

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	歩行における下肢関節間シナジーの形成機序とその働き
氏 名	橋爪 善光
<p>Bernstein は熟練工の運動解析の結果、中枢神経系による運動制御においては、個々の関節運動や筋活動の試行毎のばらつきは許容される一方で、手先位置などの運動タスク達成において特に重要な少数の制御量のみが調節されていると結論づけた。歩行中の下肢の関節軌道にも一歩ごとにばらつきがあるが、例えば、遊脚中期に足先が地面に最も近づきつまずきが生じやすくなる Minimum Toe Clearance (MTC) の瞬間においては、股関節に対する足先高さのばらつきを抑えるように下肢の各関節角のばらつきを相殺する関節間の連携（関節間シナジー）が働くことが報告されている。本研究では、(1)このような歩行中の関節間シナジーに加齢による変化はあるか、(2) 関節間シナジーによって制御されている量は歩行中の時期に応じて異なるのか、(3) 歩行中の関節間シナジーの形成において下肢のどの関節が特に寄与しているのかを検討した。</p> <p>本研究では歩行に影響のある既往歴のない健康な若年者 12 名と高齢者 6 名の自然歩行中の股、膝、踝、足先の矢状面内の軌道を計測し、被験者毎に 22 歩から 40 歩の関節軌道データを取得した。取得データは歩行周期で規格化し、歩行周期中の各瞬間において Uncontrolled Manifold (UCM) 解析を用いて股関節に対する足先および踝の水平位置、高さ、水平速度、および鉛直速度のばらつきを抑える関節間シナジーの強さを定量評価した。その結果、第一に、若年者と高齢者ともに、後期両脚支持期においては股関節位置のばらつきを、MTC の瞬間には足先高さのばらつきを抑える関節間シナジーが働いており、これらの関節間シナジーの働きに加齢による有意差は認められないことを確認した。MTC の瞬間においては、高齢者の一歩ごとの脚姿勢のばらつきは若年者に比べて有意に大きかったが、関節間シナジーの働きによって足先高さのばらつきへの影響は抑えられていた。この結果は、両脚支持期や MTC における股関節や足先高さの制御が歩行実現のために重要であることを示唆している。</p> <p>第二に、関節間シナジーにより制御される量が歩行周期中の時期に応じて如何に異なるかを調べた結果、前期両脚支持期から片足支持期においては足先に対する股関節の水平速度、後期両脚支持期から遊脚中期においては股関節に対する足先高さ、遊脚終期においては股関節に対する踝の鉛直速度のばらつきを抑える関節間シナジーが働いていることが明らかになった。すなわちこの結果は、立脚期においては歩行速度を、遊脚期には足底部分のうち地面に近くなる部位の高さや速度を調整するように、歩行中の時期に応じて関節間シナジーが動的に再編成されていることを示唆する。</p> <p>第三に、歩行中の関節間シナジーの形成に強く寄与している関節を調べた結果、歩行周期中の多くの期間において足関節の寄与が大きいことが明らかになった。すなわち、足関節運動は歩行において重要な制御量のばらつきを抑えるのに大きく寄与していることを示唆する。さらに、前期両脚支持期では股関節が、片足支持期においては膝と足関節の 2 関節が強く寄与していた。前期両脚支持期では股関節によって上体を前に引き寄せ、片足支持期では膝関節と足関節によって上体を前に押し出す時期である。この両時期では股関節の水平速度のばらつきを抑える関節間シナジーが働く点で共通しているが、その形成に寄与する関節は動的に変化していることを本研究結果は示す。また、MTC の瞬間においては足先高さのばらつきを抑える関節間シナジーが極大値をとるが、この瞬間の関節間シナジーの形成には膝関節と足関節の 2 関節が強く働く。つまり、膝と足関節との連携により足先高さを調整し、つまずきを回避していることを示唆する。以上の結果は下肢関節間シナジーの形成が安定した歩行を実現するために重要であることを示唆している。</p>	

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	Formation and function of leg joint synergies during walking
氏 名	HASHIZUME Yoshimitsu
<p>Bernstein analyzed a skilled blacksmith's motion and found out that his hammer hits a given target correctly, but his joint trajectories are not constant and show variability across a series of strikes. From this observation, Bernstein concluded that in the motion control by the central nervous system (CNS), the variability of individual joint trajectories and muscle activities is accepted, however, important task-related variables for task accomplishment is adjusted. Regarding to walking movement, it has been reported that large degree of joint synergy suppresses the variance of the toe height relative to the hip position by canceling out the variance of each joint angle of the lower limbs at the moment of minimum toe clearance (MTC). In this study, we considered the following three points: (1) do the joint synergies during walking decline due to aging, (2) do the variables controlled by joint synergies change with the walking phase, and (3) how does each joint contribute to the formation of the joint synergies during walking?</p> <p>Twelve younger and six older subjects walked on a flat floor at a self-selected speed. Leg joint trajectories in the sagittal plane were recorded, and the strength of joint synergies to suppress the variances of the horizontal and vertical toe position, and horizontal and vertical toe velocity relative to the hip position were analyzed by the uncontrolled manifold (UCM) method. First, we confirmed that in both age groups, large degrees of joint synergies that stabilize the toe height at the moment of MTC and hip position in the double support phase were observed with no statistical difference between age groups. Compared to younger subjects, older subjects showed statistically higher variance components of joint angles that do not affect the foot position at the MTC; however, no statistical difference was observed in the variance components that affect the position. These results suggest that stabilization of hip position during the second double support phase and the foot height at MTC are important factors in control of walking by the CNS and aging does not affect these regulations.</p> <p>Second, we found that joint synergy worked so as to adjust the horizontal hip velocity relative to the toe position from the first double support phase to the single support phase, , then the toe height relative to the hip position from the second double support phase to middle of swing phase, finally the vertical ankle velocity at the end of swing phase. These results suggest that the toe or ankle position is selected as a controlled variable according to the distance from the ground during walking and the switching of the joint synergy occurs so as to stabilize the controlled variable.</p> <p>Third, we found that the ankle joint contributed to the formation of joint synergy in most of a gait cycle. Furthermore, the hip joint in the first double support phase and the knee and ankle joint in the single support phase also contributed to a large extent. These results show that the contribution of each joint to the joint synergy formation changes dynamically. In the joint synergy that suppresses the variance of the toe height at the moment of the MTC, the contribution of knee and ankle joints is large. Therefore, the cooperation between these joints is important for the avoidance of tripping. The results of this study suggest that formation of the leg joints synergy is important in order to realize a stable walking.</p>	

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

（論文博士用）

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博乙 第	号	氏 名	橋爪 善光
最終試験担当者		主 査	西 井 淳	
		審 査 委 員	山 本 隆	
		審 査 委 員	末 竹 規 哲	
		審 査 委 員	浦 上 直 人	
		審 査 委 員	岩 楯 好 昭	
【論文題目】				
歩行における下肢関節間シナジーの形成機序とその働き Formation and function of leg joint synergies during walking				
【論文審査の結果及び最終試験の結果】				
<p>歩行中の脚関節軌道は一步ごとに若干異なるが，各脚関節軌道のバラツキは無相関ではなく，例えば足先位置のバラツキを抑えるような脚関節間の相補的な調節（関節間シナジー）がしばしば働く。本論文は，歩行運動の制御機序を関節間シナジーに着目して推定することを目的としており，その結果について以下のように報告している。</p> <p>第二章では，関節間シナジーを定量評価する手法であるUCM (Uncontrolled Manifold) 解析についての説明を行っている。</p> <p>第三章および第四章では，それぞれ若年者(21.8±2.2才)及び高齢者(72.2±5.3才)を被験者とする自由歩行の計測実験により取得した股・膝・踝関節軌道データに対してUCM解析を行い，股関節に対する足先位置及び速度のばらつきを抑える脚関節間シナジーを評価した結果を以下のように説明している。若年者および高齢者のいずれにおいても，躓きが生じやすい遊脚中期のMTC (Minimum Toe Clearance)の瞬間には足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーが，重心移動を脚間で移動させる両脚支持期においては股関節位置のばらつきを抑える関節間シナジーが観察されるが，関節間シナジーの働きの強さに加齢による有意差は認められない。MTCの瞬間における各関節角度の一步毎のばらつきには加齢による有意な増加が認められるが，このばらつきの増加が足先の高さに及ぼす影響は関節間シナジーによって抑えられている。</p> <p>第五章では，関節間シナジーによって調整されている量が，歩行中の時期に応じて足先以外の部位の位置や速度に変化している可能性について検討し，以下のように報告している。脚運動の一周期中の各時期において関節間シナジーにより調整される量は，立脚期には股関節の水平速度および高さ，足先が下方に向く遊脚開始からMTCまでの期間においては足先高さ，足先を踵部より持ち上げるMTCから踵接地に向かう期間においては踵部の速度の鉛直成分と変化する。この結果は，中枢神経系が関節間シナジーを歩行中の時期に応じて動的に再編成することにより，歩行の安定化を図っていることを示唆している。また，遊脚期において，足部のうち地面により近い部位の位置や速度の鉛直成分を調整するように関節間シナジーが形成されていることは，躓きによる転倒の防止に寄与すると考えられる。</p>				

第六章では、関節間シナジーの形成に各関節運動がどの程度寄与しているかを評価する手法を提案し、その手法により、足先位置のばらつきを抑える関節間シナジーの形成には足関節が特に重要な役割を果たしていることを明らかにしている。歩行運動のリハビリにおいては足関節を固定する方法がしばしば用いられるが、この方法では関節間シナジーの形成という足関節の重要な機能を阻害される可能性があることを本解析結果に基づいて説明している。

最後に第七章では本論文のまとめを行うとともに、今後の課題を議論している。

本論文は、ヒトの歩行運動における脚制御においては、各関節について目標軌道を設計してそれに追従するように制御を行う工学的手法とは異なり、足先などの特定の部位の位置や速度を関節間シナジーによって調整する方法が用いられていること、そして、関節間シナジーを用いて制御される運動部位は歩行運動の一周期中の時期に応じて動的に変化することを報告する点で新規性に優れる。歩行中の関節間シナジーの働きには加齢による変化が認められないことや、関節間シナジーの形成には足関節の寄与が大きいことを報告する点でも学術的意義が認められる。

以上より、本研究は学術的意義および新規性に優れた内容であり、博士(理学)の学位に十分値するものと判定した。

公聴会においては、関節間シナジーの形成は視覚等の感覚情報によるのか、それとも他の要因があるのか、歩行中の脚運動にばらつきが生じる理由は何か、関節間シナジーに性差や個人差はあるのか、関節間シナジーの推定にはUCM解析よりも適切な方法があり得るのではないかと、後期両脚支持期においては前期両脚支持期よりも関節間シナジーが高くなるのはなぜか、後進歩行は前進歩行の逆再生とは異なるのか、歩行ロボットにおける関節間シナジーはヒトの場合と異なるのか、本研究で得られた知見は医学・工学分野に展開可能か等の質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する回答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。(関連論文 計2編、参考論文 計1編)

- [1] 橋爪善光, 垣内田翔子, 西井淳, 歩行中の下肢関節間シナジーにおける足関節の寄与, 計測自動制御学会論文集, 52(6), 310-316, 2016
- [2] J. Nishii, Y. Hashizume, S. Kaichida, H. Suenaga, Y. Tanaka, Constraint and exploitation of redundant degrees of freedom during walking, *Robotics and Autonomous Systems*, 60(5), 679-684, 2012