

加速度センサとジャイロセンサを用いた歩行周期検出

Detection at walking cycle with accelerometer and gyroscope

○ 齊藤 哲朗 (秋田大) 正 巖見 武裕 (秋田大)
松永 俊樹 (秋田大医) 島田 洋一 (秋田大医)
正 木澤 悟 (秋田高専) 正 小林 義和 (秋田高専)

Tetsuro SAITOU, Graduate School of Akita University
Takehiro IWAMI, Akita University
Tosiki MATSUNAGA, Akita University Faculty of Medicine
Yoichi SHIMADA, Akita University Faculty of Medicine
Satoru KIZAWA, Akita National College of Technology
Yoshikazu KOBAYASHI, Akita National College of Technology

Objective. To assess the potential use of accelerometer and gyroscope as a sensor for the control of FES assisted walking for the correction of drop foot in hemiplegic individuals. A machine learning technique (Neural Network) was used for the detection of swing phase of the gait. **Methods.** Two subjects (able-bodied and hemiplegic individual) wore accelerometer and gyroscope over their anterior proximal shank. Footswitch placed on the sole of one foot recorded the heel contact and heel off times for that foot. For Neural Network training, acceleration and gyro data were processed with the input data, and the heel data was processed with the target data. The microcomputer produced output signals using the Neural Network program. The accuracy of the Neural Network detector was compared with a swing phase detector based on the heel sensor. **Results.** The largest difference in timing of the swing phase was less than 0.03 sec in normal subject and 0.02 in hemiplegic patient. **Conclusion.** The Neural Network detector could correspondingly detect the swing phase of gait. The present system has a potential to access the reconstruction of FES assisted walking in hemiplegic individuals.

Key Words: Paralytic. Drop Foot. Functional Electrical Stimulation. Neural Network.

1. 緒言

脳卒中は血管病変による脳の障害の総称であり、後遺障害として片麻痺とよばれる片側上下肢の麻痺が残存することがある。片麻痺患者の下肢では、足関節背屈筋の筋力低下により歩行中の遊脚期 (Fig.1.1) に足部が背屈できない下垂足が生じることがある。下垂足があると、床面と足部のクリアランスが十分にとれないため歩行が困難になり、転倒の危険性が増大する。現在、片麻痺性下垂足の治療には主に短下肢装具による装具治療が行われている。短下肢装具は主に足関節を固定して遊脚期の足部下垂を防ぐもので、これにより歩行障害が改善する例も多い。しかし、短下肢装具は足関節機能を制限することが主目的であり、動的な機能再建は不可能または困難であることが多かった。

1961年 Liberson ら^[1]は、脳卒中患者の片麻痺性下垂足に対し、表面電極を用いて総腓骨神経を刺激することにより、歩行遊脚期に足関節背屈を制御する試みを報告した。その後、医用工学技術の発展により電気刺激で従来困難であったさまざまな生体機能の再建が可能になり、現在は機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation; FES) と呼ばれさまざまな分野での研究が進んでいる。FESでは、脳からの指令の代わりに外付けの回路を設けて神経系を直接刺激することによって筋を収縮させ、合目的動作を再建する。

本研究グループでは FES による下垂足歩行再建の研究を行い、下垂足用 FES 装置 (Akita Heel Sensor System; AHSS) を開発した^[2]。AHSS による下垂足歩行再建では Fig.1.1 で示すように、足が地面から離れている期間に踵に取り付けた heel sensor (フットスイッチ) が OFF になることより歩行中の遊脚期を検出し、総腓骨神経を刺激して足関節を背屈する。AHSS により片麻痺性下垂足の良好な機能再建を行うことが可能になった。しかし、AHSS のみならず国内外の下垂足用

FES 装置では、踵または足底に圧センサを用いて遊脚期を検出しているため、次世代の下垂足用 FES 装置として、踵などの足部に設置したセンサではなく、電気刺激部位に近い膝付近にセンサを設置して装置の小型化と装着の簡便化を図る。その新たな技術として、本研究グループでは加速度センサとジャイロセンサを下腿に取り付け傾斜と角速度を検出し、それらを用い遊脚期の検出を行ってきたが^[3]、この方法では遊脚期検出精度の点で問題があった。そこで本研究では、遊脚期の検出方法としてパターン解析が得意なニューラルネットワーク (N.N.) を用い、精度の良い遊脚期検出システムの開発を目的とする。

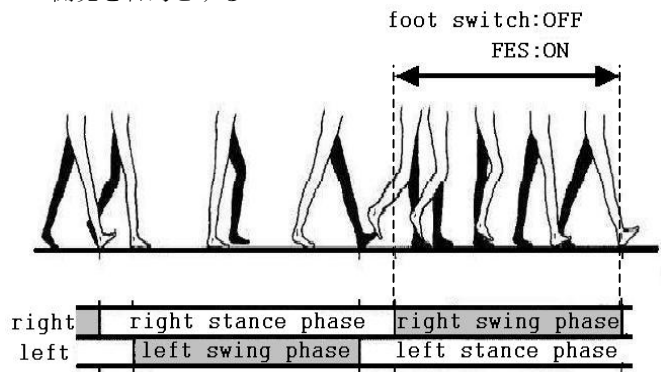


Fig.1.1 Walking cycle and swing phase

2. ニューラルネットワーク

Fig.2.1 は歩行時膝付近に取り付けたセンサの鉛直方向の加速度信号とジャイロ信号及び踵部に取り付けたフットスイッチの出力である。グラフより、加速度、ジャイロ信号は歩行時に同じパターンの波形の繰り返しを出力しているこ

とがわかる．そこで、ニューラルネットワークの得意とする学習能力とパターン認識力を用いて踵接地、踵離れのタイミング、つまりフットスイッチと同様の出力をさせることが可能と考えられる．

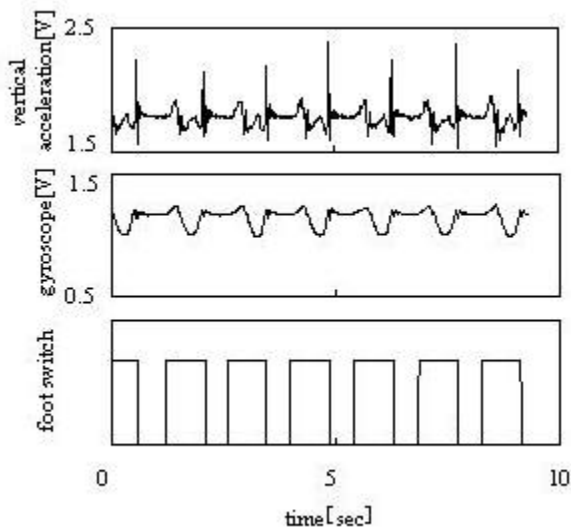


Fig.2.1 measured data

本研究では Fig.2.2 のような階層型の N.N.を用いる．構成は入力層 6，中間層 8，出力層 1 からなる 3 層構造である．入力層には歩行時の加速度，ジャイロセンサからのデータを入力する．センサ信号の種類は，垂直上下方向加速度と左右方向軸ジャイロの 2 信号を用いる．また，出力誤差を小さくするために，センサからの 1 信号につきそれぞれ 3 時点の時系列データを入力し，計 6 ニューロンとした．中間層は学習精度と遊脚期検出装置内マイクロコンピュータ処理速度とのトレードオフから 8 ニューロンとした．出力層については，結果として得たい情報が遊脚期の判断のみであるため 1 ニューロンとした．

以上の構造を MATLAB Neural Network Toolbox (Math Works) にて再現し学習を行う．学習原理は Fig.2.3 の様にあられる．教師信号は，歩行中の歩行周期を計測できるフットスイッチの信号より遊脚期を検出し用いた．学習結果として，ネットワークのそれぞれの結線重みとバイアス値が出力される．

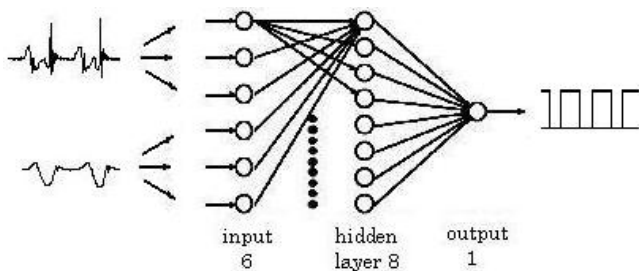


Fig.2.2 Neural network

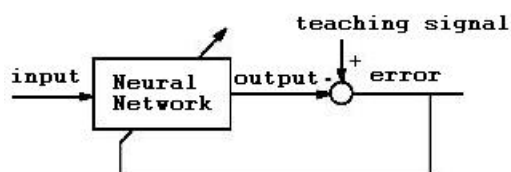


Fig.2.3 Training principle

3. 方法

3.1 被験者

被験者 1：健常男性 22歳

被験者 2：片麻痺患者 女性 63歳

麻痺側右 短下肢装具使用

3.2 センサ

歩行データ計測のために用いたセンサは次のものである．3 軸加速度センサ (H48D Hitachi Metals) と 1 軸ジャイロセンサ (ジャイロスター 村田製作所) を 1 基板上に搭載した加速度+ジャイロセンサ (Fig.3.1)．センサのサイズは 12.8mm×20.0mm である．また，踵に装着することで歩行周期を検出することができる圧センサのフットスイッチである (Fig.3.2)．

加速度+ジャイロセンサの取り付け位置は，筋を刺激するための電極とのパッケージングを考え，刺激する筋の近くとし，膝関節から約 60mm 下の脛部に取り付ける．また，教師信号及び評価に用いるフットスイッチは足底踵側の地面に接する部分に取り付けた (Fig.3.3)．

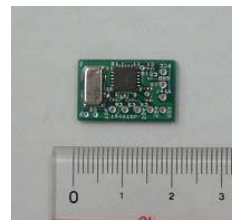


Fig.3.1 Acceleration and gyroscope



Fig.3.2 Foot switch



3.3 実験の流れ

- ①歩行時のフットスイッチ（教師信号）と加速度+ジャイロセンサのデータをデータ収集システムにより計測する．
- ②計測データをもとに PC 上の MATLAB Neural Network Toolbox により N.N. 学習をし，ネットワークの重み及びバイアスを求める．
- ③求めた重みとバイアスをもとに，パソコン上でシミュレーションを行い学習が適切に行われているか確認する．

4. 結果

学習後のネットワークに学習に用いた歩行データを入力したときの健常者と片麻痺患者の N.N. 出力結果を Fig.4.1, Fig.4.2 に示す．ここで，N.N. 出力は教師信号と同様の波形となるように学習している．グラフより健常者，片麻痺患者と

もに教師信号と N.N.出力はほぼ同じタイミングで出力された。これにより、N.N.上で遊脚期を検出できたといえる。

次に、N.N.出力の遊脚期検出の評価として Fig.4.1, Fig.4.2 中の教師信号と N.N.出力との遊脚期開始と遊脚期終了のタイミングの誤差を比較したヒストグラムを Fig.4.3~Fig.4.6 に示す。なお、N.N.出力のタイミングがフットスイッチ信号より早い場合をマイナス、遅い場合をプラスとしている。グラフより、健常者、片麻痺患者ともに多少のばらつきはあるが、健常者では遊脚期開始時において 100%が遊脚期開始前後 0.05sec 以内におさまっており、遊脚期終了時については 85%が遊脚期終了前後 0.05sec 以内に収まっている。また、片麻痺患者については遊脚期開始時において 90%が遊脚期開始前後 0.05sec 以内におさまっており、遊脚期終了時では 100%が遊脚期終了前後 0.02sec 以内に収まっている。このことから実際の FES 刺激タイミングにおいて違和感なく使用できると考えられ、遊脚期を適切に検出できているといえる。

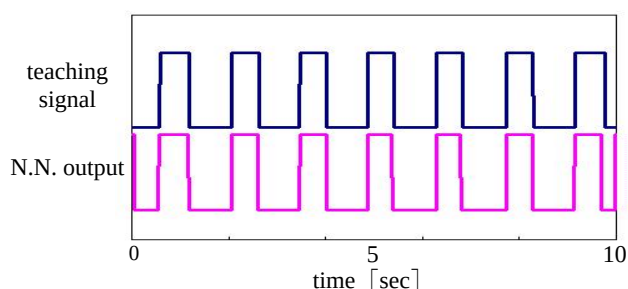


Fig.4.1 normal subject's simulation result

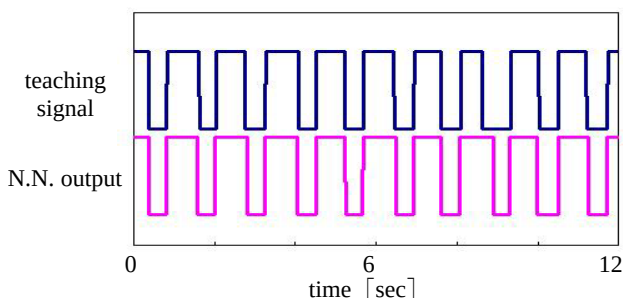


Fig.4.2 patient's simulation result

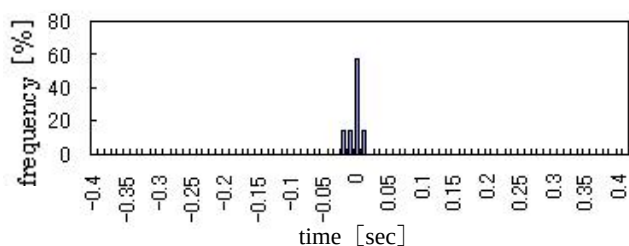


Fig.4.3 Normal subject's swing phase beginning timing

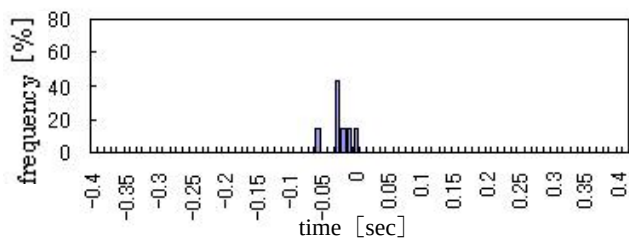


Fig.4.4 Normal subject's swing phase end timing

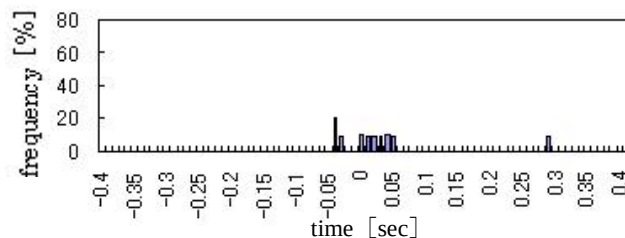


Fig.4.5 patient's swing phase beginning timing

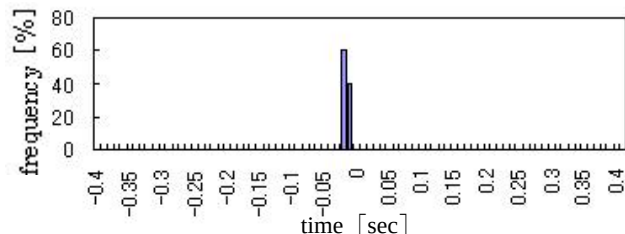


Fig.4.6 patient's swing phase end timing

5. 結言

FES による下垂足歩行再建では、フットスイッチが遊脚期の検出に最も多く用いられてきた。われわれも、経皮的埋め込み電極を用いた FES システムでフットスイッチを用い良好な結果を得られたが^[4]、フットスイッチの耐久性やコード接続などの改善が必要であり、膝関節付近で遊脚期を検出できるセンサの利用が望ましいと考えられる。

本研究では、下腿付近に装着したセンサからニューラルネットワーク学習により歩行周期を検出可能であることが PC 上確認できた。今後はプログラムをマイクロコンピュータに実装し、実際に歩行中の遊脚期をセンサ信号からリアルタイムに検出可能か検証を進めていきたい。

参考文献

- [1] Liberson WT, et al: Functional electrotherapy; Stimulation of the peroneal nerve synchronizad with. the swing phase of the gait of hemiplegic patients. Arch Phys Med Rehabil, 42, pp.101-105(1961).
- [2] 小西奈津雄, 島田洋一, 佐藤光三, 加賀谷斉, 渡辺英敏, 松永俊樹, 千葉光穂, 奥山幸一郎, 鈴木均, 黒田利樹: AKITA HEEL SENSOR SYSTEM による片麻痺患者の尖足歩行の矯正, 日本パラプレジア医学会雑誌, 9, pp.292-293(1996).
- [3] 山岡梓: 傾斜センサとジャイロセンサを用いた FES スイッチ回路の製作, 秋田大学工学資源学部機械工学科平成, 18 年度卒業論文
- [4] Simada Y, et al: Clinical Application of Peroneal Nerve Stimulator System Using Percutaneous Intramuscular Electrodes for Correction of Foot Drop in Hemiplegic Patients, Neuromodulation 9, pp.320-327(2006).
- [5] 熊沢逸夫: 電子情報通信工学シリーズ 学習とニューラルネットワ (1998), 森北出版株式会社
- [6] 西川禎一: システム制御情報ライブラリー ニューラルネットと計測制御, (1995), 朝倉書店
- [7] 赤澤堅造, バイオメカニズム・ライブラリー 生体情報工学, (2001), 東京電機大学出版所
- [8] 阿部善博: 加速度センサによる歩行床反力の推定, 秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程機械工学専攻, 平成 13 年度修士論文