

Modelling and Filtering Almost Periodic Signals by Time-Varying Fourier Series with Application to Near-Infrared Spectroscopy

A dissertation submitted to
ETH Zurich
for the degree of
Doctor of Sciences

by
Ivo Trajković
Dipl. El. Ing. ETH
born on March 3, 1980
citizen of Ennetbaden AG

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Markus Rudin
Prof. Dr. Hans-Andrea Loeliger
PD Dr. Martin Wolf

Abstract

Many processes in nature are oscillatory but not strictly periodic; measuring them results in signals where the period length and the signal shape (slightly) drift over time. Such signals are characterised as “almost periodic”.

In this thesis, an intuitive model for almost periodic signals and two algorithms for estimating the model parameters from noisy measurements have been developed and implemented. The model is a Fourier series where the coefficients and the fundamental frequency are allowed to slowly change over time. The model is represented by factor graphs based on which the two algorithms have been derived.

The motivating application is continuous wave near-infrared spectroscopy where near-infrared light of constant intensity penetrates living tissue. The light is scattered and absorbed; a part of it reaches the sensor. The scattering and absorption properties of living tissue, and thus the measured light intensity, vary in particular due to the heartbeat, low frequency oscillations (also Mayer waves), breathing, and neuronal activity. The measured signal is assumed to be the sum of the individual contributions of these physiological processes and noise. Furthermore, the measured signal is often distorted by sporadic movement artefacts.

The aim of the proposed algorithms in near-infrared spectroscopy is to separate the oscillatory component signals (caused by the heartbeat, low frequency oscillations and breathing) from the measured signal, since (i) they disturb the detection of neuronal activity, (ii) they are acquired simultaneously, and their interrelation can be assessed based on the pure version of each of them, and (iii) characterising each of them separately could yield new understandings of the underlying biological processes.

In this thesis, (i) the proposed algorithms and their implementations are described in detail, (ii) it is shown, based on simultaneous near-infrared spectroscopy and electrocardiography measurements, that the proposed algorithms correctly estimate the heartbeat component, (iii) a new application of near-infrared spectroscopy is revealed: estimating the measures of the heart rate variability, (iv) first tests show that the more efficient one of the two algorithms is able to estimate the low frequency oscillations, (v) it is shown by a study that the more efficient one of the algorithms effectively estimates the heartbeat component, (vi) simulation results propose that the neuronal component signal (related to changes in the electrical field potential in the active brain region) should be detectable from the estimates computed with the more efficient one of the algorithms, (vii) a framework has been developed for comparing, evaluating and calibrating algorithms for signal separation and measuring their precision, and (viii) an idea for detecting movement artefacts in the measured signals is outlined.

In conclusion, the proposed algorithms have been successfully applied to near-infrared spectroscopy.

Zusammenfassung

Viele natürliche Prozesse sind oszillierend, jedoch nicht streng periodisch. Das Messen solcher Prozesse ergibt Signale mit zeitlich variierender Periodenlänge und Form. Solche Signale werden als “fast periodisch” eingestuft.

In dieser Arbeit wurden ein intuitives Modell für fast periodische Signale und zwei Algorithmen zur Schätzung der Modellparameter aus verrauschten Messungen entwickelt und implementiert. Das Modell ist eine Fourierreihe, bei welcher die Koeffizienten und die Grundfrequenz zeitlich langsam variieren können. Das Modell wird durch Faktorgraphen dargestellt, mit deren Hilfe die zwei Algorithmen hergeleitet werden.

Die motivierende Anwendung ist Nahinfrarotspektroskopie, wo Licht mit konstanter Intensität lebendes Gewebe durchdringt. Das Licht wird gestreut und absorbiert; ein Teil davon erreicht den Sensor. Die Streuungs- und Absorptionseigenschaften des lebenden Gewebes, und damit die gemessene Lichtintensität, variieren insbesondere wegen dem Herzschlag, der Atmung, der niederfrequenten Schwingungen (auch Mayer-Wellen), und neuronaler Aktivität. Das gemessene Signal wird als die Summe der Beiträge dieser physiologischen Prozesse und des Rauschens angenommen. Ferner ist das gemessene Signal häufig von sporadischen Bewegungsartefakten verzerrt.

Das Ziel der vorgeschlagenen Algorithmen in der Nahinfrarotspektroskopie ist die Trennung der oszillatorischen Komponenten-Signalen (verursacht vom Herzschlag, den niederfrequenten Schwingungen und der Atmung) aus dem gemessenen Signal, da (i) sie die Erfassung neuronaler Aktivitäten stören, (ii) sie gleichzeitig gemessen werden und daher ihre Wechselbeziehungen untersucht werden können aufgrund der puren Version jedes einzelnen von ihnen, und (iii) die Charakterisierung jedes einzelnen von ihnen neue Einsichten in die zugrunde liegenden biologischen Prozesse ergeben könnte.

In der vorliegenden Arbeit (i) sind die vorgeschlagenen Algorithmen und deren Implementierungen ausführlich beschrieben, (ii) wird aufgrund gleichzeitiger Nahinfrarotspektroskopie- und Elektrokardiographie-Messungen gezeigt, dass die vorgeschlagenen Algorithmen die Herzschlagkomponente korrekt schätzen, (iii) wird eine neue Anwendung der Nahinfrarotspektroskopie aufgedeckt: Schätzung der Parameter der Herzfrequenzvariabilität, (iv) zeigen erste Tests die Fähigkeit des Effizienteren der beiden Algorithmen auf, niederfrequente Schwingungen zu schätzen, (v) wird in einer Studie gezeigt, dass der Effizientere der beiden Algorithmen die Herzschlag-Komponente effektiv schätzt, (vi) zeigen Simulationsergebnisse, dass neuronale Komponenten-Signale, welche mit Änderungen im elektrischen Feld in der aktiven Hirnregion zusammenhängen, detektierbar sein sollten aus den geschätzten Signalen des Effizienteren der beiden Algorithmen, (vii) wurde eine Software entwickelt für den Vergleich, die Bewertung und die Kalibrierung von Algorithmen zur Signaltrennung und deren Genauigkeitsmessung und (viii) wird eine Idee zur Erfassung von Bewegungsartefakten im gemessenen Signalen geschildert.

Die vorgeschlagenen Algorithmen wurden erfolgreich in der Nahinfrarotspektroskopie angewandt.