導入することで、上・下肢の機能分化を運動の自動化の様相から分析的にとらえることができると考えられる。そこで以下に示す5項目を設け、上肢運動と下肢運動間の干渉の分析を通じて、上・下肢運動の自動化水準について検討した。

1. 下肢運動に対する上肢運動の干渉
2. 上肢運動と下肢運動の自動化水準
3. 発育に伴う自動化水準の変化
4. 自動化水準に及ぼす運動学習の影響
5. 上肢運動の挿入時点と下肢運動の自動化

II. 方法

1. 被験者：上・下肢運動間の干渉による自動化水準の評価法を確立するために一般成人107名を、自動化水準の基礎資料を得るために一般成人46名を、発育に伴う自動化水準の変化をみるために保育園児と小学生331名を、四肢の特異な運動学習の影響をみるためにサッカー部員17名とバスケットボール部員を14名を被験者とした。その他に必要なに応じて被験者を加えた。

2. 試行内容：自動化の対象となる運動はフィードバック制御を要する運動であると考えられ、そのような運動のひとつに周期運動があげられる。フィードバック制御に強く関与する中枢が上位から下位へ移行することで、自動化がなされることが考えられている。これに対して、一過性の運動の発現には上位中枢が必ず関与することが考えられている。したがって、周期運動の調節に上位中枢が強く関与しているほど、その周期運動中に一過性の運動を挿入することによる干渉が顕著に現れるものと推察される。すなわち、干渉の大きさから周期運動の自動化水準を評価することが可能であると思われる。このような観点から、すべての項目において、上肢ないし下肢の周期運動中に他肢の運動を一過性に挿入させる試行を採用した。なお、項目1～4では被験者に任意のタイミングで一過性の運動を挿入させ、項目5では周期運動の各時相で強制的に挿入させた。

3. 実験と分析の方法：下肢の周期運動には、主に左右交互の足踏み運動と足関節の屈伸運動（足関節運動）を用いた。これらの運動中に挿入する一過性の上肢運動は、項目1～4では掌屈運動とし、項目5では肩関節運動とした。上肢の周期運動には、左右交互の肩関節ないし手関節の屈伸運動（肩関節運動、手関節運動）を用い、これらの運動中に一過性の底屈運動を挿入した。分析は、一過性の運動の挿入による周期運動の周期の変化と一過性の運動の挿入時点に焦点をあてて行った。

III. 結果および考察

1-1. 足踏み運動と足関節運動に対する一過性の上肢運動の干渉

①足踏み運動と足関節運動を単独で行った場合、周期の変動は前者の方が小さかった。また、自然歩行の頻度に近い毎分120回の足関節運動は、毎分160回と毎分200回の頻度に比べて、周期の変動が小さかった。これらは、下肢運動の自動化水準の違いを示していると考えられた。

②足踏み運動と足関節運動中に一過性の上肢運動を挿入した場合、周期の変化は足踏み運動の方が極めて小さかった。また、毎分120回の頻度の足関節運動は、毎分160回と毎分200回の頻度に比べて周期の変化が小さかった。

③これらの結果から、周期的肢運動の自動化水準が一過性の肢運動を挿入した場合の干渉度によって明確に評価できると考えられた。

1-2. 足踏み運動と足関節運動に対する一過性の上肢運動の干渉の性差

①男女に共通して、足踏み運動と足関節運動を単独で行った場合の周期の変動は、前者の方が小さかった。これは、下肢運動の自動化水準の違いを示していると考えられた。

②上記の周期的下肢運動中に一過性の上肢運動を挿入した場合の周期の変化は、男女とも、足踏み運動の方が極めて小さかった。このことから、男女のいずれにおいても周期的肢運動の自動化水準が一過性の肢運動を挿入した場合の干渉度によって明確に評価できると考えられた。

③女子は、男子に比べて足関節運動中に一過性の上肢運動を挿入した場合の周期の変化が有意に大きかった。この結果は、女子における足関節運動の自動化水準が男子に比べて低いことを示すものと考えられた。

④足踏み運動でも足関節運動でも、一過性の上肢運動の挿入は左ないし右の足底が接地を開始する直前から直後の時相に集中した。この傾向は足踏み運動で一層明確であり、女子では両下肢運動の間に有意差が認められた。この結果から、下肢運動の自動化には特定の時相で上肢運動を挿入するという特性があると推察された。

1-3. 歩行時の下肢運動に対する一過性の上肢運動の干渉

①足底歩行でも爪先歩行でも、一過性の上肢運動の挿入による周期の変化は極めて小さく、歩行様式の違いによる有意差は認められなかった。本実験とこれまでの実験で、一過性の上肢運動の干渉が顕著に認められた周期的下肢運動は、足関節運動のみであった。足関節運動は下腿の筋群のみで行われるのに対し、他の周期的下肢運動では、さらに股関節の屈伸運動と骨盤の回旋運動を起こすための下肢帯の筋群の活動と、体移動のための推進力を生み出す大腿の筋群の活動がある。これらの知見は、下肢帯と大腿の運動が周期的下肢運動の自動化に重要な意味を有することを示していると推察された。

②一過性の上肢運動の挿入は、足底歩行でも爪先歩行でも、左ないし右の足底が接地を開始する直前から直後の時相に集中して認められた。

2. 上肢運動と下肢運動の自動化水準

①周期的下肢運動中に一過性の上肢運動を挿入した場合には、男女とも全ての試行で上・下肢の運動が履行でき、かつ下肢運動の周期の変化は小さかった。一方、周期的上肢運動中に一過性の下肢運動を挿入した場合には、約半数の試行で上・下肢の運動不履行が認め

られた。さらに、運動が履行できた試行では、上肢運動の周期に著しい変化が認められた。これらの結果は、下肢運動の自動化水準が上肢運動のそれに比べて高いことを示していると考えられた。

②周期的下肢運動が足踏み運動であるよりも足関節運動である場合に、一過性の上肢運動の挿入による周期の変化が大きかった。また、周期的上肢運動が手関節運動であるよりも肩関節運動である場合に、一過性の下肢運動の挿入による周期の変化が大きかった。このような自動化水準の差異は、実験で行った周期的肢運動に類似した運動が日常生活でどの程度行われているかということと関係していると推察された。

③周期的上肢運動中に一過性の下肢運動を挿入した場合の運動不履行は、下肢で頻繁に認められた。この干渉現象は、四肢間反射を誘発する脊髄内神経機構の特性を反映していると推察された。

④足踏み運動と足関節運動時には、一過性の上肢運動の挿入が左ないし右の足底が接地を開始する直前から直後の時相に集中した。しかし、肩関節運動と手関節運動時には、一過性の下肢運動が左ないし右の手掌が接地を開始する直前から直後の時相以外でも挿入され、その場合に運動不履行が頻繁に認められた。これらの結果から、上・下肢運動の自動化には特定の時相で他肢の一過性の運動を挿入するという特性のあることが推察された。

3-1. 子供における足踏み運動に対する一過性の上肢運動の干渉

①子供では、若年者において、上肢運動の挿入による足踏み運動の不履行が認められた。また、足踏み運動が履行できた試行では、上肢運動の挿入された周期が顕著に変化した。その程度は、男女とも、4歳が最も大きく、5歳まで一般成人との間に有意差が認められた。また男女の比較では、足踏み運動の不履行が認められた人数と、上肢運動の挿入された周期が一般成人で得られた周期の変動幅を越えて変化した人数を合わせた割合は、男子の方が高く、4歳では有意な性差が認められた。さらに、上肢運動の挿入された周期のSDを子供と一般成人で比較した場合に、女子では4歳と5歳の値が有意に大きく、男子ではさらに6歳の値も有意に大きかった。これらの結果は、子供における足踏み運動の自動化水準が成人に比べて低いこと、そして年齢が進むにつれて自動化が進み、男子では7歳で、女子では6歳で成人の水準に達することを示すものと考えられた。

②年齢が進むとともに、上肢運動の挿入は左ないし右の足底が接地を開始する直前から直後の時相に集中した。この結果は、周期的下肢運動の自動化が進む過程で、一過性の上肢運動の挿入が周期的下肢運動の特定の時相に集中するようになることを示していると考えられた。

3-2. 子供における周期的な上肢運動に対する一過性の下肢運動の干渉

①子供でも一般成人でも、手関節運動中に一過性の下肢運動を挿入することによって上・下肢の運動不履行が認められた。同一年齢の子供を対象にして足踏み運動中に一過性の上肢運動を挿入した場合には、運動不履行が認められないことが既に明らかになっていることから、6歳～11歳の子供でも上肢運動の自動化水準は下肢運動に比べて低いと考えられた。

②運動不履行の出現率は、6歳で最も高かった。しかし、年齢が進むにつれてその出現率は低下し、男子では10歳で、女子では8歳で、一般成人との間に有意差が認められな

くなった。また、子供では同一年齢の女子よりも男子において運動不履行が頻繁に認められた。これらの結果は、発育に伴って上肢運動の自動化が進み、それが女子において早いことを示していると考えられた。

③6歳では、一過性の下肢運動が手関節運動の各時相でほぼ均等に挿入された。しかし年齢が進むにつれて、一過性の下肢運動の挿入は一般成人と同じく左ないし右の手掌が接地を開始する直前から直後の時相に集中するようになった。この変化に対応して、運動不履行の出現率は低下した。これらの結果は、発育に伴って上肢運動の自動化が進む過程で、一過性の下肢運動が干渉が生じないような時相で挿入されるようになることを示していると考えられた。

4. 自動化水準に及ぼす運動学習の影響

①S群（サッカー選手）とB群（バスケットボール選手）において、下肢運動の自動化水準が上肢運動に比べて高ことが示された。ただし、その自動化水準は、足踏み運動では既に示された一般成人と同じであり、足関節運動では一般成人よりも高かった。

②S群もB群も、足踏み運動と足関節運動時には、上肢運動の挿入が左ないし右の足底が接地を開始する直前から後の時相に集中した。しかし、肩関節運動と手関節運動時には、下肢運動が左ないし右の手掌が接地を開始する直前から直後の時相以外でも挿入されることが多く、その場合に上・下肢の運動不履行が頻繁に認められた。

③S群は、B群に比べて足関節運動の自動化水準の高いことが示された。一方、B群はS群に比べて肩関節運動と手関節運動の自動化水準の高いことが示され、その傾向は肩関節運動で顕著であった。

④以上の結果から、直立二足性を基本とする日常の運動学習によって獲得されたヒト特有の上肢運動と下肢運動の自動化水準が、四肢の特異な運動学習によって変化すると考えられた。

5-1. 一過性の肩関節運動の挿入時点と足踏み運動に対する干渉

①一過性の肩関節の屈曲運動と伸展運動の挿入は、足踏み運動の全ての時相で可能であった。しかしいずれの肩関節運動も、左ないし右の足底が接地を開始する直前から直後の時相で挿入された場合は足踏み運動の周期に有意な変化がなく、それ以外の時相で挿入された場合は周期が有意に短縮した。この知見と既に得られている知見からは、肢運動の自動化に伴って干渉が起きないような時相で他肢の運動を挿入するようになることが裏付けられると考えられた。

②肩関節の屈曲運動と伸展運動を挿入する時相の違いによって足踏み運動に対する干渉の程度が異なる現象には、上・下肢間にみられる反射特性が関係していると考えられた。

5-2. 足踏み運動時の肩関節運動の任意挿入時点と足踏み運動への干渉の年齢変化

①一般成人では、一過性の肩関節屈曲運動の挿入が左ないし右の足底が接地を開始する直前から直後の時相に集中した。しかし6歳では、足踏み運動の全ての時相で均等に肩関節屈曲運動が挿入された。そして年齢が進むとともに、一般成人と同じ時相に集中して肩関節屈曲運動が挿入されるようになった。

②どの年齢においても、肩関節屈曲運動の挿入が左ないし右の足底が接地を開始する直

前から直後の時相でみられた場合にのみ、足踏み運動の周期に有意な変化が認められなかった。また、年齢が進むにつれて肩関節屈曲運動の挿入が集中する時相は、足踏み運動の周期に変化が生じない時相であった。

③以上の結果は、干渉が起きないような時相で上・下肢の運動を組み合わせるという自動化の特性が発育に伴って明確になることを示していると考えられた。

学位論文の審査結果の要旨

本論文の審査は、各審査委員による提出論文内容の慎重審査と平成8年12月3日開催の論文提出者による口答発表、質疑応答の結果をもとに行われ、同日の審査委員会において次の通り判定した。

本論文は、直立二足性の獲得による上・下肢の機能分化の問題を、中枢の階層性に由来する随意運動の自動化の観点から検討した研究が基礎となっている。本研究ではまず、随意運動の自動化水準(level of automatization)の評価法について検討した。自動化水準が高いと考えられる周期運動(歩行運動など)では、低い周期運動(足底屈運動など)に比べて、運動中に挿入された一過性の随意的他肢運動による運動の乱れ(他肢運動による干渉)が小さかったことから、他肢運動による干渉の程度によって自動化水準を評価しうることを立証した。この方法を用いて以下の点を明らかにした。(1) 下肢運動の方が上肢運動に比べて自動化水準は高レベルにあった。しかし、いずれの運動においても自動化水準は運動様式に依存していた。(2) いずれの肢運動においても、自動化水準は発育とともに向上し、また成人の水準に達する年齢は、上・下肢間で異なるが、女兒の方が男児よりも早かった。(3) 上肢または下肢を重点的に使用するスポーツ訓練(運動技能学習)をすると、訓練肢の方に自動化水準の向上が見られた。(4) リズミカルな肢運動中、運動周期の様々な時点に他肢運動を強制的に挿入させた場合起こる干渉の程度は挿入時点に依存した。挿入を任意に行わせた場合、自動化が進むに従い、挿入行動は干渉の小さい時点に集中した。これらの現象には四肢間反射の関与の可能性が示唆された。

以上の研究成果は、随意運動の自動化の発達と学習、上・下肢運動の機能分化に関する研究分野に新知見を付与するものとして高く評価できる。よって、本論文は博士論文に値するものと判定した。