1402 呼吸時間が心拍の呼吸性変動に与える影響を考慮した副交感神経活動の推定法

Estimation Method of Parasympathetic Activity Based on the Consideration of Influence of Expiration Time to Respiratory Sinus Arrhythmia

○ 学 二ノ宮 創 (滋賀県立大学大学院) 正 松村 雄一 (滋賀県立大)
正 栗田 裕 (滋賀県立大)

Hajime NINOMIYA, University of Shiga Prefecture, Hassakacyo 2500, Hikone-shi, Shiga

Yuichi MATSUMURA, University of Shiga Prefecture

Yutaka KURITA, University of Shiga Prefecture

Phasic stress may be estimated by using the Respiratory Sinus Arrhythmia (RSA), which is variation of heart rate mediated by parasympathetic nerve. However, the RSA amplitude is also accompanied with respiration, such as tidal volume and breathing frequency. This paper addresses expiratory-time-based normalization of RSA amplitude, and estimation method of the trend of normalized RSA amplitude.

key words: Filter, Human Interface, Human Engineering, Heart Rate Variability, Respiratory Sinus Arrhythmia

1. 緒言

著者らは、呼吸性洞性不整脈(RSA:Respiratory Sinus Arrhythmia)から副交感神経活動をリアルタイムに推定する手法について研究している。これまでに、カルマンフィルタを用いて、RSA振幅のトレンドを推定することで、副交感神経活動の時間変化が捉えやすくなることを示した⁽¹⁾。しかしながら、トレンド推定の結果は、応答性と定常性に改善の余地があると考えられる。前報⁽²⁾ではRSAに含まれる呼吸周期の影響の低減を試みたが、副交感神経活動が心拍間隔(RRI)に影響を及ぼすのは、呼気の間だけであるため、トレンド推定の精度はあまり改善されなかった。吸気の際には心臓への副交感神経系の活動が遮断されるためにRRIが短くなり、呼気の際には逆の現象が起こりRRIは長くなることが知られている。

本論では、呼気時間中のRRIの変動をRSAとみなすことで、RSAと副交感神経活動の相関を向上させるとともに、呼気時間が長いほど同じ副交感神経の活性度でもRSAが大きくなることを補正するための正規化式を導く。また、正規化して得たRSAに対してカルマンフィルタによるトレンド推定を行い、副交感神経の活性度の時間変化が捉えやすくなることを確認する。

2. 心拍と呼吸の測定

心拍間隔と呼吸間隔、呼気時間の測定方法を示す。心電波形は胸部双極誘導を用いて、サンプリング周波数1kHzで計測した。心電波形のノイズ除去用に遮断周波数25Hzのローパスフィルタ(LPF)を用いた。心電信が前拍のR波高の0.5倍以上の部分で、次のR波と認識する。R波認識の時刻とR波高を保持し、次のR波発生時刻との時間差から心拍間隔(RRI)を推定する。

呼吸は鼻孔用ピックアップを用いて、サンプリング周波数10Hzで計測した。呼吸波形には、インパルス性雑音が多く含まれる。ノイズ除去にLPFを用いると波形が滑らかになり、呼吸の発生時刻が不明瞭になる。そこで、インパルス性雑音の除去能力とエッジ保存性に優れた中央値フィルタを適用した。フィルタ窓を6とし、時間遅れを0.6秒に抑えた。濾波後の呼吸波形が、閾値より大きくなり、微係数が0になる瞬間を呼気と認識した。閾値より小さく、微係数が0となる瞬間を吸気と認識した。Fig.1に本論で用いたRSAの定義を示す。

3. 呼吸時間がRSAに与える影響の正規化

本節では呼気時間の長さがRSA振幅に及ぼす影響を正規化する方法について検討する。前報⁽²⁾では呼吸周波数がRSA振幅に及ぼす影響を正規化した。また、RSAは呼吸周期中のRRIの変動とみなしていた。副交感神経活動に差がある仰臥

位と立位で呼吸周期を統制して、呼気時間がばらつくようにして35分間の実験を行い、呼気時間とRSA振幅の関係を調べた。全ての実験は食事の影響を避けるため食後2時間以上経過してから行った。測定された呼気時間の逆数とRSA振幅の関係をFig.2に示す。横軸は呼吸周期統制中に被験者が実際に行った呼吸の呼気時間の逆数である。仰臥位、立位ともに、呼気時間の逆数が大きくなるほど、RSAの振幅が線形に小さくなる関係が見られた。最小二乗法で線形近似を行ったところ、全てのデータにおいて傾きは切片の-1倍であり、呼気時間の逆数がおよそ1のところでRSA振幅が0となった。

Fig.1 RSA amplitude estimation

Fig.2 Influence of expiratory time to RSA

ここで、実験結果と文献(3)で早野が示した呼吸周波数と RSA 振幅の関係式⁽³⁾を参考に、次の正規化式を作成した。

$$RSA_{0.5} = \frac{RSA_{1/T}}{(2 - 2 \times (1/T))} \quad (1)$$

ここで、 $RSA_{0.5}$ と $RSA_{1/T}$ は呼吸時間の逆数がそれぞれ 0.5 および $1/T$ のときの RSA の平均振幅である。式(1)を変形すると式(2)を得る。

$$RSA_{1/T} = -2RSA_{0.5} \times \frac{1}{T} + 2RSA_{0.5} \quad (2)$$

式(2)より、呼吸時間の逆数が 1 の場合、 $RSA_{1/T} = 0$ となる。呼吸時間の逆数が 0.5 の場合、 $RSA_{1/T} = RSA_{0.5}$ となる。そこで、式(1)を用いて呼吸時間の逆数の影響を正規化した RSA に対してトレンド推定を行う。 $RSA_{1/T}$ を $RSA_{0.5}$ へ正規化して比較することで、呼吸時間の影響を除去して副交感神経活動の活性度を推定できる。なお、それぞれの呼吸周波数における $RSA_{1/T}$ のばらつきは一回換気量を統制していない影響と考えられる。

4. 副交感神経活動の推定

カルマンフィルタを用いた RSA 振幅のトレンド推定法⁽¹⁾に、3 節に示した呼吸時間の影響の正規化を適用し、課題負荷実験においてトレンド推定精度の改善効果を確認した。負荷課題として、暗算課題を用いた。暗算課題には、ランダムに選択された 3 桁の整数和算を用いた。実験姿勢は仰臥位とし、2100 秒間の実験で、900～1500 秒の間に暗算課題を与えた。Fig.3 に測定された RRI, Fig.4 に RSA, Fig.5 に正規化した RSA, Fig.6 に正規化後の RSA 振幅に対してトレンド推定した結果を示す。Fig.4 から Fig.6 の上段は前報⁽²⁾の方法で解析を行った結果であり、下段は今回の方法で解析を行った結果である。Fig.4 に示すように、この段階では RSA 振幅に大きな差は見られない。Fig.5 に示すように、呼吸時間で正規化を行うと、RSA 振幅に存在した大きなインパルス状の雑音成分が減少している。また、図中の太実線で示した各区間の RSA 振幅の平均値を比較したところ、上段では課題負荷時の平均値は安静時の約 80%で、下段では約 64%であった。Fig.6 に示すように、前報⁽²⁾の方法でも RSA 振幅のトレンドは推定できているが、RSA 振幅のインパルス状の雑音成分の影響を受けて、大きく変動している。一方、呼吸時間で正規化した RSA 振幅に対してトレンド推定を行うと、RSA 振幅のインパルス状の雑音成分の影響を低減でき、安定したトレンド推定が可能である。また、RSA 振幅の変化が大きいため、副交感神経の活性度の変化が区別しやすくなることが示された。

5. 結 論

- (1) 呼吸時間から RSA を推定することで、RSA と副交感神経活動の相関が大きくなる。
- (2) 副交感神経の活性度が同じでも、呼吸時間に応じて RSA 振幅が変化することを補正するための正規化式を得た。
- (3) 呼吸時間の影響を正規化する式を RSA に適用することで、RSA 振幅のインパルス状の雑音成分が低減でき、RSA 振幅のトレンド推定結果から副交感神経の活性度が判定しやすくなることを示した。

参考文献

- (1) 松村ら：心拍の呼吸性変動を用いた機械操作時の一過性ストレスのオンライン推定法，機論，70 - 689, C, 200 - 206
- (2) ニノ宮，松村，栗田：第 19 回生体・生理工学シンポジウム論文集，計測自動制御学会，205 - 206, (2004)
- (3) 井上ら：循環器疾患と自律神経機能 - 第 2 版 - , 71 - 109,

医学書院 (2001)

Fig.3 RRI

Fig.4 RSA amplitude

Fig.5 Normalized RSA

Fig.6 Trend of RSA