

下肢の動作再建を目的とした FES の補助電気刺激法に関する検討

A Preliminary Study of Subthreshold Stimulation for Motor Function Restoration of Lower Limb with FES

○袁 保平(産総研/技振協) 井野 秀一(産総研) 佐藤 満(昭和大)
中島 佐和子(東大) 兪 文偉(千葉大)

Baoping YUAN, Human Technology Research Institute, AIST, and JITA
Shuichi INO, Human Technology Research Institute, AIST
Misturu SATO, Department of Physical Therapeutics, School of Nursing and Rehabilitation, Showa University
Sawako NAKAJIMA, Intelligent Modeling Laboratory (IML), The University of Tokyo,
Wenwei YU, Medical System Engineering, Chiba University

Key Words: Functional Electrical Stimulation, Auxiliary Stimulation, H-reflex (Hoffmann reflex), Lower Limb

1. はじめに

アジア諸国の中でも、日本は現在に深刻な高齢社会に直面している、日本における身体障害者の総数は 32 万人を越えており、年々増加の一途をたどる⁽¹⁾。なかでも、肢体不自由者は身体障害者のなかでも半数以上を占めており、毎年増加傾向にある。特に、脳・脊髄の血管障害や外傷によって損傷した中枢神経系運動伝導路を再接続し、その機能の回復させることは大変困難である⁽²⁾⁽³⁾。多くの場合、患者は常に介助を必要とし、その社会復帰は困難を極めている。このような問題に対して合理的かつ有効な手段として、機能的電気刺激 (FES) が注目されている。これは、脳卒中や脊髄損傷などによって麻痺した手足の運動機能を電気的な人工の迂回路によって再建するための医工学技術である⁽²⁾。しかし、FESによる動作再建を続けていると早期から筋疲労、筋緊張が出現し、長時間の動作は困難になる。

そこで、我々は臨床実験に基づいて⁽⁴⁾、FESでの筋肉収縮による動作再建方法を利用し、足上げ高度を計測した。FESと共に出力周波数 2-6kHz、±9Vの双極性の閾値下の補助電気刺激を経皮的に腓腹筋(Gastrocnemius)に与え、比較的安定・耐久的なFES動作再建を目指すことを試みた。

さらに、補助電気刺激の作用原理とプロセスに関する本質を理解するために、補助電気刺激前後の下肢のヒラメ筋の H-reflex (Hoffmann reflex)を計測し、補助電気刺激が運動ニューロンへの影響を解釈することを試みた。

2. 方法と実験

下肢動作再建の過程の中で補助電気刺激(AS)の効果及び運動ニューロンへの影響を検討するため、二つの実験を行った。ここで、補助電気刺激とは Fig. 1 にそのメカニズムを示した。

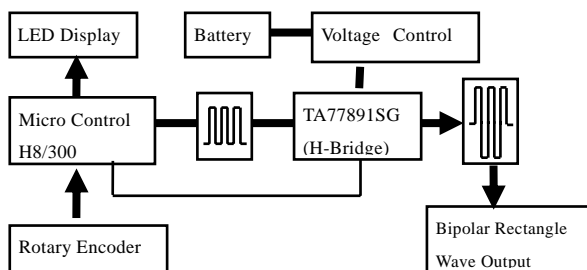


Fig.1 The diagram of auxiliary stimulation device

2-1 実験 1 (AS の効果)

被験者は 30 代の一人女性、片麻痺患者(左足に重い痙性があり)である。実験前に被験者に実験内容、目的などをよく説明し、完全同意を得た。

まず、下肢動作再建の過程で AS の効果を検討するため、実験 1 には三つのテストを設計した。

テスト 1 (AS の周波数の効果)では FES による動作再建時、AS を不同周波数に変化させ、どのような効果があるか検討する。詳細には AS を Fig. 2 のような A 点において、周波数を 2000Hz, 4000Hz, 6000Hz を変化させ、実験は一日 1 回、FES による上げ高度 (Fig. 2 の H(高さ))を計測する。刺激強度レベルの 0 から持ち上げまでの刺激電圧を徐に加え、15 分間の AS を終了した後、もう一度 FES での足の上げ高度を計測する。

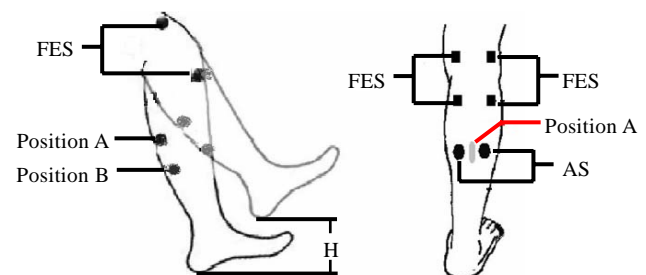


Fig. 2 The position of AS and FES in the first experiment

テスト 2 (AS の位置の効果)では、FES と AS の両方を用いて、FES の刺激位置はテスト 1 と同じ、AS は刺激位置 A か B に変化させ、脳卒中によって麻痺した手足の運動機能を再建する時、異なる位置の AS によって、異なる効果があるかを検討した。

テスト 3 (FES と AS の効果)は、AS と FES の刺激位置はテスト 1 と同様に設定し、AS がある時とないときの FES 効果を比較した。

2-2 実験 2 (メカニズムの検証)

実験 2 では、補助電気刺激の作用原理とプロセスに関する本質を理解するため、Fig. 3 のように補助電気刺激前後 15 分 (Fig.4 に示す)の下肢のヒラメ筋の H-reflex を計測し、補助電気刺激の効果を解釈することを試みる。

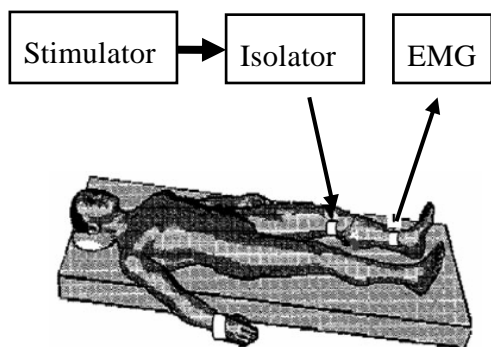


Fig.3 The measurement inducing of H-reflex

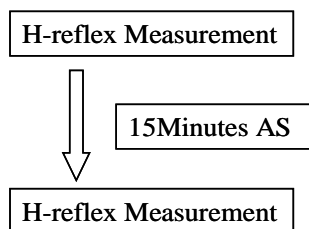


Fig. 4 The process of experiment 2

13名の被験者(年齢:20代、身長:172±10cm、体重:72±10kg、脊髄損傷や運動ニューロン損傷がなし)が本実験に参加した。実験前に被験者に実験内容や目的などよく説明し、同意書を得たうえ、H-reflex 実験を行った。しかし、そのうち3人からはH-Reflexが誘導されなかった。

実験方法としては、被験者の膝窩部で脛骨神経 (Fig. 3を参考)に、持続時間1.0msecの矩形パルスの誘導刺激電圧を加え、H-reflexは表面筋電図を用いてヒラメ筋の活動を計測した。誘導刺激強度はH波の閾値直下から、M波の最大値が得られる強度まで順次あげていく。筋電信号はBiopac Student Lab Pro System(BIOPAC Systems社, USA)で500倍に増幅し、10HzのHigh-pass-filterと2000HzのLow-pass-filterを経て、A/D変換器で、パソコンに取り込む。

3. 結果

3-1 実験1の結果

Fig. 5に示すように、FESにおける動作再建の時、4000Hzの補助電気刺激は最も高い足上げ高度をもたらした。次のテスト2においても、補助電気刺激の周波数も4000Hzにして実験をおこなった。テスト2の結果はFig. 6に示すように、異なる補助電気刺激部位(AかB)での足あげ高度も異なることが分かった。

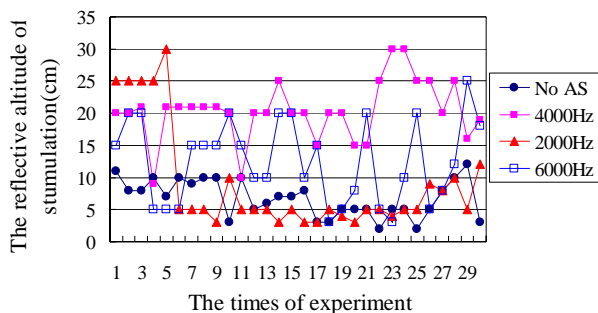


Fig. 5 The result of the first subtest: with different frequency bands

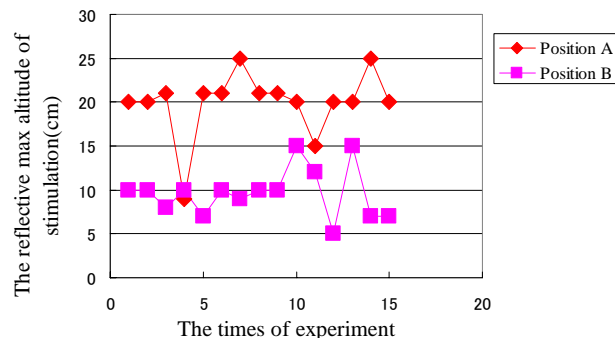


Fig. 6 The result of the second subtest: different electrode positions

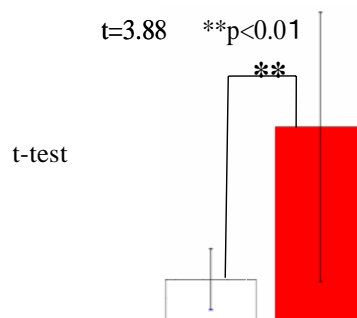
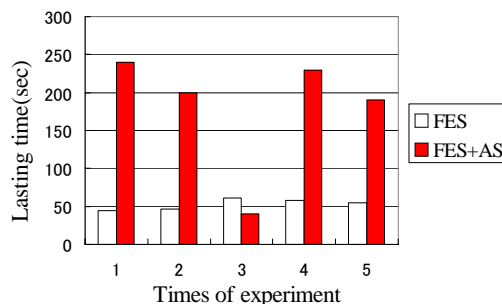


Fig. 7 The result of experiment3: condition includes AS or not

なお、FESによる動作を続けていると早期から筋疲労、重い筋緊張が出現することは多くの研究に指摘されている⁽⁴⁾。そこで、Fig.7に、横軸が実験の数、縦軸では動作再建の持続時間である。結果から単独にFESを使用、FESとASを両方同時に使用する時、動作再建の持続時間を対比して表示した。結果からFESとASを両方同時に使用すると動作再建時間が長いと示した。

3-2 実験2の結果

H波の最大値とM波の比(Hmax/Mmax)はα運動ニューロンの興奮性を示す尺度として、多く使用されている⁽⁵⁾。Fig. 8に15分のAS前と後のHmax/Mmaxの値を示している。

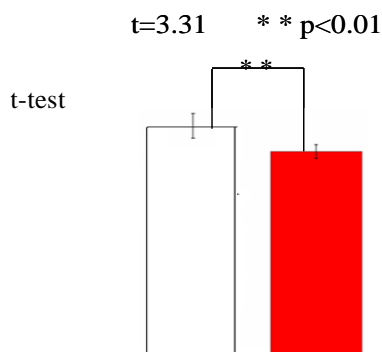
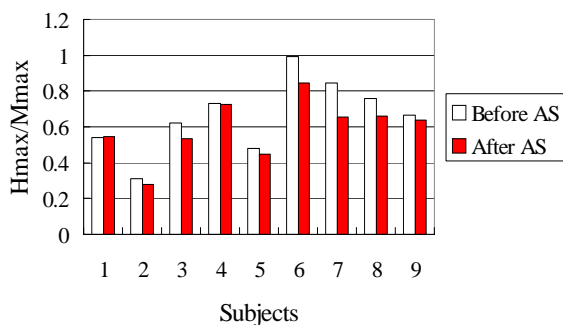


Fig. 8 The result of the second experiment: Statistic of Hmax/Mmax before and after AS

4. 考察

実験1から中周波数の双極性閾下電圧刺激が補助電気刺激としてより安定、長時間なFESを可能にしたことがわかった。近年、多くの研究では、双極性電圧刺激或いは振動刺激が運動ニューロンの興奮性を改変でき、異常な中枢神経興奮性を調節し、異常な中枢神経興奮性を抑制すること⁽⁶⁾によって、脊髄損傷者のスムーズな下肢動作を可能にしたことが示された。同時にFig.9はFESによる動作再建の時に持続困難となり、再建失敗に至ったプロセスを示す。補助電気刺激は動作再建失敗の原因である異常な筋興奮を調節する。ここで、より安定、持続的なFESを可能したと仮定できる。

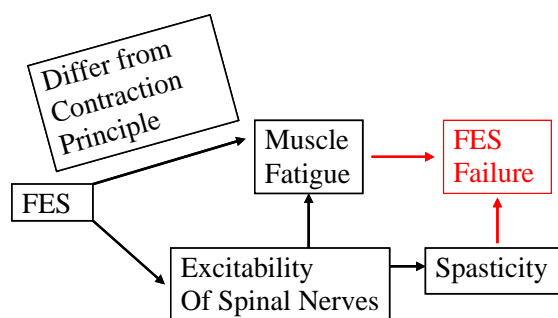


Fig. 9 The process of FES failure

その可能性を検証するための実験2では、補助電気刺激(AS)の前後のHmax/Mmaxにおいて、有意差が認められた。すなわち、ASは α ニューロンの興奮性を抑制することで特定筋の疲労や痙性を緩和し、より安定・持続な運動再建を可能したと考えている。

5. おわりに

本研究は補助電気刺激が人体に対しての影響を調査するため、二つの実験を行った。

実験1ではFESでの下肢の動作再建する時のASの補助作用について検討した。これらより、以下の結論を得られた。

- (1). 4000Hzの補助電気刺激は、筋疲労を緩和にするので、より良いFESを提供できた。
- (2). 補助電気刺激の刺激位置により、異なる反射応答(足の上げ高度)を得た。
- (3). FESとASを同時に使用する場合、FESを単独に使用する場合と比べると、FESでの動作再建の時間が長く持続することが可能であった。

実験2では、補助電気刺激前後の下肢のヒラメ筋H-reflex(Hoffmann reflex)を計測し、補助電気刺激の効果を解釈することを試みた。その結果、補助刺激後、Hmax/Mmax値は小さくなり、異常な運動ニューロンを抑制して、スムーズな運動再建が可能であることを示唆された。なお、臨床実験でASをリアルタイムに使用するためには、ASの短時間での影響と作用メカニズムを理解するのが必要である。今後は、ASはどのように α 運動ニューロンをリアルタイムに影響させているのかについて詳細に理解することが必要になってくると考えている。

参考文献

- (1) 日本厚生労働省, <http://www.mhlw.go.jp/>.
- (2) F. T. Hamabrecht, J. B. Reswich, Functional Electrical Stimulation-Application in Neural Prosthesis, Marcel Dekker, New York, 1977.
- (3) Liberson WT, Functional electrotherapy: Stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of the hemiplegic patients, Arch phys Med Rehabil Vol. 42, pp. 101-105,1961.
- (4) Baoping Yuan, Wenwei Yu, The effect of an auxiliary stimulation on motor function restoration by FES, 生体医工学シンポジウム 2008, pp. 397-402, 2008.
- (5) Hoffmann P, Beitrag zur Kenntnis der menschlichen Reflexe mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Erscheinungen. Arch. Anat. Physiol. Vol. 1, pp. 223-246, 1910.
- (6) Iwatsuki, H., Effects of vibratory stimulation on antagonist motoneuron excitability under different frequencies, J. Jpn. Phys, Ther Assoc, Vol. 18, no. 1, pp. 41-44, 1991.