

論文審査の結果要旨

論文題名：

非対称歩行環境での歩行適応に貢献する肢体運動の解析

申請者氏名：平田 恵介

審査の所見

<論文課題概要>

ヒトは中枢神経系で運動指令を生成することによって、様々な環境に適応した二足歩行を実現している。運動指令は肢体間協調 (interlimb coordination) によって、左右肢の運動を調節しているが、その機序の詳細は未解明である。近年、この歩行調節機構の研究に split-belt treadmill (左右独立したベルトで構成される歩行機器で、左右異なる速度のベルト上を歩行する実験課題) が用いられている。この機器は、片麻痺者の対称歩行の再獲得を促すリハビリテーション機器としての応用が試みられている。しかしそのリハビリテーションとしての介入効果は、患者ごとに大きく異なる。つまりどのような片麻痺者に適用すると対称歩行の再獲得が得られるのか、というコンセンサスは得られておらず、これが臨床応用を妨げている。最大の問題点は、split-belt treadmill による非対称歩行環境での歩行適応において、肢体の協調運動が本質的に何に寄与しているかが不明である点にあると言える。

<研究内容>

そこで本研究では、非対称歩行環境への歩行適応における肢体運動の影響を明確にすることを目的とした。踵接地期、動的な力学的安定性、関節可動域の影響の3点に注目し、健常人と脳卒中片麻痺者に対して split-belt treadmill 歩行実験を実施した。

研究 I では、健常成人の split-belt treadmill 課題での歩行適応において、踵接地期の床反力制動成分ピーク時に前脚 CoP (Center of Pressure)、CoM (Center of Mass)、そして CoM からの垂線がなす角度 (CoM-CoP 角: 歩行時の動的な力学的安定性を表す変数として知られる) が左右対称性を再獲得していることを見いだした。すなわち、左右下肢の相互作用によって調整される時空間変数 (interlimb parameter) としては、ステップ長と両脚支持時間等が知られるが、新たに別の時空間変数を発見したことを意味し、ベルト速度の非対称な条件で、全身体と前脚の動的に安定性の高い相対的位置関係であることを示唆している。次に運動力学的分析として、CoP、CoM、床反力鉛直、前後成分を用いた倒立振り子モデルを用いて、前脚床反力制動成分ピーク時には、後脚からの反力による CoM への影響が限りなく小さいことを確認した。これにより、前脚床反力制動成分ピーク時の前脚 CoM-CoP 角が interlimb parameter として扱うことの妥当性を担保した。

研究 II は、片麻痺者を対象にする前段階の研究である。健常人の片側の肘もしくは膝関節に物理的運動制限を加えた条件下で split-belt treadmill 課題を与え、肢体間協調性における肢体の物理的運動制限の影響の有無を検討した。結果として、片側の軽微な運動制限であっても、肢体間協調性に悪影響を及ぼすことを見いだした。一方で CoM-CoP 角の適応的变化には影響がなく、片麻痺者の対象におけるアウトカムとしての妥当性を確認した。

研究Ⅲでは、脳卒中慢性期片麻痺患者を対象にしている。課題遂行において CoM-CoP 角が再度左右対称性を再獲得できたか否かの 2 群に患者を分類して検討した。Split-belt treadmill 歩行課題がもたらすベルト速度の左右非対称な歩行環境に歩行を適応させる上では、接地において力学的安定性の高い全身との相対位置に前脚を予測的に配置できることが片麻痺者の歩行適応能力を決定する因子であることを特定した。

<科学的到達・新規性>

Split-belt treadmill での非対称歩行環境への歩行適応において、新規の時空間変数を発見した点に、本研究の重要な価値がある。また脳卒中片麻痺者でも、非対称歩行環境において、接地した前脚と身体を力学的に有利な相対位置へと配置し、それを麻痺側、非麻痺側下肢それぞれで同様に収束させることができることが、歩行適応能力の本質であることを明らかにした。本研究結果は、健常人と疾患者、それぞれの実験結果を、動作解析と運動力学による適切な実験手法と処理によって導かれている。本論文を構成する 3 研究は、ともに査読付国際学術誌に掲載されていることも、その学術的な信頼性を保証するものである。

<発展>

本研究の内容は、脳卒中片麻痺者に対して split-belt treadmill が歩行学習を促す介入手段としての蓋然性と適用範囲の一端を示した。すなわち歩行適応が不十分であった脳卒中片麻痺者で、前脚と身体を力学的安定性の高い相対的配置が妨げられていたことを確認した。このことは、健常人だけでなく疾患者においても、歩行には個人特有の定常性を持っており、その本質は左右対称であることではなく、両下肢が全身との関係において力学的均衡性が保たれている状態にあることを意味している。さらに得られた知見から、脳卒中片麻痺者のリハビリテーション介入にあたり、時空間変数の左右対称に近づけることを画一的な目標とすることに対し、再考の余地があることに言及した。このように本研究は、実臨床に関連する示唆を与え、神経系リハビリテーション領域におけるさらなる発展性が見込まれる。

本研究は、ヒト歩行適応における新たな知見を提供するものであり、健康科学の分野における意義は大きいと判断される。

以上より、審査員一同は平田恵介氏が埼玉県立大学大学院 博士（健康科学）の学位授与に値すると認定した。

【審査員】

主査：埼玉県立大学大学院保健医療福祉学研究科 教授 滑川 道人

副査：埼玉県立大学大学院保健医療福祉学研究科 准教授 石岡 俊之

副査：東京大学大学院総合文化研究科 教授 中澤 公孝