

DIE KORRELATIONSTECHNIK ZUR ÜBERWACHUNG FETALER VITALFUNKTIONEN

J. Nagel, R. Thull, M. Schaldach

Zentralinstitut für Biomedizinische Technik
der Universität Erlangen-Nürnberg

EINFÜHRUNG

Die intensive Überwachung der fetalen Vitalfunktionen vor und während der Geburt ist die Voraussetzung für eine frühzeitige Erkennung von Gefahrezuständen des Feten. Die Kardiotokographie hat sich in den letzten Jahren zu einer der wichtigsten Überwachungsmethoden in der Perinatalmedizin entwickelt. Ihre Anwendung ist jedoch in vielen Fällen nicht möglich, weil bei der indirekten Aufnahme der fetalen Signale vom Abdomen der Mutter Störsignale auftreten, die mit Hilfe der klassischen Filtertechnik nicht unterdrückt werden können. Die bisher angewandten Verfahren der Kardiotokographie erlauben überdies keine echte 'beat-to-beat'-Messung der fetalen Herzfrequenz bei Anwesenheit von Störsignalen. Als Folge der üblichen Herzfrequenzbestimmung durch Mittelwertbildung über mehrere Herzschläge hinweg treten Verfälschungen der Mikrofluktuationen auf, die zu einer falschen Beurteilung des fetalen Gesundheitszustandes führen können.

Durch die Anwendung neuer Techniken, insbesondere der Korrelationstechnik, soll die Meßwertgewinnung fetaler Vitalfunktionen verbessert, und damit die Effektivität elektronischer Überwachungsgeräte in der Perinatalmedizin gesteigert werden. Im folgenden werden die grundlegenden Untersuchungen über die Erkennung des fetalen QRS-Komplexes im vom Abdomen der Mutter abgeleiteten feto-maternellen EKG dargelegt.

Ein bekanntes Verfahren zur Erkennung eines von Störungen überdeckten, repetitiven Signals ist die Methode der fortgesetzten Mittelwertbildung. Das Signal/Rausch-Verhältnis wird infolge der stochastisch schwankenden Phasenlage der Störungen im Scharmittel so weit verbessert, bis das Signal – hier der fetale QRS-Komplex – erkennbar geworden ist.

Zur Ermittlung des fetalen EKG's durch fortgesetzte Mittelwertbildung steht kein geeignetes Triggersignal zur Verfügung. Überdies kann mit Hilfe dieses Verfahrens die beat-to-beat-Messung der fetalen Herzfrequenz nicht durchgeführt werden. Deshalb muß hier bei der Signalverarbeitung statt des Scharmittelwertes ein zeitlicher Mittelwert benutzt werden. Zur Mustererkennung besonders geeignet ist die Korrelationsfunktion, die aus der Erweiterung des Moments 2. Ordnung hervorgeht. Die Korrelationsanalyse des EKG's zeigt das Auftreten fetaler QRS-Komplexe an und ermöglicht die Bestimmung der beat-to-beat gemessenen Herzfrequenz. Gleichzeitig liefert die Korrelationsanalyse ein Triggersignal, mit dessen Hilfe die Darstellung des QRS-Komplexes mittels fortgesetzter Mittelwertbildung gewonnen werden kann.

Die Kreuzkorrelationsfunktion stellt ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Funktionen dar. Wird das gestörte feto-maternelle EKG mit einem fetalen Muster-QRS-Komplex korreliert, so kann aus der Ähnlichkeit der beiden Funktionen auf das Vorliegen eines QRS-Komplexes geschlossen werden.

Kreuzkorrelationsfunktion:

$$\Phi_{SM}(t_1) = \overline{S(t) \cdot M(t-t_1)}$$

S = Signal

M = Muster

Besonders gute Ergebnisse liefert das Verfahren, wenn die Störkomponente des Signals aus weißem Rauschen besteht. Dann nämlich verschwindet die Rauschkomponente im zeitlichen Mittelwert des Produktes. Man erhält die reine Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) zweier QRS-Komplexe.

Die tatsächlich auftretenden Störungen des abdominal aufgenommenen EKG's sind jedoch anderer Natur. Zu einem für die Verarbeitung unkritischen Anteil bandbegrenzten Rauschens am Störsignal treten das maternelle EKG und Aktionspotentiale, deren Amplituden wesentlich (Faktor 10–100) über denjenigen des fetalen EKG's liegen (Abb. 1) und dem EKG additiv überlagert sind. Sie können einen nicht verschwindenden Beitrag zur Korrelationsfunktion liefern.

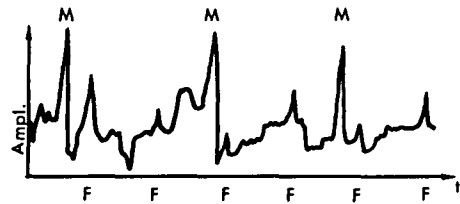


Abb. 1 Abdominal aufgenommenes feto-maternelles EKG

$$\Phi_{MS} = \Phi_{ME_f} + \Phi_{MR} + \Phi_{MA} + \Phi_{ME_m}$$

EKG Störanteile
echte Korr. formale Korr.

M = Muster E_f = fetales EKG
R = Rauschen E_m = maternelles EKG
A = Aktionspotentiale

Zur zuverlässigen Erkennung der fetalen QRS-Komplexe ist es erforderlich, die Störanteile in der KKF klein zu halten gegenüber der Korrelation zwischen Muster und fetalem EKG; d.h., die Wahrscheinlichkeit einer rein formalen Korrelation muß minimiert werden. Dieses Ziel wird erreicht durch:

1. Filterung

Die Störanteile des Signals werden durch ein digitales Filter reduziert. Alle Frequenzanteile des Signals, die nicht zur Erkennung des EKG's beitragen, werden unterdrückt.

2. Anpassung des Musters

Um stets das optimale Signal/Störverhältnis in der KKF zu erhalten, wird das Muster dem aktuellen QRS-Komplex durch fortgesetzte Mittelwertbildung ständig angepaßt. Zu Beginn des Verfahrens muß das Mustersignal an diejenigen Signalkomponenten angepaßt sein, die allen zu erwartenden EKG's gemeinsam sind. Ein solches Referenzsignal erhält man aus dem Scharmittel aller möglichen QRS-Komplexe gleicher Phasenlage.

DURCHFÜHRUNG DER KORRELATIONSANALYSE

Das abdominal aufgenommene feto-maternelle EKG wird in einer digitalen Rechenanlage (DECLAB 11/40) verarbeitet. Es wird mit einer Abtastfrequenz von 1 KHz digitalisiert. Zur Darstellung der Daten wird ein Rechteckfenster der Länge $N = 128$ Punkte benutzt. Diese Zahl ergibt sich als Kompromiß zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit der Analyse. Die Daten werden vor der Korrelation im Frequenzbereich gefiltert (Abb. 2).



Abb. 2 Filterung des EKG's

Hierzu sind zwei Fouriertransformationen erforderlich, die nach der Methode der schnellen Fouriertransformation durchgeführt werden. Danach wird das Signal mit dem im Rechner gespeicherten Muster-QRS-Komplex korreliert. Der Wert der KKF zur Zeit t ergibt sich aus dem Mittelwert des Produktes aus QRS-Muster und dem zur Zeit t im Datenfenster erscheinenden Signal.

Das Vorhandensein eines fetalen QRS-Komplexes wird angenommen, wenn die normierte KKF den Wert 0,8 überschreitet. Der zeitliche Abstand zwischen den Punkten, an denen die KKF die Triggerschwelle überschreitet, ist der Kehrwert der fetalen Herzfrequenz. Wenn die KKF ihr Maximum erreicht hat, sind Muster und Signal gleichphasig. Der im Datenfenster vorliegende fetale QRS-Komplex wird mit dem Muster gemittelt.

Die Durchführung einer gewichteten Mittelwertbildung mit der Mittelungskonstanten U verbessert das Signal/Rauschverhältnis um den Faktor $\sqrt{2U-1}$. Der Wert für die Mittelungskonstante ist so zu bestimmen, daß einerseits die Verbesserung des Rauschabstandes ausreichend ist, andererseits die Zeitkonstante für die Anpassung des QRS-Musters keine zu großen Werte annimmt.

Die Datenverarbeitung erfolgt mit einem ASSEMBLER-Programm, das auf dem SPARTA-System von DIGITAL basiert, jedoch frei programmierbar ist (Abb. 3).

VORTEILE UND GRENZEN DES VERFAHRENS

Im Gegensatz zu den bisher zur Entdeckung des fetalen EKG's angewandten Verfahren bietet die Korrelationsmeßtechnik die Vorteile der statistischen Signalverarbeitung. Unter Verzicht auf die Rekonstruierbarkeit des ursprünglichen Signals ist eine wesentlich bessere Signal/Störspannungsabtrennung möglich. Die im Signal enthaltenen Störungen korrelieren nicht mit dem fetalen EKG und verschwinden deshalb im zeitlichen Mittel der Signalstatistik. EKG's mit einem Signal/Rauschverhältnis von weniger als -30dB lassen sich noch fehlerfrei verarbeiten. Während im Idealfall der Signalerkennung keine Grenzen gesetzt sind, treten in der Praxis bei sehr kleinen Signal/Störverhältnissen auch bei diesem Verfahren Fehler auf. Hierfür sind im wesentlichen zwei Gründe anzuführen.

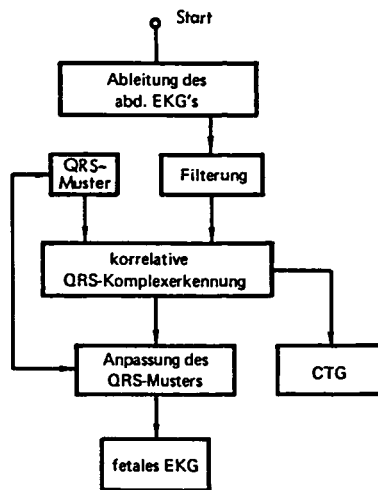


Abb. 3 Flußdiagramm des Analyse-Programms

1. Die Theorie der Korrelationsfunktion setzt eine unendliche Integrationszeit voraus. Bei der hiervorgenommenen Analyse wird jedoch nur über die Zeitdauer eines QRS-Komplexes integriert. Dies hat zur Folge, daß die Störanteile in der Korrelationsfunktion nicht immer den Wert Null ergeben, und zu einer falschen Auswertung führen können.
2. Es können Störsignale auftreten, deren Wellenform, bzw. Signalstatistik dem fetalen QRS-Komplex sehr ähnlich ist. In diesem Fall ist eine Entscheidung über die Herkunft des Signals nicht möglich. Hier muß jedes Verfahren versagen. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines derartigen Signals ist jedoch so gering, daß die daraus resultierende Fehlerquote vernachlässigbar ist.

Der Vergleich von Meßergebnissen zeigt, daß die Korrelationsanalyse und die Darstellung des fetalen EKG's durch fortgesetzte Mittelwertbildung die Sicherheit und Genauigkeit der Signalverarbeitung gegenüber anderen Verfahren wesentlich verbessert.

Literatur:

1. K. Hammacher, R. Brun del Re, R. Gaudenz, P. De Grandi und R. Richter, "Kardiotokographischer Nachweis einer fetalen Gefährdung mit einem CTG-Score", Gynäk. Rdsch. 14, Suppl. 1, 61-63 (1974)
2. V. Th. Rhyne, "A Digital System for Enhancing the Fetal Electrocardiogram", IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 16, 80-86 (1969)
3. J.G. Figueroa-Longo, et al., "Fetal electrocardiogram at term labor obtained with subcutaneous fetal electrodes", Am. J. Obstet. Gynecol., 96, 556-563 (1966)
4. K.-H. Mosler, "Fetale Herzaktion und Tokographie", Walter de Gruyter, Berlin, New York (1972)
5. E.H. Hon, "An Introduction to Fetal Heart Rate Monitoring", Harty Press Incorporated, New Haven (1971)