

生体計測用広帯域フィルタの設計・実装と生体信号解析

園原 温志、趙 勝一、水沼 充、横山 道央 (山形大学)

A study on wide-band filter implementation for vital signal processing

Atsushi SONOHARA, Seung-Il CHO, Mitsuru MIZUNUMA, Michio YOKOYAMA

In various signal processing of photo-plethysmography, wide-band range frequency characteristics are needed especially in low frequency region. In this paper, a filter for conventional photo-plethysmography sensor has been improved to have over-1-order wide band-width frequency characteristics. Then using the implemented filter, vital data analysis on human stress has been investigated.

キーワード： 光電容積脈波、生体計測、広帯域フィルタ、生体信号解析、自律神経系指標

(photo-plethysmography, biometric, wide-band filter, vital data analysis, Autonomic nervous system index)

1. はじめに

現在、現代社会はストレス社会とも呼ばれ、管理社会、競争社会、高齢化社会による孤独などが要因となり、現代人の多くがストレスを抱えながら過ごしている。ストレスによって生じる心の病には、うつ病、無気力症、燃え尽き症候群等があり、多くの人が悩んでいる。

ストレスの予防として、簡単にストレスを計測し、日常的に体調を管理することが挙げられる。そのためには、計測を簡易にすること、及び、ストレスを評価する指標を取得することが必要となる。生体情報から取得するストレスと密接な関係にある指標には、低い周波数帯での広帯域にわたる周波数特性が必要となるものが存在する。

そこで本研究では、ストレス評価を行うため、通過帯域を低域に大きく広げたフィルタを設計、実装して、広帯域フィルタを通した生体信号から、ストレスに関する指標の抽出・解析を行ってストレスを受けた箇所付近での特異点を検出できたことを報告する。

2. 生体信号解析指標

本研究では、計測する生体情報として指先光電容積脈波(以下、光電脈波という)を用いてストレスの解析をおこなう。

光電脈波とは心臓の収縮、弛緩に伴う血液の容積変化をLEDとフォトトランジスタにより、光電流に変換して計測したものである。ここでは光電脈波を用いた生体信号解析から生体信号指標である脈拍数及び自律神経系指標の抽出を行う。

〈2・1〉 脈拍数

光電脈波から得られる生体情報のひとつに脈拍数がある。

本研究では、脈拍数の変動をストレス評価時の1つの指標とする。より細かい範囲での脈拍数変動を計測するために、PPI(Pulse-Peak Interval)を用いて一拍毎の脈拍数を算出する。ここで、光電脈波の一次微分波形である速度脈波のピーク間隔(Δt_n)を算出し、これをPPIとして用いる。

(Fig.1)

(1)式にPPIを用いた一拍毎の脈拍数の式を示す。

$$\text{一拍毎の脈拍数[回/分]} = (1 / \Delta t_n) * 60 \quad (1)$$

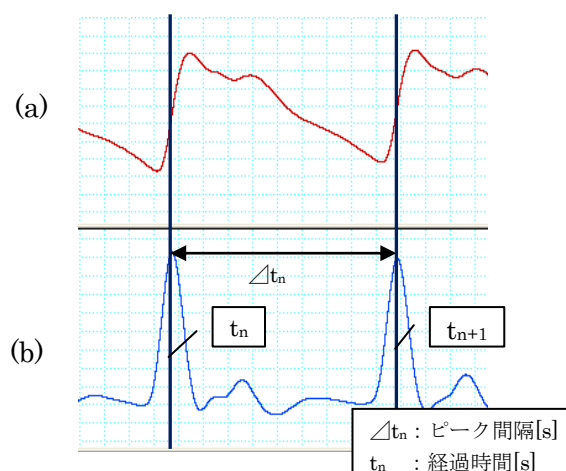


図1 一拍毎のピーク間隔 (PPI)

(a) : 容積脈波

(b) : 速度脈波

Fig.1 Pulse-Peak Interval (PPI)

〈2・2〉 自律神経系指標

自律神経系指標とは、ストレスと密接な関係をもつ指標であり、主に心電図波形から得られる心拍数の変動を用いて算出する。

まず、心電図波形の R-R 間隔(RRI)を補間し、再サンプリングし高速フーリエ変換する。その低周波数帯域(0.04~0.15Hz)及び高周波数帯域(0.15~0.4Hz)のパワースペクトル密度(PSD)を算出する。

HF(高周波帯域の PSD)は副交感神経機能が活発のとき値が大きくなり、LF(低周波帯域の PSD)は交感神経機能、及び副交感神経機能が活発のとき値が大きくなる。HF は副交感神経機能の指標、LF/HF は交感神経機能の指標となる。

(1)

心電図から得られる自律神経系指標と脈波から得られる自律神経系指標は相関関係があると報告されている。(2)

本研究では、光電脈波から得られる自律神経系指標をストレス評価時の1つの指標とする。

3. 生体計測用広帯域フィルタの設計

本研究では、生体信号である光電脈波から、ストレスを評価するため、脈拍数及び自律神経系指標の取得を行う。

本章では、脈拍数に相当する周波数帯域に加えて、より低周波帯に成分が含まれる自律神経系指標を得るために、低域側に広帯域な増幅・フィルタ回路の設計を行った。(3)

〈3・1〉 光電脈波センサ・増幅・フィルタ部の設計

Fig.2 (a) は、本研究で新たに設計した設計回路のブロック図である。設計回路は、光電脈波センサ部と増幅・フィルタ回路の2つの回路に大きく分けることができる。

Fig.2 (b) は、本研究で新たに設計した設計回路である。詳細な性能値は、〈3・2〉増幅・フィルタ回路のシミュレーションで評価する。

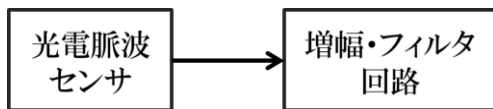


図 2(a) 設計回路ブロック図
Fig.2(a) Block diagram of the designed circuit

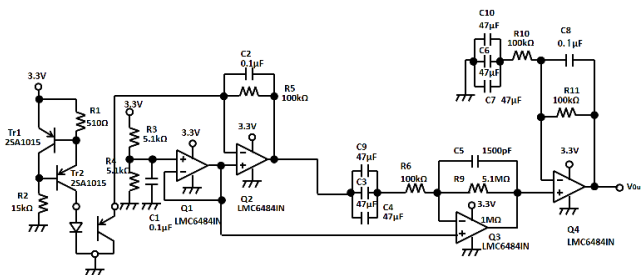


図 2(b) 設計回路
Fig.2(b) The designed circuit

〈3・2〉 増幅・フィルタ回路のシミュレーション

自律神経系指標の算出に必要な低周波域までフィルタが構成されているかシミュレーションより検証を行なった。

Fig.3 にシミュレーション結果を示す。

シミュレーション結果より Gain:40dB,BPF: f_{CH} :13Hz, f_{CL} :0.016Hz が得られた。よって、設計回路においてほぼ目標通りの結果が得られることが分かった。

シミュレーション環境 PSpice Release8

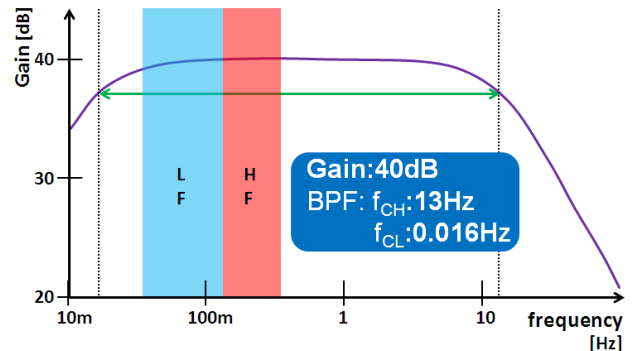


図 3 設計回路によるシミュレーション結果
Fig.3 The simulation result of the designed circuit

〈3・3〉 増幅・フィルタ回路による周波数特性

増幅・フィルタ回路が上記シミュレーション結果と同等の結果が得られるか検証するために、増幅・フィルタ回路による周波数特性測定を行った。

実装された設計回路の増幅・フィルタ回路部を測定に用いて、以下の手順で測定を行った。

- ① ファンクションジェネレータで sin 波(10mVp-p)を増幅・フィルタ回路へ入力する。sin 波の周波数は 10mHz~13Hz に変化させる。
- ② 入・出力波形の振幅をオシロスコープで測定する。
- ③ 入力波形と出力波形のピーク-ピーク比を求める。

Fig.4 に結果を示す。Fig.4 より、設計した増幅・フィルタ回路の周波数特性は、シミュレーション結果とほぼ一致した。

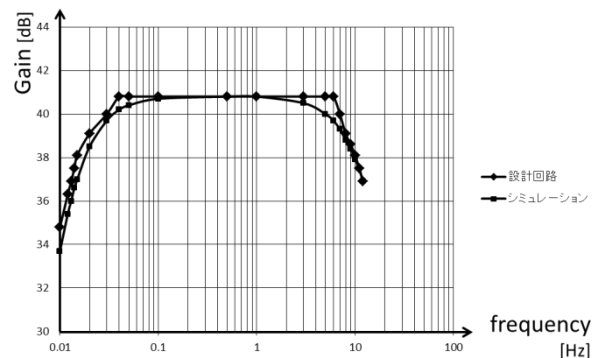


図 4 シミュレーションとの周波数特性比較
Fig.4 Frequency characteristic comparison with the simulation

4. 自律神経系指標の実験的評価

本章では、市販の広帯域に対応した生体計測装置である Power Lab 4/26(ML846: ADInstruments 製)を標準として、設計回路との自律神経系指標(LF,HF,LF/HF)の実験的評価を行う。

Power lab 及び設計回路を用いて、光電脈波を同時測定する。同実験を 3 回施行し、それぞれの測定データを高速フーリエ変換し、LF,HF,LF/HF を算出する。Power Lab との相対誤差より設計回路の自律神経系指標の実験的評価を行った。

Table.1 に実験結果を示す。Table.1 より、Power Lab との相対誤差は±30%台であった。

表 1 LF,HF,LF/HF 比較
Table.1 Comparison with LF,HF,LF/HF

		Power Lab	設計回路	相対誤差[%]
計測1	LF	173	89	
	HF	10.1	5.3	
	LF/HF	17.1	16.8	2.0
計測2	LF	243	228	
	HF	48.5	35.1	
	LF/HF	5.0	6.5	-29.6
計測3	LF	203	227	
	HF	10.4	18.1	
	LF/HF	19.5	12.5	35.7

5. 自律神経系指標を用いたストレス解析方法

自律神経系指標を用いたストレス解析方法には、心拍数変動から得た自律神経系指標の変化に着目した散布図モデルを用いる方法などがある。

本研究では、光電脈波から得られる自律神経系指標と、さらに脈拍数変動も考慮して新たなストレス解析方法を見出す。

本章では、人体に影響を与えるストレスを検出するため、散布図モデルを参考に、自律神経系指標等を用いた新たな解析方法として、状態遷移ベクトルを用いたストレス解析方法を提案する。

〈5・1〉 散布図モデル

散布図モデルとは、心電 RRI において、副交感神経活動指標である HF と交感神経活動指標である LF/HF を用いて実験シーケンスに伴う自律神経系の変化に着目したものである。Fig.5 に HF-LF/HF 散布図モデル⁽¹⁾を示す。

Fig.5 において、副交感神経活動が活発のとき右下方向に移動し、交感神経活動が活発のとき左上方向に移動する。プロットデータが左上方向に移動し、左上方向にとどまっている場合は、ストレスに常に曝されていると仮定する。

本研究では、光電脈波から得られる自律神経系指標で散布図を考える。

また、ストレスを受けている場合、心拍数変動にも影響を及ぼすと考えられ、脈拍数は増加傾向になる。

そこで、実験における HF 及び LF/HF の時間的狀態遷移情報と脈拍数変動の複合した指標が、ストレス評価に有意であると考えた。

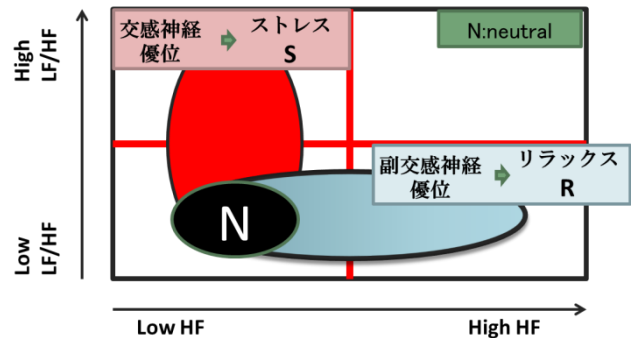


図 5 HF-LF/HF 散布図モデル
Fig.5 Transition Model in HF-LF/HF⁽¹⁾

〈5・2〉 N,R - S 状態遷移時系列配置図の提案

同時系列における一拍毎の脈拍数の変動及び自律神経系の変化、自律神経系の時間的狀態遷移情報に着目し、N,R - S 状態遷移時系列配置図を作成する。

自律神経系の時間的狀態遷移情報を取得する手法として、実験により取得した生体情報を時系列で等間隔に分割し、各分割データの HF 及び LF/HF を算出する手法を提案する。

以下に、図の作成方法を示す。

- ① 上記の提案手法で取得した複数の自律神経系指標データ(HF,LF/HF)を散布図内にプロットし、HF-LF/HF 散布図を作成する。
- ② ①の散布図のプロットデータを時系列順(Data Index:①⇒②,②⇒③,③⇒④...のよう)に結び、状態遷移図を意識した散布図(Fig.6)を作成する。Fig.6 では S(ストレス)と N,R(ニュートラル,リラックス)の 2 つの事象に区分する。2 つの事象を分ける Border の値は全時系列データの高速フーリエ変換より LF_{Border} 及び HF_{Border} を算出し、その比より求める。
- ③ Fig.6 から、プロットデータを時系列順(Data Index:①⇒②,②⇒③,③⇒④...のよう)に結んだ各ベクトルブロック図、及び各ベクトルブロックにおける始点から終点への状態遷移情報を抽出する。(Fig.7)
- ④ 各ベクトルブロックにおける始点から終点への状態遷移情報を色情報及び凡例によって視覚化する。状態遷移情報は 4 パターンある。状態遷移情報と色情報及び凡例の対応を Table.2 に示す
- ⑤ Fig.7 からベクトルブロック推移を作成する。(Fig.8 (b))各ベクトルブロックは時間情報を持ち、時間軸に等間隔で配置する。
- ⑥ 実験シーケンスにおける一拍毎の脈拍数時間的推移を作成する。(Fig.8 (a))

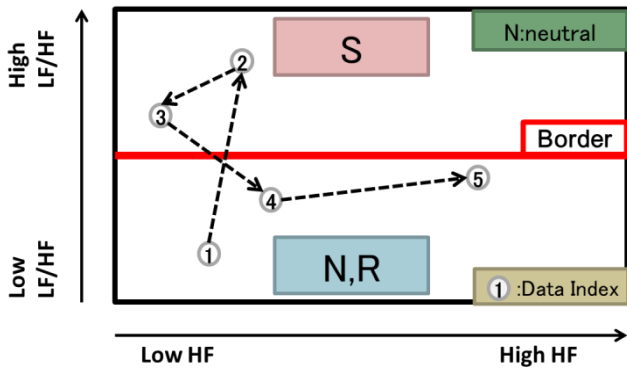


図 6 状態遷移図を意識した散布図
Fig.6 Scatter diagram being aware of state transition

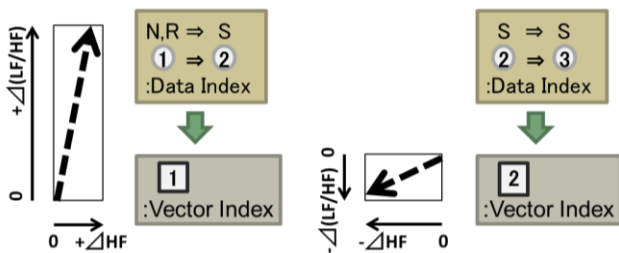


図 7 ベクトルブロック図
Fig.7 Vector block diagram

表 2 状態遷移と視覚化の対応表
Table.2 State transition and visualization

状態遷移		色情報	凡例
N, R ニュートラル, リラックス	⇒ ニュートラル, リラックス	黄	一点鎖線
N, R ニュートラル, リラックス	⇒ S (ストレス)	緑	二重線
S (ストレス)	⇒ N, R ニュートラル, リラックス	青	破線
S (ストレス)	⇒ S (ストレス)	赤	実線

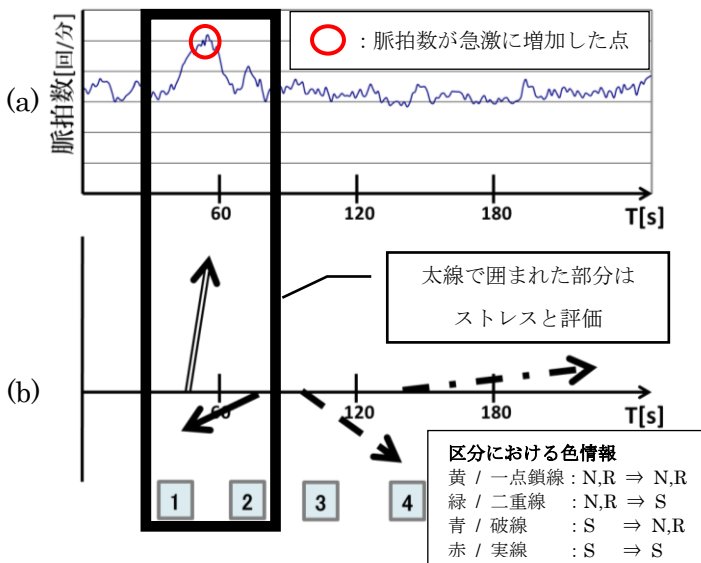


図 8 N,R - S 状態遷移時系列配置図
(a) : 一拍毎の脈拍数の時間的推移
(b) : ベクトルブロックの時間的推移

Fig.8 Time sequence deployment diagram using N,R-S state transition and pulse rate alteration

Fig.8において、一拍毎の脈拍数変動が急激に増加、かつベクトルブロックが緑/二重線(区分遷移情報: N,R⇒S)から赤/実線(区分遷移情報: S⇒S)へと変化するとき(太線で囲まれた部分)、ストレスを感じていると考えられる。

6. N,R - S 状態遷移時系列配置図を用いたストレス評価実験

〈6・1〉 実験概要

ストレス評価にあたり、映像酔いとストレスには密接な関係があるため、本研究では映像視聴によるストレス評価の手法を用いる。

実験内容は、被験者 1 名(24 歳男性)に対し、20 分間映像を視聴してもらい、その時の脈波を以下の方法で解析し、各時系列データにおける LF 及び HF、一拍毎の脈拍数を算出した。算出された指標を用いて N,R - S 状態遷移時系列配置図を作成した。

自律神経系の時間的狀態遷移情報の取得方法は以下の通りである。

- ◎ 映像視聴時に取得した脈波を切り出し時間 1 分間とし、脈波データを 30 秒ずつずらし、複数の脈波データを作成する。サンプリング周波数は 1kHz に設定した。高速フーリエ変換使用時の窓関数はハミング窓を使用した。

映像コンテンツには、3D 映像を使用した。また、映像視聴後に不快感を示したシーンをアンケートにて回答してもらった。

〈6・2〉 実験結果

映像視聴後に被験者に対して行ったアンケートでは、480 秒～560 秒の付近で不快感を示すシーンがあったと回答された。

Fig.9 に実験結果を示す。アンケート結果より、Fig.9 の 480 秒～560 秒部分を、網掛けを用いて表している。

Fig.9 において、480 秒～560 秒付近でのグラフの特異的な変化に着目すると、脈拍数が急激に上昇し、かつ、ベクトルブロックが緑/二重線(区分遷移情報: N,R⇒S)から赤/実線(区分遷移情報: S⇒S)に変化した箇所がある。これは、身体に影響を与えるほどのストレスを感じた特異点である可能性が高いと考えられる。

7. まとめ

本研究では、ストレス評価を行うため、通過帯域を低域に大きく広げたフィルタを設計、実装して、広帯域フィルタを通した生体信号から、ストレスに関する指標の抽出・解析をおこなった。

実験結果より、設計した増幅・フィルタ回路は通過帯域が低域に大きく広がり、自律神経系指標が取得できる周波数特性を持つことを確認した。また、市販計測装置 Power LabとLF/HFを比較した結果、設計回路の相対誤差は±30%台となった。

ストレス指標の解析については、新しい指標としてN,R-S状態遷移時系列配置図を提案し、被験者がストレスを受けた箇所付近での特異点を検出することができた。

今後は被験者を増やしていき、本解析方法を用いて、ストレス指標の解析を進めていきたい。

文 献

- (1) 外山 寛, 木竜 徹ほか; 自律神経系指標の時間推移からみた映像酔いの評価, 電子情報通信学会, 2009-93, 2010
- (2) 四方 裕夫ほか; 腹部交感神経掌焼灼術・切除術における自律神経への影響～指尖血流脈波のゆらぎによる評価～, 医工学治療, 16, 3, 124-127, 2004
- (3) 根本 優紀; 健康管理エージェントシステムにおけるユビキタスセンシングデバイスの研究, 山形大学修士学位論文, 2013

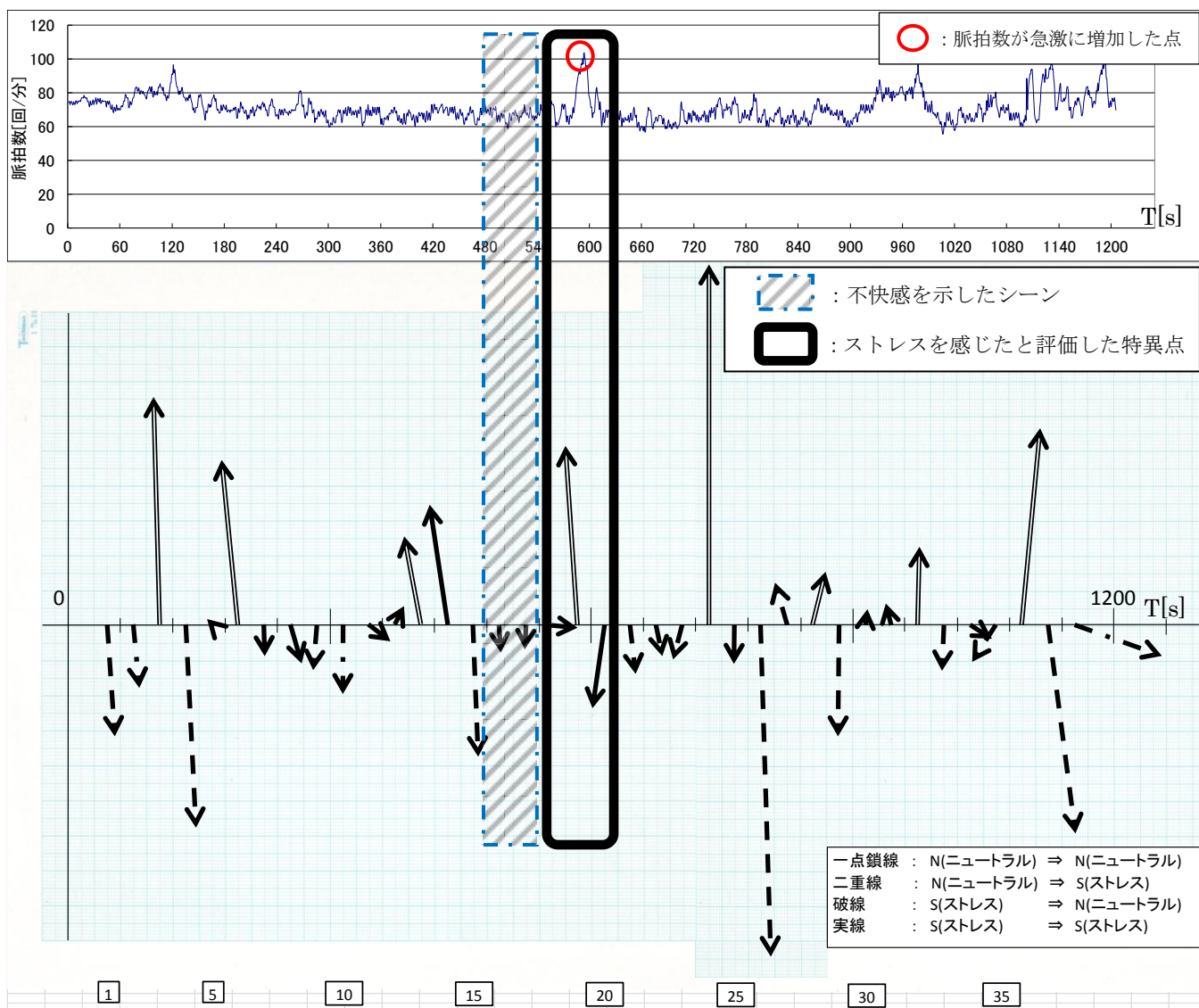


図9 実験結果 N,R - S 状態遷移時系列配置図

Fig.9 Experimental result of time sequence deployment diagram using N,R - S state transition and pulse rate alteration