

機能的電気刺激による麻痺者の起立および立位の再建

Standing function restoration by functional electrical stimulation

代表研究者 東北大学医学部解剖学第一講座助手 藤田 欣也
Instructor, Dept. of Anatomy, Tohoku Univ. School of Medicine.
Kinya FUJITA

On the standing function restoration of paraplegics using Functional Electrical Stimulation, 1) feedback posture control was applied for stable standing, and 2) the cause and effect of muscle fatigue during standing was discussed.

Two I-PD feedback controllers were applied for the control of the ankle joint angles in order to stabilize the paraplegic standing posture. The presented control system reduced the fluctuation of the T5 paraplegic standing posture in sagittal plane. The fluctuation length of the center of pressure with feedback control was less than 75 percent of it with the open-loop control while 30 seconds standing between parallel bars.

The muscle fatigue is also one of the serious problems of FES, because the possible standing time is limited by the fatigue. The standing postures with long leg brace (LLB) and with two channels FES were analyzed. The knee joint flexion moment was calculated with the relationship between the center of pressure and the knee joint position. The estimated knee joint flexion moments were 16 Nm (FES) and 28 Nm (LLB). The average moment of three normal subjects was 14 Nm in extending direction. It was found that the knee joint moment of a paraplegia is significantly greater than it of normal subject. This large knee flexion moment was one of the reasons of the quadriceps muscle fatigue.

研究目的

交通事故、転落事故などにより脊髄に損傷を受けた場合には下肢あるいは四肢の完全麻痺を招き、現在これらの障害を医学的に治癒する方法は存在していない。このような脊髄の受傷による麻痺患者の動作機能を再建するために機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation) の研究が行われている。FES は四肢の運動筋の支配神経に電氣的刺激を与えて興奮を促し動作を行わせるものであり、現在のところ脊髄損傷による麻痺に対するほぼ唯一の機能再建法である。

人間の立位保持動作において、立位姿勢は力学的不安定系であり、健常人は感覚器からの情報に基づくフィードバック制御で姿勢を保持している。そこで機能的電気刺激で健常人と同様に立位保持を行うためには、フィードバック制御による安定化が必要と思われる。

またこれまでの FES による立位では数分間と

比較的短時間の立位しか可能ではなかった。この原因を明らかにすることは、FES による立位を実用的なものとするためには重要な課題であると考えられる。

本研究はこれらの問題に対して工学的手法を用いて、機能的電気刺激を用いた下肢麻痺患者の起立、立位保持動作機能の再建を目的とする。

研究経過

機能的電気刺激のこれまでの研究では、対麻痺者の補助状態での立位や歩行器を用いた歩行、四肢麻痺者の把持動作などが報告されている。機能的電気刺激を用いた日常動作再建の研究において、これまでは電気刺激の生体への影響、最適な刺激電極およびその設置部位といった医学的側面からのアプローチが主体であった。しかし機能的電気刺激においては、この刺激と筋収縮の医学的な問題のみでなく、動作に関するバイオメカニズムの問題が大きく関与してくる。特に人間の動作

は中枢の高度な制御により支配されており、生体の運動機能を再建するためには、人間の筋骨格構造や中枢の制御機能を解析、模擬することが不可欠となる。

われわれはフィードバック制御の応用を試みてきており、平行棒などにつかまらない自立状態での立位保持システムの基礎実験を行ってきた。健常人が中枢機能によってフィードバック制御を行い立位を保持しているという報告に従えば、同様の制御機能を計算機上に構築することにより立位保持が可能であると考えられる。既に健常人での基礎実験においては計算機により立位保持が可能であることが確認された。そこで本研究では姿勢変化を検出して補償するために、人間の立位姿勢を足関節を支点とする倒立振子モデルで近似してI-PD制御器を構築した。さらに本システムを用いて第5胸椎損傷対麻痺患者の平行棒内での起立時に矢状面内での姿勢制御を行った。

またこれまでの経過から、FESにより再建された立位の持続時間は数分が限度であった。この点に関して、姿勢の解析、刺激と筋収縮の関係の解析などを通して、問題点を検討し明らかにする必要性があった。そこで、1) 立位姿勢の効率の問題、特に膝関節の屈曲モーメントに関して解析を行った。2) また筋の疲労特性の問題に関して、電気刺激による収縮力の経時変化を麻痺者と健常者と比較した。

研究成果

FESによる姿勢制御システムは計算機、刺激装置、角度センサを装着した短下肢装具などから成り、姿勢傾斜は足関節角度として検出し計算機に入力される。計算機はI-PD制御演算を行い、刺激パルス強度を決定する。さらに計算機からの命令により刺激装置から出力される刺激パルスは、皮膚上の導電ゴム製表面電極を介して腓腹筋と前脛骨筋を刺激する。

健常人男性被験者の姿勢制御を行った結果、フィードバックゲインを変化させたときのシステムの基本的な挙動は2次遅れ系である一巡伝達関数から推定されるものと一致し、適切な制御係数により姿勢の安定化に有効であることが確認さ

れた。各係数を変化させて試行を行ったところ、制御器の構造から明らかなように姿勢の安定性に関与するのは比例と微分要素であり、積分要素は過大な場合を除いて影響がなかった。

第5胸椎損傷対麻痺者の姿勢制御の結果を見ると、フィードバックにより明らかに矢状面内での動揺幅が減少した。また制御を行っていない前額面での動揺幅には顕著な変化は見られない。矢状面内での動揺幅は、各5試行の平均で開ループ時に65.8 mm、フィードバック時に48.1 mmであり、フィードバックにより約27%減少した。一例につき個体差の問題は残されるがフィードバックによる安定性の増加が確認された。

FES立位における筋疲労の問題は、大腿四頭筋が疲労して収縮力が低下すると膝関節が屈曲して立位姿勢を保持できなくなるという点で顕著である。

この疲労の第一の要因と立位姿勢の効率、特に膝関節の屈曲モーメントを推定した。屈曲モーメントは膝関節と床反力の水平距離を求め、この距離と床反力の積の2倍としての求めることが可能である。第8胸椎損傷対麻痺者が長下肢装具を用いて立位姿勢を保持したとき、同じくFESで立位を取ったとき、さらに健常者が立位を取ったときの屈曲モーメントは、それぞれ28, 16, -14 Nmであった。健常者は適切な姿勢をとることにより膝関節をロックして大腿四頭筋の収縮力を低減していると言われているが、推定結果からもこれを支持する結果が得られた。他方、対麻痺者のFES立位は屈曲モーメントを補償するための大腿四頭筋力が要求される効率の悪い立位をとっていることが明らかになった。この原因は股関節を安定化するために対麻痺者がとる股関節を過伸展させたアルファベットのCの形に似た姿勢が原因であった。

また麻痺者と健常者の電気刺激による筋疲労特性は、30秒一定刺激を加えたときの低下率で麻痺者10~44%、健常者8~30%と顕著な差異は見いだせなかった。先の姿勢の効率の問題の方が影響が大であると考えられた。

今後の課題と発展

対麻痺者の FES による立位の再建において、足関節における矢状面内での姿勢制御により前後方向の動揺を低減可能であることを示し、姿勢のフィードバック制御の有効性を示した。また股関節安定化のための股関節過伸展は、膝関節屈曲モーメントの増加、すなわち大腿四頭筋収縮力の増加をもたらし、これが FES 立位における疲労の重要な要因であることを明らかにした。

最終的には下肢関節の総合的制御により効率の良い姿勢を再建することが目標であるが、そのた

めには股関節の制御や前頭面での制御など多くの問題が残されている。これらを解決してゆくことにより、安定で持続した立位を再建可能になるものと考えられる。

発表論文リスト

藤田欣也, 野口隆敏, 南谷晴之, 戸松泰介: FES による対麻痺者立位姿勢のフィードバック制御, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J75-D II(4), pp. 791-798 (平成 4 年 4 月).

藤田欣也, 野口隆敏, 南谷晴之, 戸松泰介: 対麻痺者の FES 立位における筋疲労の影響と原因, バイオメカニズム 11, 東京大学出版会, pp. 275-283 (平成 4 年 5 月).