

## Technical Note

### フィルムデータの平滑化法について

#### Smoothing method for kinematic data derived from film motion analysis

桜井伸二\* 池上康男\*

Shinji SAKURAI\* Yasuo IKEGAMI\*

All kinematic studies utilize data obtained from some type of measurement and data reduction system, which inherently introduces noise into the displacement signal. This noise causes large inaccuracies when velocities and accelerations are determined by direct differentiation. Therefore, some form of additional data treatment, such as digital filtering, is essential.

Though digital filtering is superior to reduce the noise, there occur serious problems in using this method. These are 1) difficulty to determine the cut off frequency of the filter objectively and 2) generation of terminal distortion on both ends of data by filtering.

Utilizing a simulation and actual data analysis, methods to solve these problems were investigated.

Results are as follows :

(1) A spectrum analysis of the velocity or acceleration data derived from direct differentiation of non-filtered spatial data was helpful to decide the suitable cut off frequency of the filter.

(2) A technique of "finite difference followed by filtering" decreased the terminal distortion, while other conventional techniques, such as often utilized "filtering followed by finite difference" method, were clearly inferior.

バイオメカニクスの分野において、高速度撮影されたフィルムやビデオによって得られた画像の分析は最も重要な研究手段の一つである。これらの一連の画像の座標計測により測定すべき点の位置変化を表わす時経列データが得られる。これらのデータを数値微分することによって速度・加速度、角速度・角加速度等の二次データを求め、運動方程式に代入することにより、力やトルク、エネルギー・パワー等の力学量を算出することが原理的には可能である。ところが実際には位置データ列の直接の数値微分操作によっては信頼できる二次データを得られないことが多い。それは一般に座標計測の際に発生すると考えられる誤差（ノ

イズ）の高域成分が微分操作によって増幅されることに起因すると考えられている<sup>1)3)7)</sup>。そのためフィルムなどから得られた生(原)データにノイズ除去のための何らかの前処理を施し、その後に数値微分を行う必要がある。座標計測により発生するノイズは一般にランダムノイズとなるため、ノイズの除去は何らかの形で原データを平滑化することによってなされる。これまで多くの研究者により、データの平滑化の方法が報告・検討されてきている。初期の時代に多く用いられた位置データのグラフをフリーハンドで滑らかな曲線に直すという作図法<sup>5)</sup>から、近年では電子計算機の普及により各種の移動平均法、スプライン関数、

\*名古屋大学総合保健体育科学センター

\*Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University

デジタルフィルターを用いる方法、あるいはデータ列全体を多項式で近似する方法 (polynomial fit) などが平滑化の手段として主流となりつつある<sup>7)</sup>。

デジタルフィルターは Winter ら<sup>6)4)</sup>によってそのフィルムデータの平滑化における有効性が紹介され、現在広く用いられている。本稿ではこのデジタルフィルターによる平滑化法の特徴や問題点を検討し、精度のより高い有効な平滑化の手順について考察を行う。

### (1) デジタルフィルターの特性について

Winter ら<sup>6)</sup>, Pezzack ら<sup>4)</sup>はフィルムデータの平滑化に二次のバターズ型デジタルフィルターを用いることの有効性を報告し、位相のずれをなくすためこのフィルターを双方向に計二回施す方法を推薦している。まずこのフィルターの特徴を調べるために擬似データを用いてシミュレーションを行った。

このシミュレーションでは、1秒間に1回および5回の回転速度で、半径1mの円運動を行っている点を毎秒100コマのフィルム速度で高速撮影し、フィルムの分析からその  $x$  (または  $y$ ) 座標値を得たと仮定した。したがって真の  $x$  及び  $y$  座標値は時刻  $t_n$  の関数として次のように表わされる。

$$x_n \text{ (or } y_n) = A \cdot \sin(\omega \cdot t_n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $A=1$  [m],  $\omega=2\pi$  (or  $10\pi$ ) [rad/sec]。

ここでフィルム分析の際に生じる誤差としてコンピュータにより平均が0、標準偏差が0.005 [m] の正規乱数を発生させ、それを(1)に加えて擬似データとした。(この乱数の標準偏差の決定については (注) を参照)

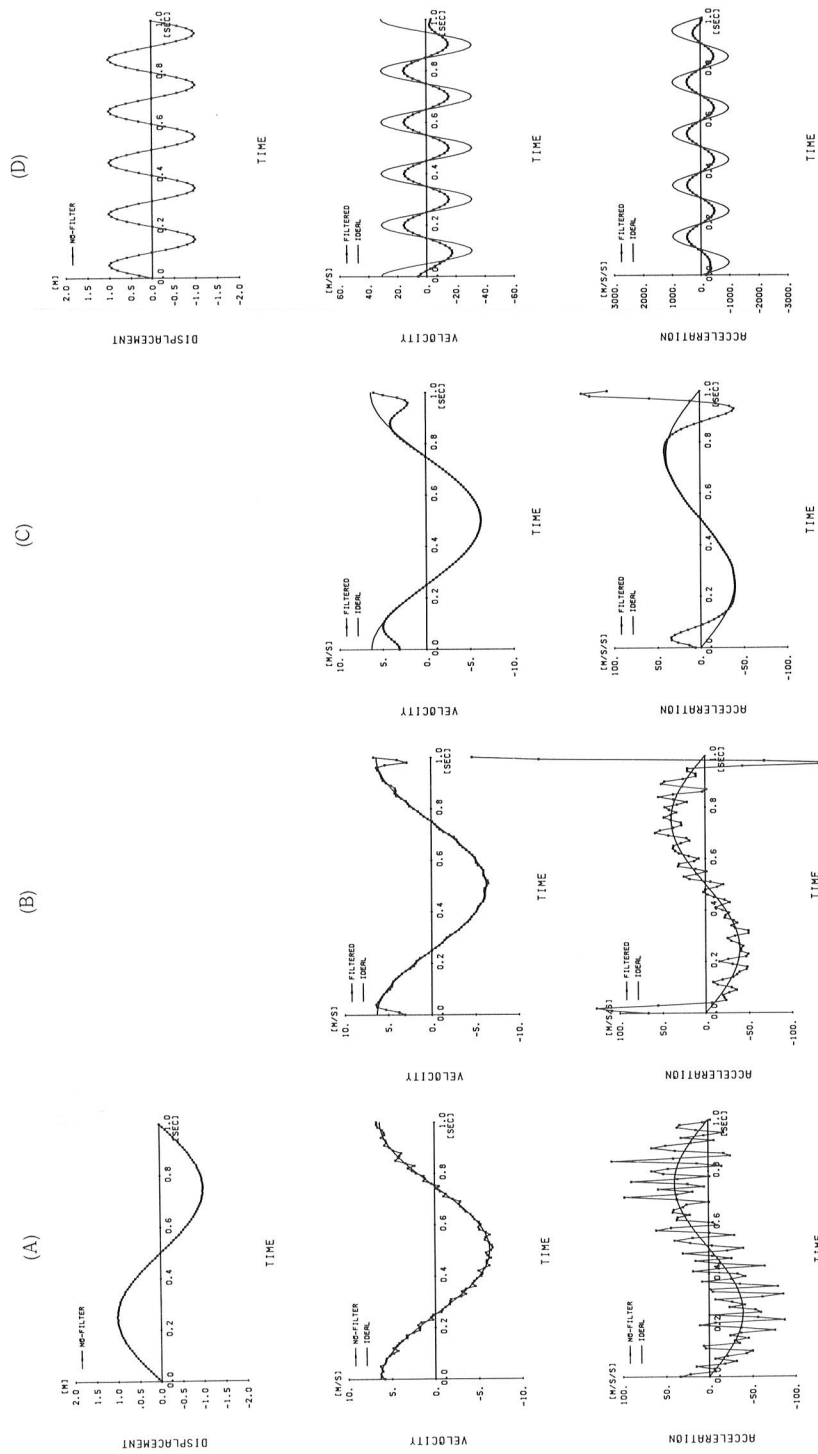
図1には上段より原データ (位置データ)、その一階微分 (速度データ)、二階微分 (加速度データ) を示した。同じ図中にはそれぞれ正弦曲線の理論的な微分値をあわせて示した。なお、数値微分は一般に用いられている二階差分の方法 (finite difference<sup>2)7)</sup> によった。図1-Aには毎秒1回転のデータを平滑化を行わずに微分した場合を、図1-B, Cにはそれぞれ同じデータ列に

それぞれ 20Hz, 5Hz のカットオフ周波数のデジタルフィルターを双方向から2回施した場合を、また図1-Dには毎秒5回転のデータに図1-Cと同じ5Hzのフィルターを施した場合を示した。

位置データについてはノイズの存在が肉眼ではほとんど読みとれないにもかかわらず、平滑化を行わない場合には速度・加速度と微分操作を重ねるにつれノイズが増大し、三角関数曲線の滑らかさから離れ、二階微分データではようやくその傾向が認められる程度の精度となってしまうことがわかる (図1-A)。20Hzのカットオフ周波数のデジタルフィルターを施してから微分処理を行うと、かなりノイズが少なくなり加速度変化の傾向をよく示すようになるが、まだ定量的な分析を行うのに十分な精度とは言い難い (図1-B)。同じデータ列に5Hzのデジタルフィルターを施すと加速度データにおいてもノイズはほとんど消え、データ列の両端の部分を除く中央部 (約60%) では理論値と非常に良い一致を示す。しかしデータ列の両端ではかなり大きな歪みが生じている (図1-C)。これと同じデジタルフィルターを毎秒5回転の原データに施したところ、原データの振幅がおおよそ  $\frac{1}{2}$  となり、一見データ列は滑らかではあるが、速度・加速度のデータともピーク値が約  $\frac{1}{2}$  となり、やはり定量的な分析には不適であった (図1-D)。

これらの結果から次のようなことが言えよう。一般に位置データからの直接の数値微分で得られたデータは信頼できないことが多く (図1-A)、適当なカットオフ周波数のフィルターを施すことにより良好な二次データが得られる (図1-C)。ただし、信号とノイズの周波数成分およびフィルターのカットオフ周波数のかね合いによって、平滑化できなかつたり、逆に過度の平滑化によりピーク値の低減を招くことがある (図1-B・D)。またフィルタリングによりデータ列の両端で「歪み」を生ずることがある (図1-B・C)。

### (2) フィルターのカットオフ周波数の決定について



**Fig. 1.** Simulation of noise reduction procedure using a digital filter. The signal used was sine wave (frequency : 1 and 5Hz, amplitude : 1m) and normal random numbers (S. D. : 0.005m) were added to the signal as virtual noise.

Velocity and acceleration were obtained by finite difference method.

top : displacement

middle : velocity

bottom : acceleration

(A) Signal : 1Hz, no smoothing was conducted.

(B) Signal : 1Hz, smoothed by digital filter whose cut off frequency was 20Hz.

(C) Signal : 1Hz, filtered by 5Hz digital filter.

(D) Signal : 5Hz, filtered by 5Hz digital filter.

データ列の平滑化をどの程度の強さで行うかという決定は“フリーハンドで滑らかなカーブを描く”といった平滑化法に代表されるように、ほとんど研究者の主観と経験に基づいて行われてきた。

最近ではデジタルフィルターや移動平均法など周波数特性の明らかな平滑化法が用いられるようになり<sup>1)2)3)6)</sup>、またデータ列について周波数分析を行うことが推奨されるようになってきた<sup>3)6)7)</sup>。このように平滑化法の周波数特性がわかっている時、もし信号とノイズのそれぞれの周波数帯域を完全に知ることができ、そしてまたその両者の帯域が完全に分離していたなら、データ列からノイズを完全に除去することができるであろう。しかしながら映像分析によるデータ列上のノイズは広い周波数帯域に存在し信号の帯域とオーバーラップしていると考えられ<sup>1)</sup>、また信号とノイズのそれぞれの周波数帯域を完全に知ることが難しい。ノイズが混入しにくいアナログ測定法などの併用により信号の周波数成分を明らかにしたり、フィルム画面上の静止点の分析からノイズの周波数成分を明らかにするなどの操作から、信号とノイズの周波数帯域をある程度まで見積ることは可能であるが、ノイズだけを除去するという決定的な方法はないと考えられ、結局は研究者の試行錯誤と主観に基づくことになる。

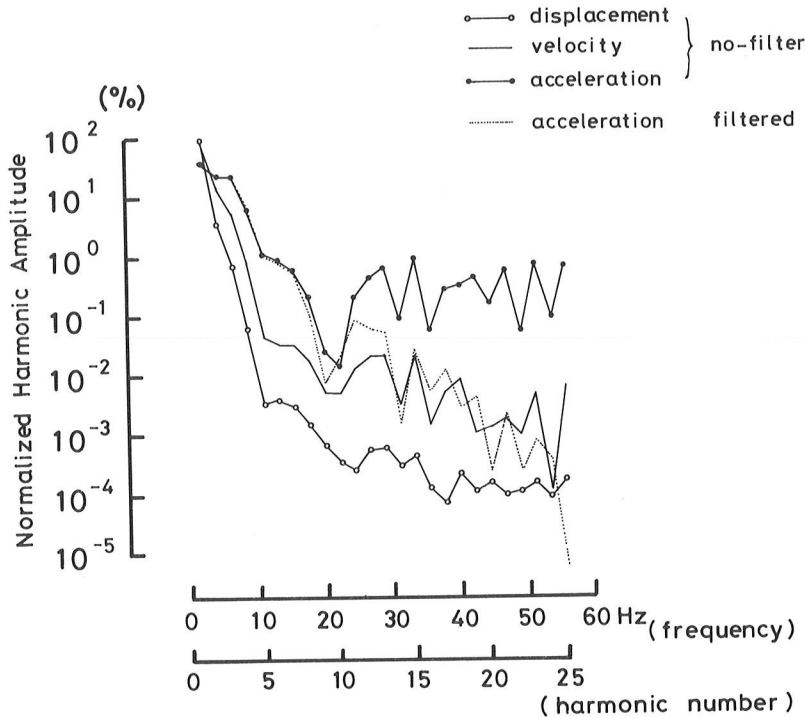
一般にはヒトの運動の周波数成分はある周波数以上の高域には存在しないだろうという仮説のもとに、広い周波数帯域に分布するノイズのうち微分操作によって大きく増幅される高域成分を除去する必要から、データ列のパワースペクトルに基づいてフィルターのカットオフ周波数を決定することが实际的であろう。すなわち、原データ列のパワースペクトルを求めその何らかの不連続性やパワーの集積の具合からカットオフ周波数を決定するのである。例えば、Winter<sup>6)</sup>は歩行中のつま先の鉛直方向変位のパワースペクトルを求め、そのパワーが4.8Hz以上の高周波帯域でほとんど一定となることおよび4.8Hz以下の帯域にパワーの99.7%が集中していることからフィルターのカットオフ周波数を4.8Hzに決定している。また大道<sup>3)</sup>はテニスラケットの速度データ列

を通常の一回のみの分析による方法と反復繰り返しの分析による方法で求め、それぞれのパワースペクトルの比較からカットオフ周波数の決定法について考察している。

図2には金槌で釘を打つ連続動作(空打ち)を撮影(250fps)、分析したフィルムからその一周期におけるハンマーヘッド部の鉛直方向座標値について、その原データ列(位置)、一階微分データ列(速度)、二階微分データ列(加速度)のそれぞれのパワースペクトルを示した。この図によれば、位置データ列のパワースペクトルは低域から高域にかけてなだらかな減衰傾向を示しているのに対し、加速度データ列では第9あるいは第10高調波(20~22.5Hz)で明瞭な極小傾向を示している。またパワーの集積の第30高調波(67.5Hz)までを100%としたとき99.7%となるのは位置データ列で第3高調波、速度データ列で第4高調波であるのに対し、加速度データ列では第29高調波でも99.7%には達しなかった。これらのことから、パワーの集積程度でカットオフ周波数を決定するよりも、データ列、特にまず微分操作を行い高域成分を増幅させた後、その加速度データ列のパワースペクトルの不連続性からカットオフ周波数を決定するのがよいのではないかと思われた。

図3には、このようにしてカットオフ周波数を20Hzと決定したときの先のデータのフィルタリングの結果を原データ列と合わせて示した。20Hzのカットオフ周波数のデジタルフィルターは25Hzの2次のバターワース型デジタルフィルターを双方向から各一度施すことにより得た。元の加速度曲線上のギザツキがランダムノイズによるものとすれば、かなり良好な平滑化結果と言えるであろう。

なお、上記でカットオフ周波数を決定する際に用いられた周波数分析は、データ列の周期性を仮定している。分析の対象となるヒトの動作には歩行や金槌を振る動作のような繰り返し動作ばかりではなく、幅跳びや投動作のように単発的な動作も多く含まれる。このような単発的な動作では、データ列両端の不連続によって高域成分が増大す



**Fig. 2.** Comparison of several harmonic components of the movement of a hammer head during hitting motion.  
Sum of the power up to 30th harmonic number is normalized as 100%.

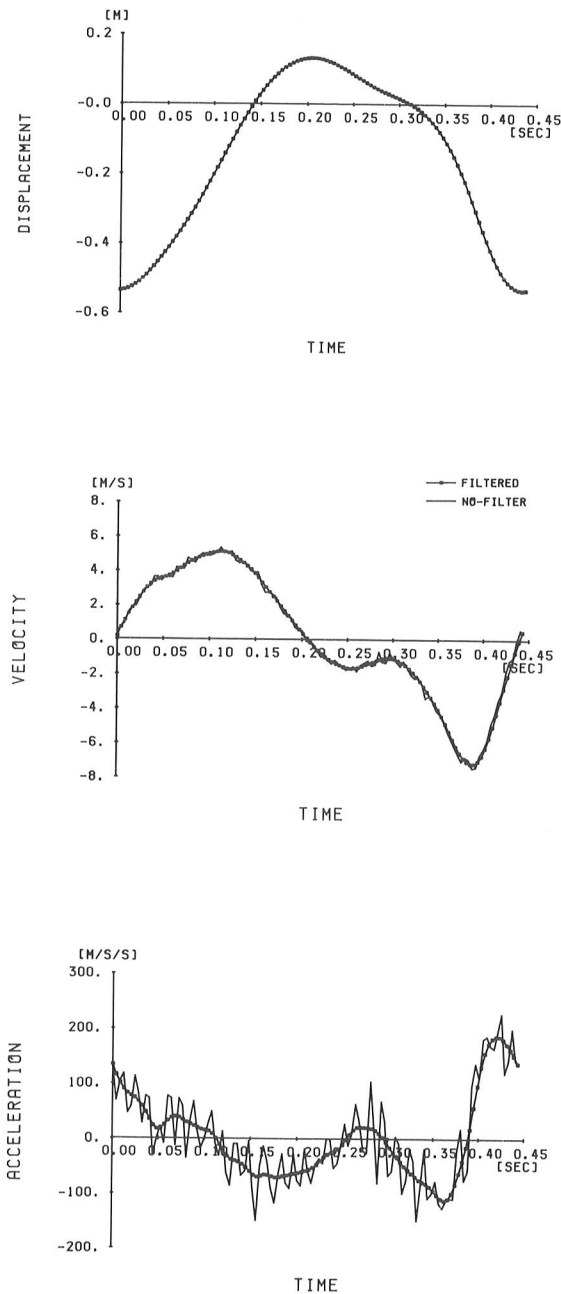
るなど周波数分析の結果に重大な影響が出ることも考えられる。それゆえ、両端の処理方法について何らかの工夫が必要となるだろう。

また大道<sup>3)</sup>が指適しているように、打撃・着地などの急激に大きな力（加速度）の変化がおこる運動では、信号自体が非常に高い周波数成分をもつと考えられるので、カットオフ周波数の決定どころか、フィルムによる正確な分析までもが困難となる。それゆえ“素振り”の分析を行いインパクト前までの動作についてのみ考察するなど、何らかの調整や工夫が必要となろう。

### (3) フィルタリングによるデータの両端の歪みの改善

先述の正法波形の微分処理で得られた第二の問題点は、デジタルフィルターを施すことにより原波形の両端が異常に歪められうること

ある。Pezzack ら<sup>4)</sup>の例示のような、それぞれ両端の速度がほぼ0に近い形となっている場合にはこのような歪みはほとんど見られないが、速度値がある大きさの値を持って（つまり位置を変えながら）データ列が開始あるいは終了しているときにはかなり大きな歪みとなって表われる。その歪みの程度は原データの性質やカットオフ周波数などにより異なるが、フィルターの演算式の性質から、また両方向から一度づつのフィルタリングを行っていることから止むをえないことであり、減衰率を高める目的で、二度・三度とフィルタリングの回数を増せば両端の歪みも大きく、その範囲も広がっていく。そのため、フィルム分析を行う際には実際に必要とする範囲より前後に10コマ~数十コマ程度余計に分析を行い、この歪みを分析必要範囲外にするなどの方法が望ましいと考えられる。



**Fig. 3.** Vertical displacement, velocity and acceleration of the hammer head during hitting motion. Solid line shows the data based on non filtered "raw" displacement data. Line with dots showed the data calculated after data are filtered twice with a second order low-pass digital filter whose cut off frequency is 25Hz.

しかし、手間や時間の問題はもちろん、分析点が分析不可能な範囲に移動してしまうなど、フィルタリングの関係でこのような作業が不可能なことも少なくない。そこで分析必要範囲と分析範囲をなるべく等しくする（つまりフィルタリングによる両端の歪みを小さくする）試みが必要である。

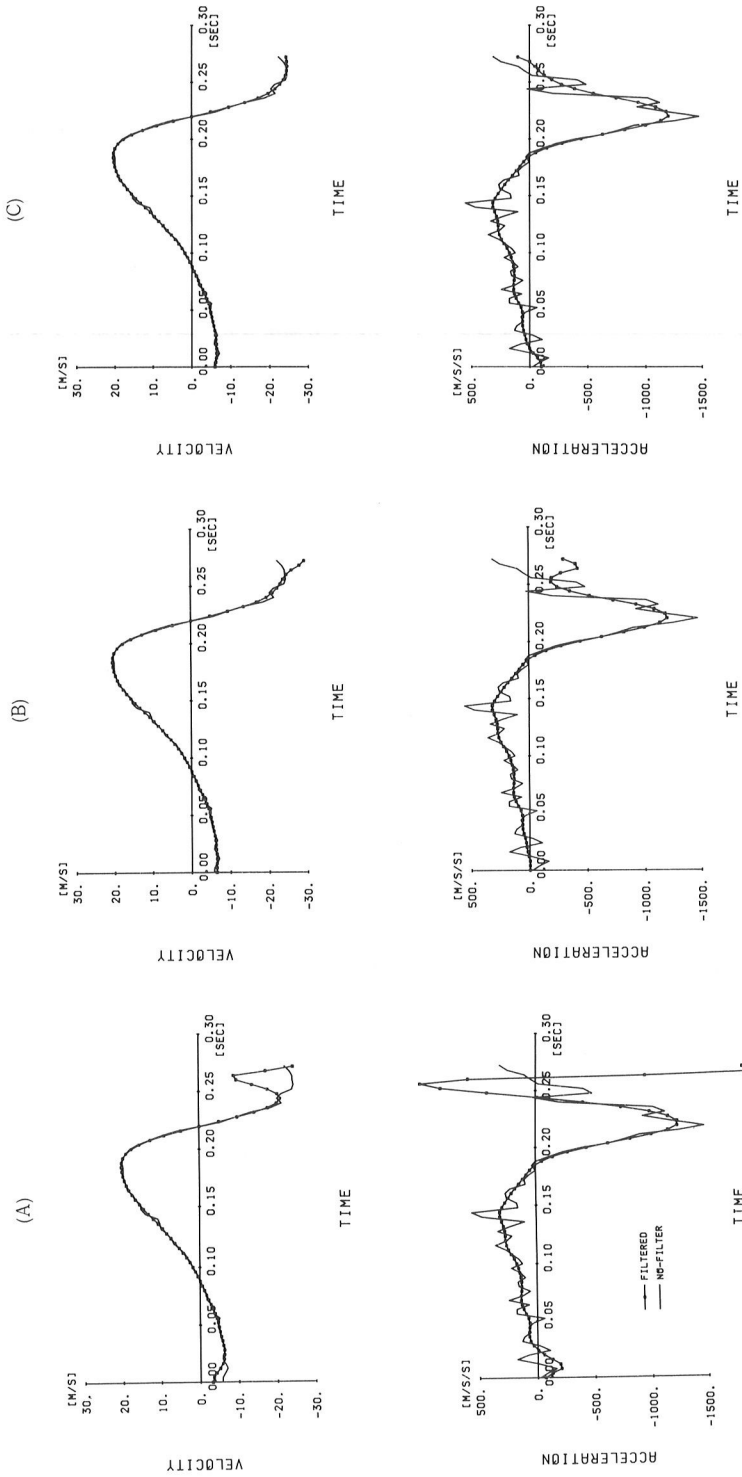
例としてテニスのサービス動作中（素振り）のラケットの鉛直方向座標値から求めた速度および加速度変化を取り上げ図4に示した。図4-Aは従来のフィルタリングを行ってから微分操作を行うという方法によった結果である。図4-Bは両端で各15データに最小二乗法を適用し四次式で近似を行い、それぞれ30データ分、計60データを発生、それらを追加してフィルタリングを行い、その後微分操作を行うという方法によった。また図4-Cはまず微分操作を行い、その速度・加速度データ列にフィルタリングを行った結果である。比較のためそれぞれには平滑化を行わない結果もあわせて示した。

三者の結果を比較した結果、図4-Cの、最初に微分操作を行った後に平滑化を行う方法により最良の結果が得られた。これまでは、まず位置データ列にフィルタリングを行い、次に微分操作を行う方法<sup>7)</sup>が多く見られたが、フーリエ解析の観点からすれば、微分操作およびデジタルフィルタリングのいずれを先に実施しても結果として得られる周波数成分（フィルタリング効果）は影響を受けない。それゆえ、まず微分操作を先に行い、次に平滑化を計るのが最良の方法と考えられた。

### ま と め

シミュレーションデータ、および実際のフィルム分析から得られたデータをもとに、デジタルフィルタの特性・問題点などについて考察した結果、デジタルフィルタを用いた平滑化法においては、次のような手順を取ることで、より良好な結果を得られるものと考えられた。

- (1) まず各分析点の位置データ列・角度データ列に数値微分を実施し、加速度および角加速度データ列のパワースペクトルから信号データ列



**Fig. 4.** Comparison of techniques used to eliminate the terminal distortion due to data smoothing.

Velocity (top) and acceleration (bottom) are obtained from the vertical displacement data of racket head during tennis service motion.

(A) determined by "digital filtering followed by finite difference".

(B) determined by "extrapolation by applying 4th order polynomial fit to each end of displacement data followed by digital filtering and finite difference".

(C) determined by "direct finite difference of raw data followed by digital filtering".

の周波数成分における主領域を推定し、カットオフ周波数を決定する。

- (2) 速度・加速度（あるいは角速度・角加速度）の各データ列に、上記のように決定されたカットオフ周波数のデジタルフィルタリングを実施する。

(注) フィルム分析法と仮想ノイズの標準偏差の決定について

当センターでは 16mm フィルムの分析（デジタルタイピング）には NAC 社製フィルムモーションアナライザーを用いている。この分析器は有効投影面が約 18×25cm であり、内蔵のカーソルの分解能は  $x \cdot y$  方向それぞれ 0.05mm である。このカーソル（ヘアライン）の交点を手で投影面上のある点に合わせ、フットスイッチを踏むことによりその座標値がコンピュータに取り込まれる。なお、フィルム静止機構などの機械的要因に基づく「原点誤差<sup>3)</sup>」を除去するため、必要な分析ポイントに加え、必ずフィルム画面上の静止点のデジタルタイピングを行い、各ポイントの座標値はその静止点に対する相対値として取り込むことにしている。アナライザー画面上で得られたこの座標値は、あらかじめ求めておいた縮尺（倍率）を乗じたり、座標軸の回転を行ったりした後、実平面上の座標へと変換され記録される。

誤差の大きさを評価するためには予備的に以下のような方法を用いた。

テニスのサーブ動作を撮影したフィルムからインパクト直前のある一コマを選び、この画面上の四つの点（ラケットヘッド、グリップ部、手首、肘）の座標値を通常の方法でデジタル化した。同じコマについてこの分析を 100 回行ったが、1 回の分析を行う毎に必ずフィルムを数コマずつ前後に送った。分析にはこの作業に熟練した者があつた。

それぞれの測定値はデジタル化平面上で  $x$  方向で 0.0059～0.0092cm、 $y$  方向で 0.0123～0.0148cm の標準偏差で分布していた。有効デジタルタイピング平面が 18×25cm であり、実際のデジタルタイピングに用いられる範囲を 15×15cm 程度とすれば、これらの標準偏差はそのおよそ  $\frac{1}{1000}$  あるいはそれ以下の程度のもと考えられる。ただし、グラフペンを用いたり未熟練の者が分析を行ったり、あるいはフィルミングの条件が悪い時には、これより誤差は相対的に大きくなるであろう。

以上のようなことを考慮して、振幅 1[m] の正弦波形信号に対し、平均値 0、標準偏差 0.005(m) の正規乱数をコンピュータにより発生させ、それを仮想ノイズとした。

## 文 献

- 1) 小林一敏, 大島義晴: 映像解析におけるフィルタリング. *Jap. J. Sports Sci.* 2, 172-181, 1983.
- 2) 宮地 力, 小林一敏: 画像分析による速さの測定. *Jap. J. Sports Sci.* 3, 666-674, 1984.
- 3) 大道 等: 写真解析の読み取り誤差と微分演算 (速度・加速度算出の問題点). *Jap. J. Sports Sci.* 2, 182-199, 1983.
- 4) Pezzack, J. C., R. W. Norman and D. A. Winter: An assesment of derivative determining techniques used for motion analysis. *J. Biomechanics*, 10, 377-382, 1977.
- 5) Plagenhoef, S: Patterns of human Motion. (A cinematographic analysis). pp. 29-31, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1971.
- 6) Winter, D. A., H. G. Sidwall and D. A. Hobson: Measurement and Reduction of noise in kinematics of locomotion. *J. Biomechanics*, 7, 157-159, 1974.
- 7) Winter, D. A.: *Biomechanics of human movement*. pp. 25-39, John Wiley & Sons, New York, 1979.

(昭和 60 年 1 月 28 日付)