

移動体通信とノートブックコンピュータによる 遠隔地フィールド実験の効率化

新潟大学 木 竜 徹

(共同研究者) 筑波大学 岡田 守彦

新潟大学 牛山 幸彦

Field Experiment Assist System using Moving Telecommunication and A Notebook Computer

by

Tohru Kiryu

Niigata University

Morihiko Okada

University of Tsukuba

Sachihiko Ushiyama

Niigata University

ABSTRACT

Measurement in a field offers very valuable information for analyzing sports performance. It is, however, difficult to acquire well-conditioned data in a field due to artifact noise during dynamic movement. We propose a field experiment assist system using moving telecommunication and a notebook computer. The notebook computer is connected to the engineering workstation (EWS) network via the modem and the moving telecommunication. EWS network provides artifact noise reduction and spectrum analysis at everywhere in a field. Thus, we can obtain high performance service even in a field.

Artifact noises are sometimes unavoidable in measurement of

Myoelectric (ME) signals during dynamic movement. Artifact noise is caused by mechanical friction between electrodes and the skin. The frequency components of artifact noise are similar to those of ME signals. Thus, it is difficult to reject artifact noise using linear filters. We have proposed a nonlinear filter based artifact elimination method that consists of an autoregressive (AR) filter, a nonlinear filter, and the inverse-AR filter. These filters are also adaptive filters to perform in time-varying ME signals. To improve the performance for abrupt artifact noise, the filter coefficients adjustment using a fuzzy rule was employed. Customizing fuzzy rules, we achieved a better elimination performance.

The experimental results showed that our system is very useful to proceed with field experiment in terms of well-conditioned data acquisition. The only problem was a low transmission rate. This will be overcome by developing a high speed modem or developing the digital moving telecommunication service area.

要 旨

フィールド実験システムには、種々のタイプのものが提案されてきている。しかし、大がかりな施設を必要とするシステムではユーザーに制限があり、一方、単に記録をノートブックコンピュータに留める程度であれば、それほど有効な支援システムに成り得ない。フィールド実験の要点は、現実的环境下で如何に貴重な記録を計測するかにある。そのためには、フィールドで、十分意味のある記録か否かを判断しなければならない。

提案するフィールド実験支援システムは、計測側をノートタイプのような携帯性に優れた機器とし、信号の処理、解析を研究室のワークステーションを中心としたシステムとする。これらを電話回線（携帯性、機動力を増すために移動体通信）で接続し、双方で計測データおよびその他の記録データの送受信が行えるようにする。その結果、通信による研究室の支援を得ることで、とにかく

フィールドでのデータ収集を進めるといった見込み実験的な現状を改善し、十分、目的とする解析に役立つ効率的なデータ収集が可能となるものと考え。

この際、ワークステーションから提供する筋電図計測支援プログラムは、フィールド計測を充実させる目的にかなうものでなければならない。今回は、アーチファクト除去の成否がフィールド実験データの有効性を見極める重要なファクタであると考え、ファジィ推論を基礎とした非線形フィルタアーチファクト除去法を開発した。

緒 言

フィールドにおける動的運動時の筋電図計測では、持ち運びの容易な、携帯性に優れた計測機器が好ましい。一方、膨大な筋電図データの処理、高度な解析には高速なワークステーション等の機器が必要になる。すでに、携帯性に優れたノートブック型ワークステーションが市販されている

が、数100万円と高価であり、その操作性も十分ユーザーフレンドリとは言い難い。そこで、パーソナルコンピュータ程度のノートブックコンピュータをフィールドに携帯し、電話回線で研究室のワークステーションと接続することで、フィールドでの実験を支援するシステムの開発を進めてきている。

ワークステーションでの解析プログラムは、モデムやコンピュータネットワークを通じて使用できるので、電話回線さえあれば手近のコンピュータがフィールド実験支援システムのワークステーション端末となる。さらに、移動体通信を使えばフィールドであっても、ほぼ場所の制限を受けることなく、以上のような恩恵が得られる。これにより、フィールドでは携帯性のみを重視した機器が使用でき、一方、信号処理や解析をワークステーションに負担させることで、高度な解析をフィールドで手に入れることができる。また、研究スタッフをフィールド実験グループと解析支援グループに分け、互いの役割を充実させることができるものとする。

ワークステーションから提供する筋電図計測支援プログラムは、フィールド計測を充実させる目的にかなうものでなければならない。フィールド実験でとくに問題となるのが、動的運動時の表面筋電図計測に混入してくるアーチファクトノイズであるので、今回は、アーチファクト除去法を用いてフィールド実験支援システムの評価を行った。アーチファクトノイズは、急激な動作時に基線電位の急激な変動として現われ、実験データの生理的な解釈を無意味にする場合がある。アーチファクト除去法は、今までにもいろいろと提案されてきた¹⁻³⁾。

本研究では、その中でも除去能力の高い非線形フィルタを使った方法¹⁾に着目する。しかし、非線形フィルタによる方法では、アーチファクトが混入している個々の場面に十分に応じきれない欠点

があった。そこで、ファジィ推論により、非線形フィルタ係数を個々の場面で調整することで、上記問題点の改良を試みた。

実験では、ノートブックコンピュータと移動体通信のセットをフィールドへ持ち出し、テレメータにて動作中の筋電図を計測した。この計測データをファイル化し、種々の通信条件に対してノートブックコンピュータ・ワークステーション間の通信によるファイルの送受信実験を行った。また、アーチファクト除去法はシミュレーションデータに対してその能力を確認した後、実際にフィールドからワークステーションへ、アーチファクトの混入したファイルを転送し、ワークステーションでアーチファクト除去された信号を、再びフィールドで受信する実験を行った。以上の実験結果をもとに、フィールド実験支援システムの現状と展望を明らかにする。

1. フィールド実験支援システム

1.1 機器・通信システム

フィールド実験支援システムとして、地域の特徴を生かし、スキー運動計測実験を対象としたフィールド実験支援システムを考える。スキー場ゲレンデでは、電話回線の利用が制約を受けるので移動体通信による通信実験を試みた。移動体通信の利点は、ユーザーが既設の電話施設の場所の制限を受けることなく、電話回線網を利用できることにある。しかし、移動体通信の携帯電話器程度の電力では、目的としている山間部のスキー場では地理的制限を受けることとなる（新潟県の場合、幸いにも高速道路や主要国道沿いのスキー場は、移動体通信のサービスエリアに含まれる。）

システム構成を図1に示す。移動体通信にはMova Fタイプ（富士通）を用い、モデムにはMNPクラス10の通信プロトコルを持つHyper Pokomo (Microcom 1024と同等品)を用いた。Hyper Pokomoは通信の状態に応じて通信速度

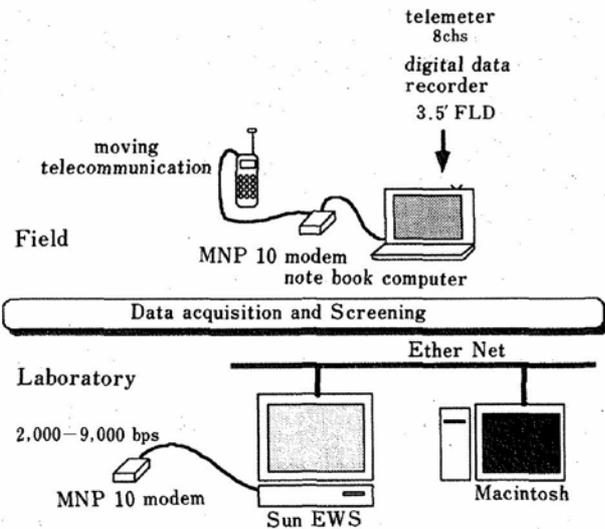


図1 システム構成

を 16 Kbps から 1.2 Kbps の間で自動的に調節するため、移動体通信を使う場合には最適なモデムである。ノートブックコンピュータには、PS 55 / note (IBM) と PC 9801 NS/L (NEC) の 2 機種を用いた。PS 55 / note は Hyper Pokomo に接続するノートブックコンピュータとして推薦されている機器である。一方、PC 9801 NS/L は現時点で最も軽量で、市販の信号編集アプリケーションソフトウェアが使用できることから、実験に選択した。

フィールド計測では 8 チャンネルテレメータ (日本光電, WEB 5000) にて、筋電図、筋温、加速度を同時計測し、デジタルデータレコーダ (TEAC, DR-F1) にてフロッピーディスクに直接記録した。また、フィールドでの通信機器、計測・記録機器はバッテリー駆動とした。一方、研究室でのワークステーション (EWS) は Sun 4 / 1 とし、RS 232 C 端子に Hyper Pokomo を接続した。

1.2 解析支援システム

解析支援システムとして、今回はアーチファクト除去法を用意した。著者らは、フィールドでの最大の関心事を、計測したデータが解析に使用できるか否かであると考え、アーチファクト除去法

を電話回線を通じて提供することを考えた。

従来の非線形フィルタを用いた方法¹⁾は、筋電図白色化フィルタ、非線形フィルタ (適応化平滑化フィルタ)、筋電図白色化フィルタの逆フィルタの 3 段のフィルタから構成されている。本システムでは、このフィルタ構成を基本に運動時のアーチファクト除去のための 2, 3 の改良を行った (図 2)。

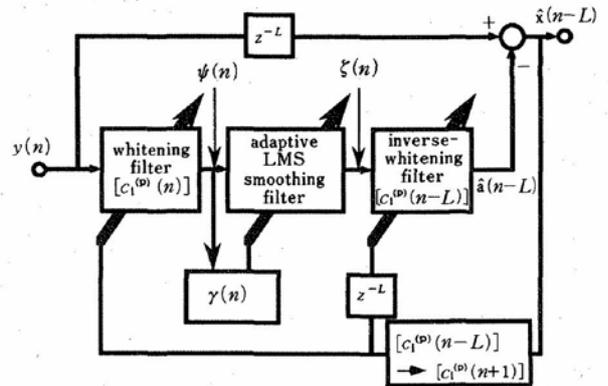


図2 アーチファクト除去フィルタの構成

いま、表面筋電図観測信号 $y(n)$ を筋電図信号 $x(n)$ とアーチファクト信号 $e(n)$ の加算からなると考え、以下のように表わす。

$$y(n) = x(n) + e(n) \quad (1)$$

アーチファクト除去の手続きは以下のとおりである。最初、 $y(n)$ を筋電図白色化フィルタに通し、筋電図成分 $x(n)$ のみを選択的に白色雑音化することで、筋電図成分をアーチファクト成分に比べて小振幅化する。非線形フィルタは小振幅化された筋電図成分を除去する。その結果、非線形フィルタ処理後の信号を、最終段で 1 段目の逆フィルタに通すことで、アーチファクト信号 $e(n)$ のみを推定できる。最後に、観測信号 $y(n)$ から $e(n)$ の推定波形を差し引くことで、アーチファクト除去を実現する。

運動時の筋電図は、その周波数成分が時間によって変化する。そこで、1 段目と 3 段目のフィルタ係数 $[c_1^{(w)}(n)]$ を、Lee のアダプティブ処理²⁾にて、時間変化に追従できるようにした。ここで

$[c_i^{(p)}(n)]$ は時刻 n での p 次自己回帰 (AR) モデルの i 番目の AR 係数である。なお、アダプティブ処理を実現するにあたり、入力と出力とで L サンプルの時間調節を行っている。

従来の非線形フィルタを用いたアーチファクト除去法は、インパルスのような突発的なアーチファクトの重畳した部分や、アーチファクトと筋電図の振幅に大きな差がない部分でアーチファクト推定波形の誤差が大きくなり、アーチファクトだけでなく、必要な信号成分 (筋電図) まで除去してしまう欠点があった。

この現象を引き起こす要因は、非線形フィルタのパラメータである $\gamma(n)$ が大きな鍵をにぎっていた。いま、1段目のフィルタの出力を

$$\Psi(n) = \xi(n) + \varepsilon(n) \quad (2)$$

とすれば、非線形フィルタからの出力は、

$$\begin{aligned} \zeta(n) = & \gamma(n) \{ \Psi(n) - E[\Psi(n)] \} \\ & + E[\Psi(n)] \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ただし、 $E[\cdot]$ は期待値操作を表わす。

ここで、非線形フィルタ特性を制御する非線形パラメータ $\gamma(n)$ は、

$$\gamma(n) = \frac{\sigma_v^2(n) - \sigma_f^2(n)}{\sigma_v^2(n)} \quad (4)$$

で与えられる。式 (4) で、 $\sigma_v^2(n)$ は観測信号 $y(n)$ の1段目フィルタ出力の分散、 $\sigma_f^2(n)$ は筋電図信号 $x(n)$ の1段目フィルタ出力の分散である。

筋電図上にアーチファクトが重畳した部分があった場合、1段目のフィルタ出力の分散 $\sigma_v^2(n)$ と平均 $E[\Psi(n)]$ が大きくなり、 $\gamma(n)$ が1に近くなる。これによりフィルタの特性は全域通過型 (すべての周波数成分を通すフィルタ) となる。一方、観測信号がアーチファクトをほとんど含まない筋電図の場合、 $\sigma_v^2(n)$ と $\sigma_f^2(n)$ とはほぼ同じ値となり、 $\gamma(n)$ は0に近くなる。この場合、フィルタの特性は低域通過型 (低い周波数成分のみを通すフィルタ) となり、非線形フィルタの出力 $\Psi(n)$ から筋電図成分 $\xi(n)$ を除去する。

筋電図とアーチファクトとがほぼ同じ振幅であった場合、式 (4) の特性では筋電図成分 $\xi(n)$ も十分に平滑化されず、そのまま非線形フィルタを通過してしまう現象が多く見られた。その結果、アーチファクト推定波形に誤差が生じ、十分なアーチファクト除去が得られていなかった。この欠点を補うため、信号の局所的性質に応じて $\gamma(n)$ を修正すれば、アーチファクト除去の精度向上を実現できると考えた。その方法として、ファジィ推論を用いることにする。

ファジィ推論は地下鉄の運転制御、オートマチック車のシフト時期制御から、掃除機や洗濯機等に至るまで幅広く使われてきている。その目的は、主にマニュアル操作の自動化による省力化、制御性の向上等にある。本研究では、ファジィ推論により、 $\gamma(n)$ の導出法をより柔軟なものとする。

提案する方法では、ファジィ推論の前提部を1段目のフィルタの出力の分散 $\sigma_v^2(n)$ と $\sigma_f^2(n)$ のメンバーシップ関数とし、決論部を非線形パラメータ $\gamma(n)$ のメンバーシップ関数とした。メンバーシップ関数は、通常よく使用される三角状の関数とし、分散の程度を S (small), RS (rather small), RL (rather large), L (large) に、一方、 $\gamma(n)$ の程度を F (filtering), PF (partial filtering), PP (partial passing), P (passing) に分割した。

さらに、 $\sigma_v^2(n)$ と $\sigma_f^2(n)$ の差が小さい部分で $\gamma(n)$ の値より細かく調整できるように、S と RS の幅を狭くした。また、ファジィルールマトリックス (図3) でも、 $\sigma_v^2(n)$ と $\sigma_f^2(n)$ とが等しくなる場面では、 $\gamma(n)$ がより0に近づくようにルールを設定した。なお、非ファジィ化による $\gamma(n)$ の算出には min-max 重心法⁵⁾を用いた。

観測信号の分散 $\sigma_v^2(n)$ は一定の時間区間で推定できるが、筋電図信号の分散 $\sigma_f^2(n)$ はアーチファクトが混入した区間では推定できない。そこで、明らかにアーチファクトが混入していない部分で

variance of filtered EMG signal $\sigma_{\xi}^2(n)$

variance of observed signal $\sigma_{\psi}^2(n)$

	S	RS	RL	L
S	F	F	F	F
RS	PF	F	F	F
RL	PP	PF	F	F
L	P	PP	PF	F

図3 ファジィルールマトリックス

$\sigma_{\xi}^2(n)$ の初期値を求め、その後は、以下のように値を更新するものとした。

$$\text{if } \sigma_{\xi}^2(n-1) \approx \sigma_{\psi}^2(n),$$

$$\text{then } \sigma_{\xi}^2(n) = \sigma_{\psi}^2(n), \quad (5)$$

$$\text{if } \sigma_{\xi}^2(n-1) \ll \sigma_{\psi}^2(n),$$

$$\text{then } \sigma_{\xi}^2(n) = \sigma_{\xi}^2(n-1). \quad (6)$$

2. 実験

2.1 フィールド実験

今回のスキー実験は、単独で新潟市内近郊のスキー場にて実施した。被験者左足の前脛骨筋に4線アクティブアレイ電極 (DEM社製) を貼付し、ブルークボーゲンによる滑走時での前脛骨筋表面筋電図を計測した。1回のトライアル時間は約5分であり (滑走時間は約30秒)、これを連続10回繰り返した。計測にはテレメータを用い、デジタルデータレコーダにてサンプリング周波数5kHz、14bitで表面筋電図をデジタル化した。ここで採取したデータファイルを種々の条件下でのデータ通信実験に用いた。

2.2 通信実験

図1の機器構成を用いて、種々の条件下での通信実験を行った。PS 55/note、PC 9801 NS/Lともに市販の通信ソフトウェアを用いた。EWS側では、setmodemにて通信速度を9,600bpsに設定した。なお、通信プロトコルはzmodemである。ここで、PS 55/noteからPS 55/noteへの

送受信では、通信速度は19,200bpsに設定できる。しかし、EWSをzmodemにて19,200bpsに設定すると文字化けを起こしたので、今回は9,600bpsで実験を行った。

PS 55/noteの場合は、テキストファイル、バイナリファイルともに10kBのものを用いた。しかし、PS 55/noteには適当な波形表示ソフトウェアが入手できなかったため、アーチファクト除去を含めた通信実験には、PC 9801 NS/Lを用いた。すなわち、PC 9801 NS/Lからアーチファクトの加わったデータをEWSへ送信し、EWSでアーチファクト除去を実行した後、その結果ファイルをPC 9801 NS/Lで受信し、波形を表示して確認した。

2.3 アーチファクト除去法の実験

提案したアーチファクト除去法を評価するため、正弦波状、三角波状、インパルス状のアーチファクトを実際に計測した表面筋電図に加算し、シミュレーション波形とした。また、腿挙げ動作時の表面筋電図に対して実際に評価を行った。ここで、被験者の前脛骨筋に4線アクティブアレイ電極を貼付し、計測には4線のうちの1組の双極 (電極間隔1cm) アレイを使用した。計測時間は約10秒であり、この表面筋電図をフィールド実験と同様にデジタル化した。記録したデータは、ファイル変換した後コンピュータディスプレイに表示し、アーチファクト除去の有効性を確認した。

3. 実験結果

3.1 通信速度の比較

PS 55/noteを用いた場合の結果を図4に示す。なお、図中EWS → PS 55/noteとPC 98 RX → EWSの実験は、参考データとして構内電話回線を用いた結果である。一般に、テキストファイルはデータ圧縮の効果が大きく、実効通信速度は10,000bps相当にまで達することがあ

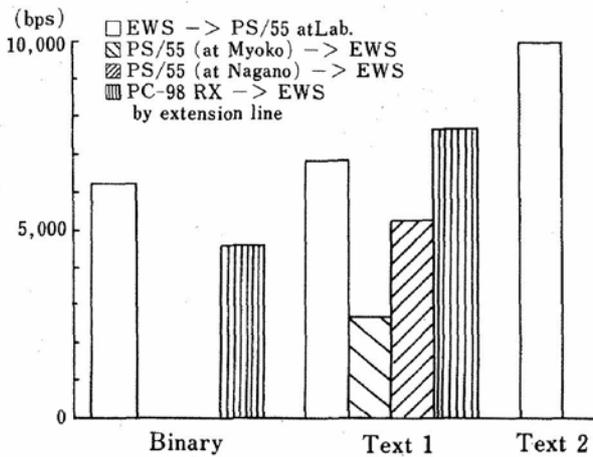


図4 データ転送実験結果

た。一方、筋電図計測データのようなバイナリファイルでは、通信プロトコルのデータ圧縮の恩恵を受けることができないので、約5,000 bps位の通信速度に留まった。

一方、通信機器はそのままノートブックコンピュータのみ PC 9801 NS/L に変更し、アーチファクト除去を含めた通信実験を行った。実験では、筑波大学や新潟市郊外、市内などから研究室

のEWSに対して通信を試みた。実験に用いたバイナリデータは、10 kBのシミュレーションデータである。通信速度はPS 55 /noteの場合と比較して大幅に低下し、PCからEWSへのデータの送信に666-1,038 bps、逆にEWSからのデータをPCへ受信するのに266-400 bpsを要した。なお、10 kBのデータに対するアーチファクト除去はEWSにて数秒で終了した。

3.2 ファジィアーチファクト除去能力

図5は一定収縮時に計測した表面筋電図に、疑似的なアーチファクトノイズ(e)を加えてシミュレーションデータ(a)を作成し、従来のアーチファクト除去法(d)とファジィアーチファクト除去法(c)の能力を比較したものである。なお、アダプティブ処理は動的運動時では必須であるので、ここでは、従来のアーチファクト除去法とファジィアーチファクト除去法、ともにアダプティブ処理を加えた。

アーチファクト推定波形を比較して見ると、

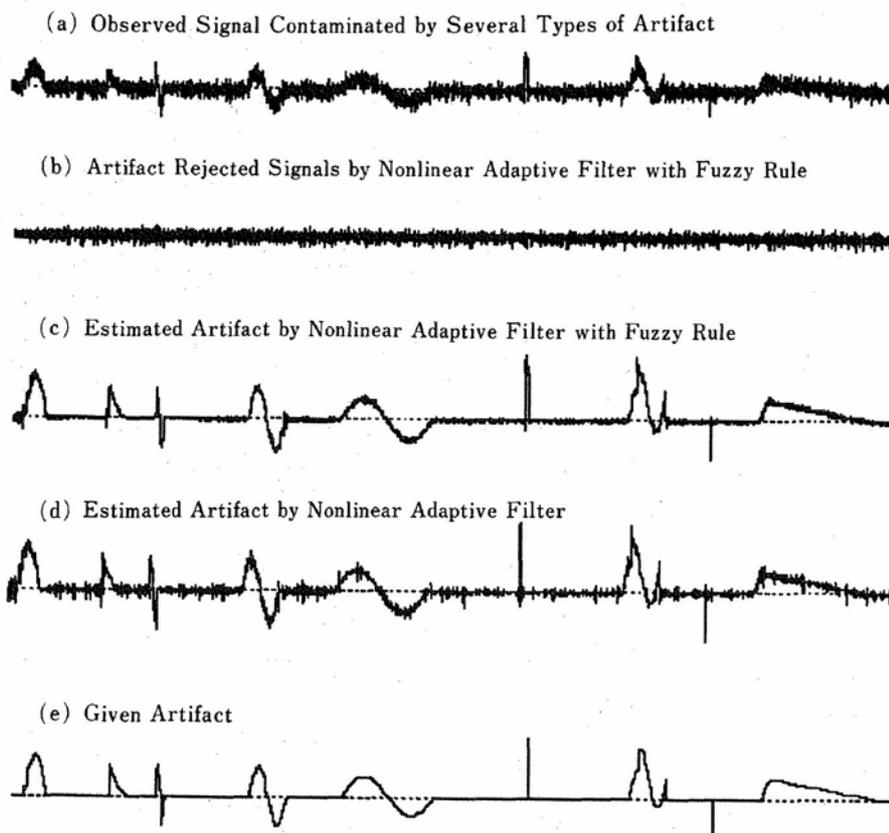


図5 シミュレーション実験結果

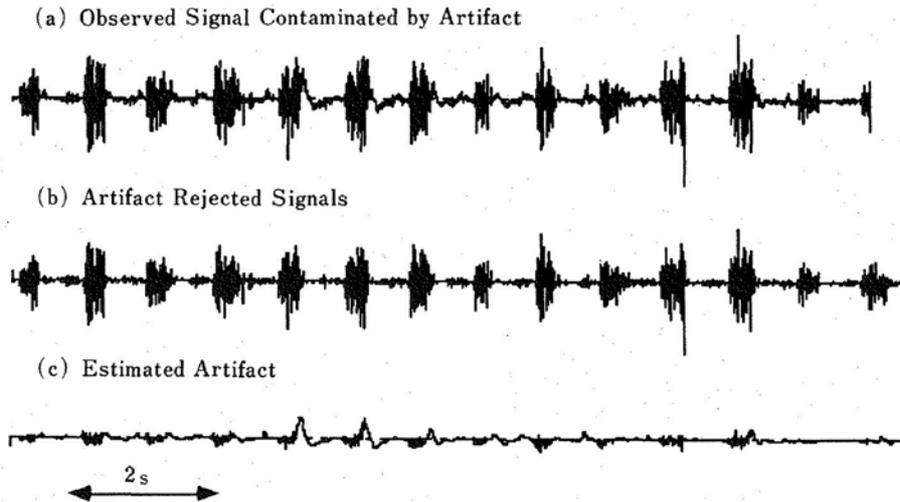


図6 動的運動時でのアーチファクト除去結果

ファジィアーチファクト除去法での推定波形 (c) は、従来の方法 (d) にくらべ非常によく与えられたアーチファクト (e) を推定していることがわかる。とくに、アーチファクトの振幅が小さい部分や、なだらかな変化を示す部分での効果が大きかった。その結果、シミュレーションデータ (a) からファジィアーチファクト除去法での推定波形 (c) を引くことで、希望する表面筋電図のみの信号 (b) が得られた。

図6は、実際の運動時表面筋電図に、ファジィアーチファクト除去法を適用した結果である。この際、ファジィアーチファクト除去能力を有効に引き出すため、 $\sigma_e^2(n)$ の初期値を調整した。すなわち、動的運動時では $\sigma_e^2(n)$ の初期値推定に十分なだけの局所定常区間が得られないため、推定値を実験的に調節してやる必要があった。図中 (b) は、 $\sigma_e^2(n)$ の初期値推定値を約3倍にして処理したものである。

4. 考察

4.1 移動体通信の長所短所

移動体通信によれば、フィールドなど電話回線が敷設されていない場所で、携帯型ノートブックコンピュータと研究室のEWSとを接続し、EWSの恩恵をフィールドで受けられるメリットがあ

る。さらに、アーチファクト除去法をEWSから提供すれば、少なくともフィールド実験の有効性を判断することができる。

このような考えに基づきシステムを構成し実験を行った結果、アーチファクト除去法の有効性は確認できたが、現在の移動体通信では期待した転送速度が得られなかった。現状の通信施設で、フィールド実験支援システムに利用するには少なくとも電話回線が必要である。地域にもよるが、フィールド実験のためのISDN回線の臨時敷設も可能であるので、できればISDN回線の利用が好ましい。また、移動体通信の転送速度の問題も、近い将来、通信方式のデジタル化によって解決されていくであろう。

一方、将来的には、ノートブックのEWSも安価になり、フィールドへ持ち出すことが可能となろう。しかし、詳細な解析をフィールドで実施することは、実験の効率が悪いと思われる。フィールドでは、データ解析が正しく行える正確な実験を行うことが第1の目標である。そのため、フィールド実験はフィールドで計測に専念するフィールド実験グループと、研究室で計測を支援し解析をすすめる解析支援グループとに分け、この両者をネットワークで接続するスタイルが望ましい展開と考えている。

4.2 EWS から提供する筋電図計測支援プログラム

EWS から提供する筋電図計測支援プログラムとして、アーチファクト除去法と運動時筋疲労度推定法の導入を進めている。本報告では、アーチファクト除去法に対して提案するシステムの評価を行った。

通信回線を通じて解析を進める際のメリットは、より価値の高い筋電図計測支援プログラムが利用できることにある。さらに、計測支援プログラムの管理が容易であり、同レベルの解析を同時期にすべてのフィールドで手に入れられることにある。この点では、EWSでのアーチファクト除去法と通信回線の組み合わせは、十分に効果のあるものとする。提案するシステムの特徴を進展させていくためにも、さらに、運動時筋疲労度推定法等の導入を積極的に進めていく必要がある。

5. まとめ

フィールドに持ち出したノートブックコンピュータと移動体通信とで、フィールドでもワークステーションの解析能力を随時提供できるシステムを提案した。フィールド実験解析支援システムでは、移動体通信を使用して、筋電図およびその他のデータの送受信を行い、フィールドでもある程度解析を行うことで、研究室での本格的な解析に役立つ効率的なデータ収集を可能としようとするシステムである。

通信実験では、2種類のノートブックコンピュータを用いて、種々の条件下で実施した結果、機種や通信条件にもよるが、筋電図データのようなバイナリデータで約1,000 bps程度であった。今回用いたモデムはMNPclass 10のものであり、移動体通信のような不安定な通信条件の下でも、ある程度の通信速度が確保できるものである。この通信速度では、10 kB程度のデータを約2分前後で通信できる。この程度で、十分か否か

は、今後の実験の経過を見て判断したい。いずれにしても、より高速なモデムや通信方式の開発や移動体通信のサービスエリアの拡大にとともに、通信速度の向上はそれほど難しいものではないと考える。

一方、ワークステーションによる筋電図計測支援プログラムとして、今回はアーチファクト除去法を開発した。開発に際し、従来の方法の欠点をファジィ推論により改善した。その結果、アーチファクト除去に関しては、ほぼ満足のいくものであった。このアプリケーションはネットワークを通じて、全国いたるところからもアクセスすることができ、より操作性を改良して、この分野の研究者へ提供して行きたいと考えている。

謝 辞

本研究に対して研究助成をいただいた、石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝致します。また、実際のコンピュータプログラムの作成と通信実験には、新潟大学工学部情報工学科学生小林卓生君に手伝っていただいた。

文 献

- 1) 金子秀和, 木竜 徹, 牧野秀夫, 齊藤義明; 表面筋電図に混入するアーチファクトの一除去法, 電子情報通信学会論文誌, J71-D, pp1832-1838 (1988)
- 2) M. Ono, K. Arakawa, M. Mori, T. Sugimoto, H. Harashima; Separation of fine crackles from vesicular sounds by a nonlinear digital filter, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME 36, pp286-291 (1989)
- 3) 荒川 薫, 原島 博; バックプロパゲーションによる階層形ニューラル非線形フィルタの設計, 電子情報通信学会論文誌, J74-A, pp421-429 (1991)
- 4) D. Lee, M. Morf, F. Fridlander; Recursive least squares ladder estimation algorithm, *IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process.*, vol. ASSP 29, pp627-641 (1981)
- 5) B. Kosko; *Neural net-works and fuzzy systems*, Prentice-Hall, pp262-361 (1992)