

FESのための遊脚期検出システムの開発と評価

Development and Evaluation of Gait Cycle Detection System for Functional Electric Stimulation

○ 武田 康平 (秋田高専) 正 木澤 悟 (秋田高専)

Kouhei TAKEDA, Akita National College of Technology

Satoru KIZAWA, Akita National College of Technology

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

1. 緒言

下垂足患者は歩行において爪先を十分な高さまで上げられず、躓きやすく危険である。近年、脳の代わりに外部の装置から電気刺激を与える機能的電気刺激（以下 FES）を用いた歩行再建が研究されている。FES を用いた下垂足患者の歩行再建においては、遊脚期中に総腓骨神経を電気刺激して足を背屈させることで動作の再建が可能となる。このため、歩行中遊脚期を検出する装置が必要である。従来装置では踵部にヒールスイッチを取り付けて遊脚期を検出していたが、耐久性や使用者の不快感などの問題があった。これを踏まえ、本研究では片麻痺患者の膝蓋腱上に慣性センサを装着し、Neural Network(以下 N. N.)と組み合わせることで遊脚期を推定するシステムを開発し、歩行再建における新しい FES システムを提案した。またシステムの有用性を検証するため、臨床実験の前段階として健常者を対象として実験を行った。

2. 実験装置の構成

Fig. 1 に遊脚期推定システムの構成と装着図を示す。システムは遊脚期推定システム本体、慣性センサ(3 軸加速度センサ, 1 軸ジャイロセンサ), ヒールスイッチ, データロガーから構成され、データロガーは、歩行時の全てのセンサとヒールスイッチの歩行状態を記録するためのものである。なお、ヒールスイッチおよび慣性センサは右足に装着した。また、N.N.学習および推定精度の評価に用いるヒールスイッチは靴底の踵部に入れている。

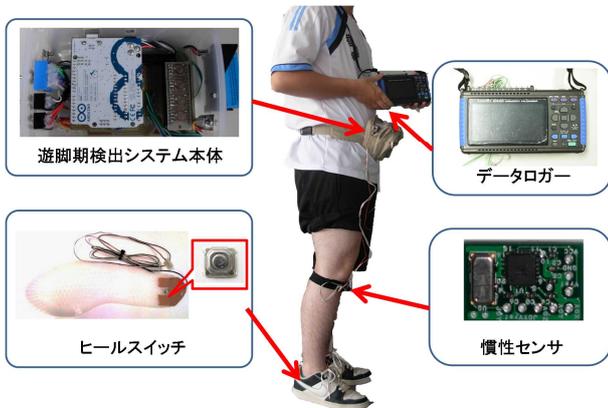


Fig. 1 遊脚期検出システムの装着

3. 学習と実装の手順

Fig. 2 に本実験の手順を示す。提案した推定システムに

N.N.によるアルゴリズムを用いている。そのため、学習によって事前に重み関数や閾値といった学習パラメータを取得しておく必要がある。予め、入力信号である遊脚期と立脚期の慣性センサの状態と、教師信号として遊脚時のヒールスイッチ信号をデータロガーで取得し、PC 上でオフラインで N.N.学習を行って重み関数と閾値を算出する。N.N.学習は誤差逆伝播法を用い、ソフトウェアは MATLAB Neural Network Toolbox を使用する。その後、N.N.学習によって得られる重み関数と閾値を、組み込みシステムである遊脚期検出システムの Arduino マイコンに書き込む。

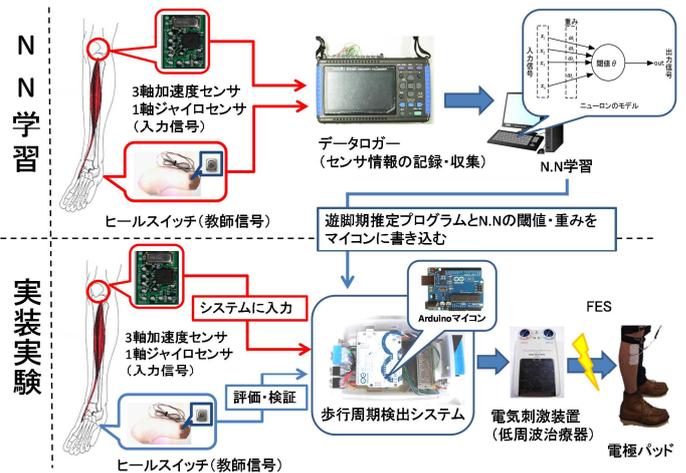


Fig. 2 実験手順

4. 推定精度の評価方法

遊脚期検出システムの信頼性を評価するため、以下の2点について検討を行った。

1. 遊脚期開始および遊脚期終了の遅れ時間
2. 歩行中の推定出力エラー

Fig. 3 に評価方法を示す。破線は本システムの N. N. の出力信号、実線はヒールスイッチ信号である。前述のとおり、ヒールスイッチは踵部に装着され、ON 状態は踵部が地面に接地し始めてからつま先が離れるまでの立脚期、OFF 状態は足が地面を離れてから踵が地面に付き始めるまで直前までの遊脚期である。よって信号の立下りエッジが遊脚期開始時間、信号の立ち上がりエッジが遊脚期終了時間となる。このことから、システムの出力信号とフットスイッチ信号を比較し、立下りエッジのずれが遊脚期開始遅れ時間、立ち上がりエッジのずれが遊脚期終了遅れ時間となり、この遅れ時間が短いほど推定システムの精度が高いものとする。

実験では右足の1歩ごとの遊脚期開始遅れ、遊脚期終了遅れを求めて、それぞれの右足の総歩数の遊脚期開始遅れの平均値および遊脚期終了遅れの平均値を用いて評価する。また、本来、出力してはいけないタイミングに推定信号が出力される、あるいは本来、出力されるべきタイミングで出力されない波形を推定エラーとし、全体の歩数に占める推定エラーの割合を求め、その値が小さいものほど信頼性が高いものとする。実験では右足の総歩数に占めるエラー回数の割合をエラー率とし、評価した。

評価実験としては、はじめに本システムの有効性を確認するための基礎的な実験として、Fig. 5 に示す平坦な直線コースにおいて、N.N.学習時間の長さの違いにおける検証を行った。N.N.学習時間を60秒と90秒の2通り用意して評価した。その実験手順を次に示す。はじめにヒールスイッチと慣性センサを装着して100秒間歩行し、センサ情報をPCに取り込んでそれぞれの学習時間でN.N.学習を行い、算出した重み関数と閾値を遊脚期推定システム内のArduinoマイコンに書き込む。その後、90秒間の実装実験を行ってセンサ情報を収集し、その中から60秒間、90秒間を抽出して、遊脚期開始・終了時の遅れ時間及び推定出力エラーについて評価した。また、応用実験ではより実際の場面を想定して、Fig. 6 に示す階段と踊り場を含むコースで実験を行った。このコースは1階から踊り場までが14段、踊り場から2階までが6段、2階から踊り場まで11段、踊り場から3階までが9段となっており、健常者における右足の総ステップ数は30歩程度である。実験手順は基本実験と同様、はじめに慣性センサ及びヒールスイッチを装着した状態で歩行してN.N.学習用データを採取し、N.N.学習によって得られた重み関数、閾値を遊脚期検出システム内のArduinoマイコンに書き込み、その後、実装実験を行って評価した。なお、今回のコースは短く、十分なN.N.学習ができないため、コースを3回歩行してヒールスイッチ信号および慣性センサ情報を取得し、それを繋げたものをN.N.学習用データとして用いる。また、階段の段数は限られているため、学習用データ、学習時間の違いによる比較検討はしていない。

5. 実験結果

Table. 1 に基本実験の結果を示す。平均遊脚期開始遅れは学習時間60[sec]の時は0.13[sec]、学習時間90[sec]の時は0.14[sec]となり、ほとんど違いは見られないが、平均遊脚期終了遅れは学習時間60[sec]の時は0.08[sec]、学習時間90[sec]のときは0.06[sec]となり、学習時間60秒の時の平均エラー率5.2%、学習時間90秒の時はエラー率3.8%であり、本システムのN.N.学習に基づく遊脚期を推定する出力はN.N.学習時間を60秒間から90秒間に長くすることより推定エラー率を約27%減少させることが可能になり、事前の学習時間を長くすれば、推定エラーを減少させ、遊脚期の推定の精度を高めることができると考えら

れる。また、応用実験の結果をTable. 2 に示す。平均遊脚期開始遅れは階段上昇で0.23[sec]、階段下降で0.24[sec]、平均遊脚期開始遅れは階段上昇で0.05[sec]、階段下降で0.06[sec]となっており、上昇と下降でほとんど違いは見られない。また、エラー率は階段上昇で6.7[%]、階段下降で2.5[%]となっており、下降の方が遊脚期推定精度が高い。基本実験と比較すると、平均遊脚期開始遅れ時間は約1.8倍に増加したが、平均遊脚期終了遅れは同程度となった。また、階段上昇におけるエラー率は基本実験より増加したが、階段下降におけるエラー率は基本実験と同程度となった。

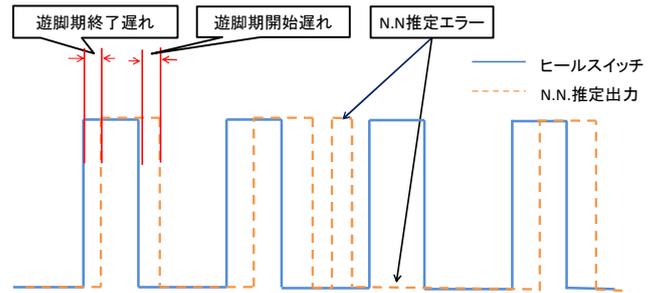


Fig. 4 システムの評価方法

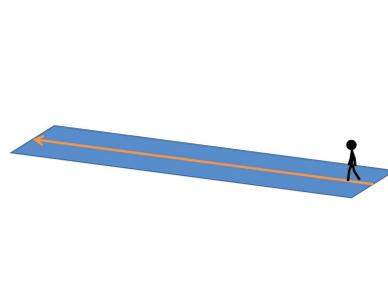


Fig. 5 基本実験コース

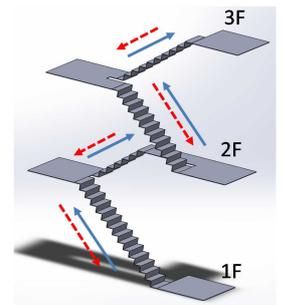


Fig. 6 応用実験コース

Table. 1 基本実験の結果

		被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	平均
学習 60秒	右側総歩数[歩]	70	81	76	83	79	78
	平均遊脚期開始遅れ[sec]	0.11	0.21	0.11	0.06	0.16	0.13
	平均遊脚期終了遅れ[sec]	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08
	エラー歩数[歩]	5	2	4	5	4	4
	エラー率[%]	7.1	2.5	5.3	6.0	5.1	5.2
学習 90秒	右側総歩数[歩]	71	81	76	83	93	81
	平均遊脚期開始遅れ[sec]	0.18	0.11	0.15	0.16	0.11	0.14
	平均遊脚期終了遅れ[sec]	0.07	0.06	0.07	0.03	0.07	0.06
	エラー歩数[歩]	4	1	3	4	3	3
	エラー率[%]	5.6	1.2	3.9	4.8	3.2	3.8

Table. 2 応用実験の結果

		被験者A	被験者B	被験者C	被験者D	被験者E	平均
上昇	右側総歩数(歩)	29	26	31	25	32	28.6
	平均遊脚期開始遅れ[sec]	0.41	0.15	0.13	0.20	0.26	0.23
	平均遊脚期終了遅れ[sec]	0.06	0.02	0.04	0.07	0.05	0.05
	エラー歩数(歩)	2	5	1	1	0	1.8
	エラー率[%]	6.9	19.2	3.2	4.0	0.0	6.7
下降	右側総歩数(歩)	35	26	34	27	35	31.4
	平均遊脚期開始遅れ[sec]	0.11	0.27	0.11	0.41	0.31	0.24
	平均遊脚期終了遅れ[sec]	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.06
	エラー歩数(歩)	1	1	2	0	0	0.8
	エラー率[%]	2.9	3.8	5.9	0.0	0.0	2.5

参考文献

- 1) 工藤, 木澤, 慣性センサを用いた歩行周期検出システムの評価, 独立行政法人 国立高等専門学校機構 秋田工業高等専門学校 研究紀要 第49号, pp9-16(2014. 2)