OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	わがいとしのFFT
Author(s)	柳田, 益造
Citation	大阪大学大型計算機センターニュース. 1978, 31, p. 47-59
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/65398
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

わがいとしのＦＦＴ

大阪大学産業科学研究所
柳　田　益　造

前口上

私は、修士一年生の頃から今まで約１０年間、ここの計算センターを利用させてもらっております。その１０年間に私が最も多用したプログラムが標題にあるＦＦＴのサブルーチンであります。ご存知の方も多数いらっしゃるとは思いますが、ＦＦＴはFast Fourier Transform（高速フーリエ変換）の略で、離散的フーリエ変換（Discrete Fourier Transform：DFT）を計算機で行なう場合の高速演算アルゴリズムに付けられた名称であります。このサブルーチンに関するお話しを、私個人の独断と偏見に満ちた公正無比な立場から、軽い気持ちで書いてみました。急ぎのご用のある方、難かしい研究だけにしか興味のない方、下衆の書いた駄文を見ると腹をこわすという持病のある方は、遠慮なく読み飛ばしていただくことを切にお願い申し上げます。

ＦＦＴの生いたち

ＦＦＴのアルゴリズムは1965年にJ.W.CooleyとJ.W. Tukeyによって発表された[1]のでありますが、ここでその時代背景を信号処理というメガネを通して覗いてみると次の二つのことが言えると思います。まず第一に挙げるべきは、ディジタル計算機の発達とその利用分野の拡大であります。第二は、データ処理における高速演算への要求でありましょう。現時点から振り返ってみますと、ＦＦＴの開発にはアルゴリズム論とか行列のクロネッカ積というようなものも一枚加わっているべき性質の問題でありますが、当時はそんなことは独立に、要するに「大量の離散データの相関関数とか周波数スペクトルを何とか計算機で実用的な時間内で計算する方法はないか？」ということに、沢山の人々、特に今で言う信号処理屋さんたちが血道をあげていたのでありましょう。Ｎ点のデータの離散的フーリエ変換には、それまではN^2回の複素乗算と加算を費していたのでありますから、Ｎが少し大きい数になるとそれは急速に計算時間の増大につながりますので実用的方法とはなり得なかったのであります。演算回数に関するこの困難な状況をN^2から$2N\log_2 N$にまで軽減したＦＦＴの威力は絶大でありました。そしてＦＦＴはディジタル技術によるスペクトル分析を必要とするすべての分野から、中国流に言う“熱烈歓迎”を受け、一躍時代の寵児となったのであります。もしＦＦＴの出現が遅れていたなら、計算機によるスペクトル分析を用いる研究、例えば音声分析の研究などはとても今のように隆盛にはなっていなかっただろうと思われます。

その後ＦＦＴアルゴリズムと同様の考え方が、Walsh変換、Hadamard変換、Haar変換などにも適用されて高速Walsh変換[2]、高速Hadamard変換[3]、高速Haar変換なども発表されましたが、これらは乗算をしなくても済むという点から考えるとＦＦＴよりも簡単ですので、むしろこれらの方がＦＦＴよりも先に出現していて当然だったように思われます。しかしこれらの変換における直

交関数系が余りにも人工的で特殊なものであるため、現実の物理現象のスペクトル解析には不向きであるということで、その研究に対して積極的な要請が高まらなかったので、これらよりも計算は複雑ではあるが実用的に有用で、かつ各分野からの要請の多いフーリエ変換に対処するＦＦＴアルゴリズムが先に開発されたものと考えられます。

ＦＦＴアルゴリズムは主として標本点の個数を２のべき乗であるようにして適用される場合が多いのですが、原理的には必ずしも２のべき乗である必要はなく、標本点の個数が簡単な整数の多重積になっていれば適用可能であります。[1] また最近ＦＦＴアルゴリズムの改良型が２，３開発され、[4][5] それらの動作の比較も行なわれております。[6]

出　会　い

私がはじめてＦＦＴと出会ったのは、忘れもしない（？）今から９年前（１９６９年）のＭ１の秋でありました。同期の広田和夫君（現在、日立製作所生産技術研究所）と一緒に、産業科学研究所の加藤研へワラジを脱いで、音響関係の勉強をしようと自分の方向を決めかけていた頃のことであります。私の狭い視野から見た世界情勢では、巷は「万博まであと○○日」ということで賑っていた頃のことであります。私事にわたって恐縮ですが、私はバイオリンの音が好きで、レコードの中のバイオリンがStradivariだろうか、Guarneriだろうか、はたまたNicolo あるいはAndrea　Amati だろうかなどと、必死になって聴き分けようと空しい努力を重ねていたその頃のことが、今でも懐かしく思い出されます。

当時の加藤研では、教授を中心とした超音波医用計測装置の研究と、角所助教授（現在、産研教授、計算センター運営委員）を中心とした音声分析・合成の研究などが並行して進められており、上記の広田君と私は角所助教授の指導で音声分析関係の研究をはじめたのであります。音声の周波数分析に際して、それを計算機で行なうとき、離散的フーリエ変換の計算のためにＦＦＴが有用な道具となるわけです。当時、我々の研究室には郵政省電波研究所の高杉敏男氏からいただいたFFTサブルーチンのリストがあり、これが私とＦＦＴとの出会いでありました。その頃は、ＦＦＴが発表されてから既に４年経っていたことになりますが、日本ではまだＦＦＴが目新しかった頃でありましたので、多分阪大内ではじめてＦＦＴをランさせたのは我々であっただろうと考えております。

馴 れ 初 め

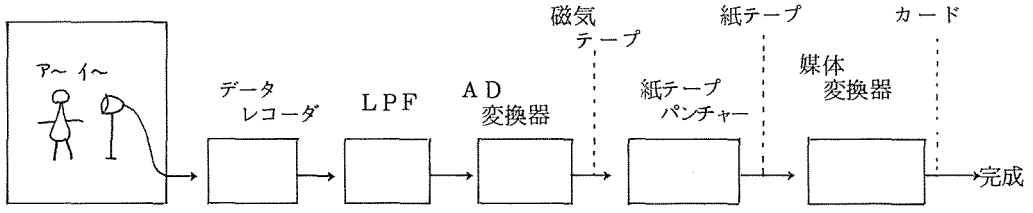
我々が音声分析に取り組んだ当初は、時系列解析の手法はまだ音声に適用されるには至っておらず、音声分析と言えば周波数分析法が主流を占めておりましたので、我々もその線を踏襲いたしました。しかし単にＦＦＴを使うだけでは、他の人の後を追いかけているだけになって自尊心を傷つけること夥しく、気分的にも甚だ面白くなく、従って精神衛生上極めてよろしくないので、もう少し手の込んだ、しかも他の人があまり手のつけていない分析法をやってみようとして目をつけたのがケプストラム分析法であります。この方法の原形は地震波の解析のために開発されたもので、そ

の直後（１９６４年）音声のピッチ抽出法としてアナログ装置で提案されたもの[7]であり、その４年後（我々二人が加藤研に出入りするようになる前年）にそれは、音声のホルマント（スペクトル上のエネルギー集中領域）周波数の抽出にも適用できるとして準同型分析という名称に変えられて発表されました。[8]ケプストラムというのは、対数スペクトルのフーリエ変換でありますが、これは周波数スペクトルの調波構造情報と包絡情報を分離するのに非常に有効な方法であります。

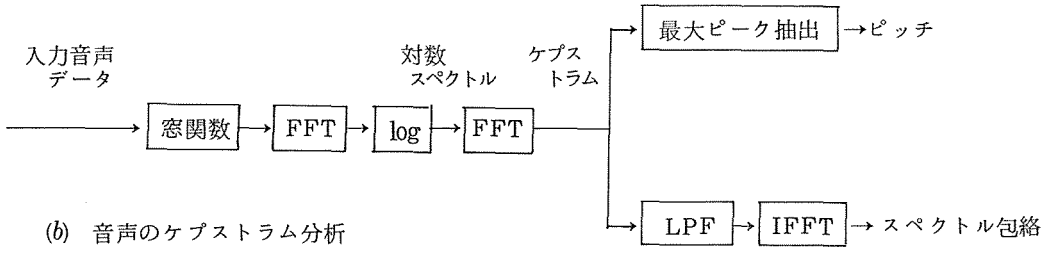
ところで、何事につけても手をつけはじめるときには困難を伴うもので、私がこのケプストラム法を計算機に乗せようとした時の苦労は主としてデータ作りに関するものでありました。

プログラムの作成についてはあまり苦労したという記憶は残っておらず、研究開始当初は生の音声波形のデータを作ることにかなりの日数を費しました。と言っても、声を出すのに何日もかかったのでは勿論ありません。その声を計算機が読んでくれる形にするのに日数がかかったのです。まず標準的日本語を発声できる人（これがなかなかそこら辺にはいないのです）を無響室に閉じ込めて、「アー」とか「イー」とかシャベらせて、それをデータレコーダで収録するのが第一段階です。次に、それを適当な低域沪波器に通してからＡＤ（アナログーディジタル）変換することになるわけですが、その機械が難モノなのであります。問題のＡＤ変換器は、ある一流メーカー（会社名は伏せておきます）のＤＰ－３００という機械で、出力は６単位の紙テープでありました。現在紙テープ出力というと時代遅れですが、当時のオフラインのものとしてはサンプリング速度、精度とどれをとっても立派な新鋭機でありました。しかし、この機械はこの機種の市販第一号機で、初期故障が続発し、非常に世話のやけるシロモノでした。今、そのＡＤ変換器は新しい磁気テープベースのＡＤ・ＤＡ変換器の横にくたびれた顔をして立っております。先日それをちょっと動かしてみようとしたところ、紙テープパンチャーのカッターが摩耗していて切れが悪く、メーカーに問合わせると「修理にかなりカネがかかりますよ」というので未修理のまま放置してあります。買った方も迷惑を被りましたが、売った方も当初はたびたび無料修理で東京から出張して来ておりましたのであまりもうからなかっただろうと思います。故障は多いし、紙テープへの出力は時間（データ１秒に対して約２０分）がかかるし、さんざんな目に会いましたが、とにかくこのＡＤ変換器をなだめすかして何とか紙テープにまでデータを落したのであります。さてその紙テープを計算機に読ませようという段階でまた足止めを喰ったのであります。というのは、当時の阪大の計算センターはバッチ処理での紙テープ入力を受け付けていなかったのです。（この困難は少し後になってＴＳＳが開始された段階で解消しました。）そこで仕方なく、紙テープからカードへの変換をするために、その変換機能をもった機械が空く日を電話で問い合せて吹田地区のデータステーションと当時豊中にあった計算センターへ、今日はこちら明日はあちらと飛び回ったのであります。とにかく猛烈な労力と時間をかけて音声のデータを作ったのであります。この頃、東京大学の藤崎研、京都大学の坂井研、東北大学の城戸研などでも音声情報処理をやっていたので、我々と同じような苦労をしておられたことと思います。（イヤ、カネ廻りのいい所はいい機械を買えるのでそんな苦労はしていないかな？）

やっとの思いで作った音声のデータと簡単なＦＦＴプログラムを持って、胸はずませて（？）豊中の計算センターへ行ってバッチ処理の依頼をして、期待と不安の入り混った複雑な気持（入試のあと、合格者発表の日までのような感じ）で、２、３日結果が出るのを待ったことを覚えております。出力された結果は、スペクトル分析器などで見慣れている形とは異って、凹凸が激しく、その後そのことに関して時間窓の検討を迫られることになりましたが、とにかく結果が出たことは純粋にうれしかったのです。その後、逆ＦＦＴによって周波数スペクトルが原信号に戻ることを確認していよいよケプストラム分析を開始したのであります。音声のケプストラム分析は、大別してピッチ抽出とスペクトル包絡の抽出がありますが、どちらにしてもスペクトルの調波構造と包絡情報の分離が目的であります。この方法によって周波数スペクトルの包絡線を求めるには、まず原信号をフーリエ変換し、その対数をとってさらにフーリエ変換してケプストラムを求め、ケプストラム上で包絡情報（低域に偏在する）だけを残してその他（すなわち高域の情報）を切り落してフーリエ逆変換することによって、再び周波数領域へ戻すという手順を踏むのであります。この手順中、フーリエ変換フーリエ逆変換にＦＦＴを使ったのですが、私とＦＦＴとの馴れ初めの頃の処理手順を、思い出をこめて図１に示します。



(a)　音声データのカードへの変換手順



(b)　音声のケプストラム分析

ＬＰＦ　：　低域沪波
log　：　対数
ＦＦＴ　：　高速フーリエ変換
IFFT　：　高速フーリエ逆変換

図１　音声信号のケプストラム分析の処理手順（１９６９年）

このような方法で、凹凸の激しい周波数スペクトルからその滑らかな包絡線を割合にうまくしかも簡単に求めることができたのであります。このことがきっかけになって私はＦＦＴを自分の道具として愛用するようになったのであります。

ＦＦＴ素描

ＦＦＴに関しては、わが国でも既に多数の成書で説明されており、またすぐれた解説もあるので、今さらここで私ごとき浅学非才の者が説明する筋合いのものではありませんが、小文の構成上これを抜きにすると歯抜けのような感じになるので、ごく簡単に説明させていただくことにいたします。（私、先日虫歯を一本抜かれまして、歯が一本足りないということがいかに不自然なことかが身に沁みておりますので……）なお、もしサブルーチンをご希望の方がいらっしゃいましたらご遠慮なく当方（内線３５６６）までお申し出で下さい。いつでも提供いたします。では、ＦＦＴの説明をはじめます。

まず、離散的フーリエ変換（ＤＦＴ）とは、数値例 $\{x_m\}$，$m=0,1,2,\cdots,N-1$ に対して次式で定義されるものであります。

$$X_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m W^{mk} \qquad k=0,1,2,\cdots,N-1 \tag{1}$$

ただしWは回転因子と呼ばれ次式で表わされる量であります。

$$W = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \tag{2}$$

式(1)のX_kを$k=0,1,2,\cdots,N-1$についてこの式の通りに正直に計算すると明らかにN^2回の乗算と加算を必要とするわけですが、これを$2N\log_2 N$回にまで軽減させる計算法がＦＦＴであります。以下にその基本的考え方を説明いたします。

$$N = 2^n \qquad n=1,2,3,\cdots\cdots \tag{3}$$

のとき、$\{x_m\}$を偶数番目と奇数番目に分けて

$$\begin{aligned} y_m &= x_{2m} \\ z_m &= x_{2m+1} \end{aligned} \qquad m=0,1,2,\cdots,\frac{N}{2}-1 \tag{4}$$

とすると、$\{y_m\}$，$\{z_m\}$に対応したＤＦＴは

$$\begin{aligned} Y_k &= \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} y_m W^{2mk} \\ Z_k &= \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} z_m W^{2mk} \end{aligned} \qquad k=0,1,2,\cdots,\frac{N}{2}-1 \tag{5}$$

となります。従って式(1)は次のように書けます。

$$X_k = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} y_m W^{2mk} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} z_m W^{(2m+1)k}$$

$$= Y_k + W^k Z_k \qquad k = 0, 1, 2, \cdots, \frac{N}{2}-1 \qquad (6)$$

$k = \frac{N}{2}, \frac{N}{2}+1, \cdots, N-1$ については、Wの形を考慮すると Y_k, Z_k は $k = 0, 1, \cdots$ $\frac{N}{2}-1$ のときと同じ値をとるので

$$X_{\frac{N}{2}+k} = Y_k - W^k Z_k \qquad k = 0, 1, 2, \cdots, \frac{N}{2}-1 \qquad (7)$$

となります。式(6), (7)より，N点ＤＦＴは標本値を式(4)のように分割することにより$\frac{N}{2}$点 DFT を２回行なってそれを基にして求めることができるので、この過程をn回くり返すことにより２点ＤＦＴにまで落とすことができるのであります。従って式(1)では表面的にN^2回の乗算と加算が必要であるように見えますが、式(3)が成立する場合はこれを $2N\log_2 N$ にまで軽減することができるわけであります。実際の処理手順としては、x_m の側から計算を始めるので、上述の添字の順序を入れ替えた形となりますが、基本的には上の説明で尽されております。Ｎ＝８の場合の計算手順を流れ図の形で図２に示しておきます。

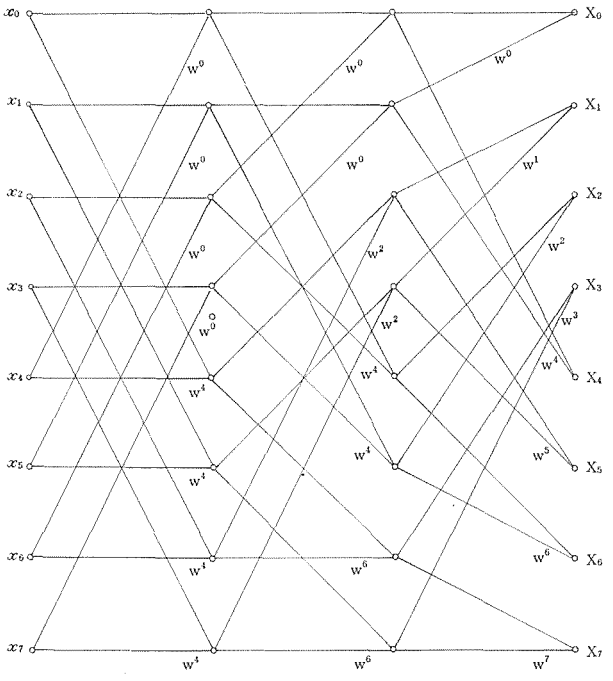


図２　８点ＦＦＴの信号流れ図

焼け木杭

私は修士課程のあとＮＨＫ（これは「日本薄謝協会」の略であると解釈する人もいるようです）に就職して、大学とは一応縁が切れた形になりＦＦＴからも離れましたが、約１年の後、またヒョンなことからＦＦＴを使うことになったのです。ＢＫ（ＪＯＢＫの略でＮＨＫの大阪局のことです）のある課長さんから「変なことが起こるのでちょっと調べてみてくれないか」と言われて、焼け木杭に火がついたのかあるいは懐かしさが手伝ったのか、その「変なこと」の調査にＦＦＴを使おうと思いついたのであります。

ちょっと前説（マエセツと読んで下さい）が長くなりますが…… ＮＨＫは当時（１９７１年）放送ネットワークのスイッチングを計算機で制御するようになって間もない頃で、そのシステムは「番組伝送システム（俗にバンデンと称す）」と呼ばれておりました。バンデンの主要な動作機能は、放送の時間表に従ったリソース（放送番組を送出する機器あるいは親局から送られて来る回線）の切り替えと、回線の接続状態の監視であります。例えば、渋谷の放送センターのＶＴＲ室の第何番目かのＶＴＲの内容を全国ネットで放送する場合、全国のＮＨＫの局（近畿では大阪の馬場町にある放送会館）のＴＶ主調整室のスイッチは東京からの回線（電々公社経由）に接続されるようになっていて、その内容を自局の放送所（大阪なら生駒山にある）へ送ってそこから自局内の放送のための電波（大阪なら２ch）を流すと共に、管轄内の孫局（近畿管内では京都、神戸、大津など）へ専用マイクロ回線で、またネットワークの下位局（東京発の番組に関しては大阪の次の局は広島）への転送のため電々公社の中継所へ送っているわけです。この状態から次の時間帯に大阪局のＶＴＲを全国ネットで放送するようにするにはネットワークに並んでいる各局のスイッチを、閉ループが起らないようにしながら順次に、しかも短時間で切り替えて行く必要があります。このような操作を予め設定したタイムスケジュールに従って自動的に行なうのがバンデンの主な機能であります。バンデンのこの他の機能としては、放送内容のモニタリングを目的とした放送系統（総合ＴＶ、教育ＴＶ、ラジオ第１、ラジオ第２、ＦＭ）の識別信号、無音区間の警告信号等のチエック機能が付加されております。バンデン信号はＴＶ画像の場合は垂直ブランキング期間に特性チエック用の信号と共に埋め込まれているので、受像機によってはＮＨＫのＴＶ放送の画面の上方に縞模様として目で直接に見ることができます。よく気をつけて観察すると番組の切替えの直前にこの縞模様が変化するのが見えるはずです。音声放送のバンデン信号は、１０KHz付近の帯域に１００Hz（この値はうろ覚えです）間隔で並んだ５本（この数もうろ覚え）の正弦波の組合せによって構成されております。（従ってこの帯域は実際の放送段階ではカットされており、放送される音はこの帯域の音が抜けております。）さて、私が調査しろと命じられたのは、ＴＶ音声の局内番伝スイッチが番組中の衝撃音によってヤタラメッタラバタつくという異常現象の原因究明でした。そこで私は音声信号に衝撃音が入った瞬間における音声の番伝信号がどうなっているかを調べようとした訳であります。調査の依頼を受けた段階で、私の頭の中には、衝撃音がピーククリッパでクリップされ、その高調波歪が番伝信号に悪影響を与えているのだろうという予測があったので、まず番組衝撃音と番伝信号の

複合信号を周波数分析しようと考えました。現象が瞬間的なのでアナログの周波数分析器を使うことはできないので少々困りましたが、“昔とったキネヅカ”のＦＦＴを使ってやろうと企んだのであります。“焼け木杭に火が付いた”とはこのことで、私はこの異常現象の原因究明に異常に凝りだしたのであります。１０KHz近辺の精密な周波数分析を狙っていたので、試料の番組衝撃音と番伝信号の複合信号を１２ビット４０Ｋサンプリングして「ここぞ」と思しき箇所を抜き出して2048点ＦＦＴをしたのであります。結果のスペクトル標本値は約２０Hz毎に計算されるので、分析精度は十分にとれたのですが、問題の１０KHz近辺の番伝信号を見た限りではわずかにレベルが正規の値から数dB変動している程度で特に異常は認められず、まして番組中の衝撃音と番伝信号のレベル変動との関連は不明でした。仕方がないので調査報告は「番伝信号の検出器のレベル設定に問題がある」という結論にして逃げてしまいました。課長の期待に応えるような報告書ではなかったので課長はガッカリしたことと思います。しかしこの計算のために私は古巣の加藤研へ頻繁に出入りするようになり、修士時代の指導教官であった加藤名誉教授の退官記念事業を部外者の身でありながらお手伝いすることもでき、今になって思えばこのことがキッカケになって日本薄謝協会をやめて学校へ帰ろうという気になったのだろうと考えられるのであります。

オ ア ソ ビ

ＮＨＫを辞職して、大学へ戻って約１年間修士時代の残務整理(？)としての音声分析とか、ちょっと毛色の変った分野へも首をつっ込んでやろうといった感じで始めたネットワーク理論関係の研究などをやりながら、道楽の虫に誘われてかなり趣味的要素を含んだ「ろう管蓄音機の音響特性」の研究(？)を始めました。ここでマタマタ登場するのがＦＦＴであります。ご存知の方もあろうと思いますが、戦後生れの方(私も含まれますが)はほとんどご覧になったことがないだろうと思われますので、ごく簡単にろう管蓄音機の説明をしておきます。

ろう管蓄音機というのは、１８７７年にThomas Edisonが発明した錫箔蓄音機の直系の子孫で、１８９８年頃から１９１５年頃までが全盛期でその後円盤型のレコードの登場によって一時共存時代を経て次第に捨たれて行ったものです。衰退の原因は主として円筒レコードの大量生産の困難さと占有体積の大きさであったと言われております。図３はその一例(Edison Standard Phonograph １８９７年)[9]ですが、ろう管(ろう製の円筒)レコードをシリンダにハメてゼンマイの力によって回転させ、その上に刻まれたミゾの凹凸を針(サファイア製)で拾い、ダイアフラムを振動させ、それを空胴の空気振動に変換(針からここまでの部分をリプロデューサと呼びます)してラッパから放射するものであります。ろう管蓄音機は再生だけでなく、リプロデューサの替りにカッタをとり付けることによって録音も可能です。従ってこれは現在のテープレコーダに相当するものであります。

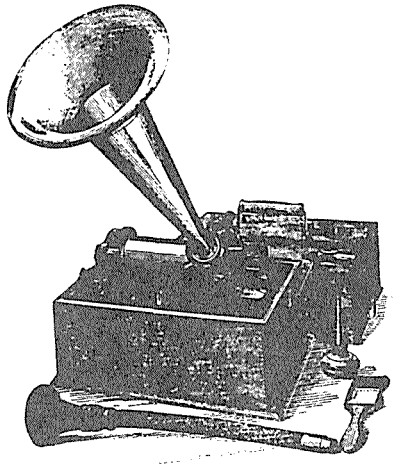


図3　The Edison Standard Phonograph.

守口市の舟橋さんという方（ヒョンなことで知り合いになった友人で、阪大の先輩でありますが、かなりお年をお召しになっているので「…さんという方」としておきます）が、私設の蓄音機博物館に多数の初期蓄音機を動態保存（コレ大変手間のかかることですヨ）しておられて、それの一部（移動可能なもの）を産研の無響室に持ち込んで周波数特性を測定してみようという話がもち上ったのであります。録音再生のオーバーオール周波数特性はアナログ的手法で測定できましたが、再生周波数特性の測定には東北大通研の城戸教授が示された方法[10]をそのまま借用しました。つまり図4のようにろう管に段落を作ってそれを再生系へのインパルス入力と見なしその再生音をフーリエ変換しようという訳であります。再生周波数特性の一例を図5に挙げておきます。詳しくは文献[11][12]をご覧下さい。

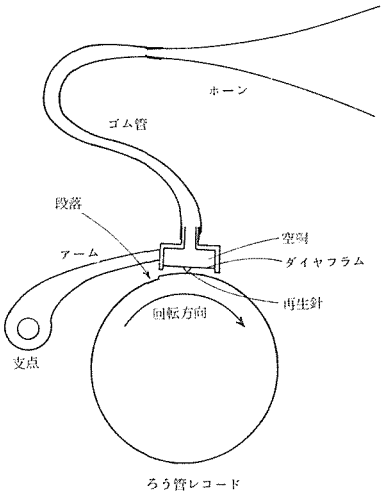


図4　ろう管蓄音機のインパルス応答の発生法

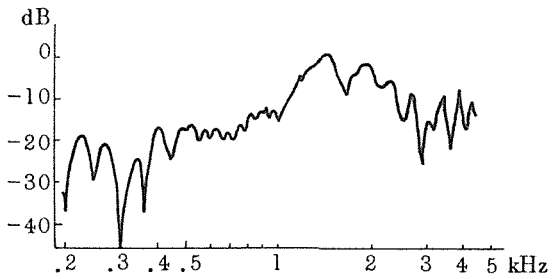


図5　周波数特性計算の例（資料：Edison Standard Phonograph）

ＦＦＴ裏街道

今まで書いて来たＦＦＴの使い方はすべて周波数分析と直接に関係のあるものばかりでしたが、ＦＦＴは周波数分析以外にもおもしろい使い方ができるので、その例を２、３紹介しておきます。ここでは項目を列挙するだけに留めておきますので、興味のある方は文献を参照して下さい。使い方としてはおもしろいけれどもあまり実際的でないという感じのするものもありますが……

（ｉ）　悪条件行列の改善法、連立一次方程式の解法[13]

（ii）　高次代数方程式の近似解法[14]

（iii）　行列の固有方程式の係数の求め方[15]

（iV）　有理関数行列の逆行列の求め方[16]

ＦＦＴ酷使法

音響関係の信号処理にＦＦＴを利用する場合は、対象が一次元信号ですので、いくら長時間のデータを扱う場合でもＦＦＴの使用回数はそんなにベラボウに多くなることはありません。例えば、音源波形の分離法として私が提案した方法[17][18]ではかなりＦＦＴを多用するのですが、それでも１ステップ分のＦＦＴ使用回数は、マイクロホンの個数＋音源の個数にしかなりません。ところが画像とか立体像をフーリエ変換しようと思うとＦＦＴの使用回数は一挙に増大します。例えば、画素数がＭ×Ｎの画像の２次元ＤＦＴにはＭ×（Ｎ点ＦＦＴ）＋Ｎ×（Ｍ点ＦＦＴ）つまりＮ点ＦＦＴをＭ回とＭ点ＦＦＴをＮ回する必要があります。２つのＤＦＴを１回のＦＦＴで並行に計算するとしてもその回数は半分に減少するに留まります。さらに、Ｌ×Ｍ×Ｎの立体像の３次元ＦＦＴにはＬ×Ｍ×（Ｎ点ＦＦＴ）＋Ｍ×Ｎ×（Ｌ点ＦＦＴ）＋Ｎ×Ｌ×（Ｍ点ＦＦＴ）の処理が必要になってまいります。ちょっとだけＦＦＴを使ってやろうとお考えの方には一次元信号のフーリエ変換を、またＦＦＴをコン限り使い倒してやろうとお考えの方には３次元立体像のフーリエ変換をお勧めいたします。なお、連続信号の中からその一部を切り出してデータとして取り扱う際には窓関数の選択が重要な意味を持ちますが、それに関しては最近詳細な研究が発表されておりますので[19]参照されるとよいと思います。

ＦＦＴの現状

１９６５年にそのアルゴリズムが発表されて以来、ＦＦＴは情報処理産業の発達と歩みを共にして来たと言えるわけですが、現在ＦＦＴが実用的工業技術としておよび研究対象としてどのような状況にあるのかをここでざっとお話しさせていただきます。

まず実用的工業技術としてのＦＦＴは、ＦＦＴ専用のハードウェアに最も顕著に現われているのですが、数年前に日本でも製品化が完了し、計算機に基板（２００～３００万円）をはめ込むだけで５１２点あるいは１０２４点ＦＦＴが１００mｓｅｃ程度で計算できるようになっております。またパイプライン方式という名で呼ばれている並列処理を行なうプロセッサによると同程度の計算が数m

secでできますが少々カネがかかるようであります。いずれにしても現在市販されているＦＦＴハードウェアは標本点数が２の巾乗のものに限られているようです。また、通常取り扱うデータは実数である場合が多いのですが、実数直列のＦＦＴはちょっとした工夫によって通常のＦＦＴの半分の計算量で済ませることができるので、市販されているＦＦＴハードウェアにもこの工夫が組み入れられているものが多いようです。ＦＦＴは信号処理用の単なる汎用ソフトウェアとして計算機システムに組み込まれているだけではなく、最近ではＮＭＲ（核磁気共鳴）分析装置などにも専用ハードウェアとして組み込まれるようになりました。

次に研究対象としてのＦＦＴですが、CooleyとTukeyの最初の論文以後、まず２以外の素数をも因子として含む場合のアルゴリズムが示され[4]、さらにＤＦＴを巡回畳み込みに変換して演算数を最小にするアルゴリズムが提案されました。[5] このアルゴリズムに関して最近２つの方法（Winograd Fourier Transform Algorithm[20] とPrime Factor Fourier Transform[21]）が示され、さらにこれらと従来のＦＦＴとの比較検討も報告されております。[6] ただしこれらのアルゴリズムはかなり複雑でプログラムが長くなる割には従来のＦＦＴと比較してあまり演算回数が減少しないので、ハードウェアで構成するのは今の時点では需要／生産コスト比が悪く、メーカーとしては採算がとれないので、もっと画期的なアイデアが出ない限り現在の２をベーストしたＦＦＴハードウェアの生産が続くだろうと予想されます。

センターにベンチャラ

今年５月から当計算センターでも磁気テープジョブを扱ってくれるようになりました。これまで我々の研究室の磁気テープジョブはすべて京大まで持って行っておりましたが、阪大のセンターで処理できるようになって非常に便利になりました。（というよりも、ＭＴジョブが受け付けられなかったというこれまでの状態が計算センターとして異常だったのですがネ……） また、ＭＴのコード変換に際してはセンター業務掛の藤井さんの全面的なご援助をいただき、ユーザーとしてこれほど有難く思ったことはありません。これからは他大学の計算センターに浮気をしに行かなくて済むようになったので本当に感謝しております。

ガンバルゾ――

前にも書きましたように、私はバイオリンの音が好きで、StradivariとGuarneriの音を聴き分けたいという執念のようなものを持っておりまして、今年は関西大学工学部の電気音響研究室４年生の西田君に手伝ってもらって、StradivariとGuarneriの音の物理的相違を見出してやろうという無謀な妄想を実現する努力をしております。[22] そのためには、我が愛用のＦＦＴと共に、ＭＴジョブができるということが必要条件でありまして、その条件が整った現在、妄想の実現する日を夢に見て連日ディスプレイの前に座ってガンバッテおります。同好の士にご意見、ご援助をお願いいたします。

御むすび

ナンダ・カンダと書き連ねてまいりましたが、鉛筆も短かくなって来ましたのでこの辺で拙文を閉じたいと思います。最後に、駄文・俗文・悪文・偏文・拙文にもかかわらずここまで読み終えて下さった読者諸先生、諸兄にお礼申し上げます。

参考文献

(1) J. W. Cooley and J. W. Tukey; "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", Mathematics of Computation, Vol. 19, pp. 297-301 (1965).

(2) R. R. Green: "A serial orthogonal decoder", Space programs snmmary, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., No. 37—39, Vol. 4, pp. 247-251 (1966).

(3) W. K. Pratt, J. Kane and H. C. Andrews: "Hadamard transform image coding", Proc. IEEE, Vol. 57, pp. 58—68 (1969).

(4) R. C. Singleton: "An algorithm for computing the mixed radix fast Fourier transform", IEEE Trans., Vol. AU—17, pp. 93—103 (1969)

(5) S. Winograd: "On computing the discrete Fourier transform", Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 73, No. 4, pp. 1005—1006 (1976).

(6) 牧野他：" 新しいＤＤＴのアルゴリズムの比較検討 "，日本音響学会講演論文集，3—5—8（昭53—5）

(7) A. M. Noll: "Short-time spectrum and 'cepstrum' techniques for vocal-pitch detection", Jour. Acoust. Soc. Am., Vol. 36, No. 2, pp. 296—302 (1964).

(8) A. V. Oppenheim and R. W. Schafer: "Homomorphic analysys of speech", IEEE Trans. Vol. AU—16, No. 2, pp. 221—226 (1968)

(9) National Phonograph Company: "The phonograph and how to use it", Allen Koenigsberg, New York, Facsimile Edition, p. 81 (1971).

(10) 城戸健一：" Edison Standard Phonograph の周波数特性 "，電子通信学会技術報告 EA73—26（1973—09）.

(11) 柳田，竹内，舟橋：" 初期蓄音機の音響特性の比較 "，電子通信学会技術報告 EA73—52（1974—01）

(12) 柳田，奥田，竹内，舟橋：" 初期蓄音機の音響特性の系統的調査 "，日本音響学会講演論文集 2—3—6（昭49—6）

(13) 小林，山口：" 悪条件行列のＤＦＴによる改善法 "，電子通信学会論文誌，Vol. J60—D,

No.9, pp.687−693(1977)

(14) 柳田，角所：“高次代数方程式のＦＦＴによる解法の可能性”，電子通信学会論文誌，Vol.J59−A, No.10, pp.880−882(1976).

(15) T.Lee:"A simple method to determine the characteristic function $f(\lambda)=|\lambda I-A|$ by discrete Fourier series and fast Fourier transform", IEEE Trans. CAS−23, No.4 p.242(1976).

(16) O.T.Nam, 太田，松本：“高速フーリエ変換アルゴリズムによる有理関数行列の逆行列の計算法”，電子通信学会技術報告 CST77−53(1977).

(17) 柳田，角所，久下：“多点受音による話者分離”，電子通信学会技術報告 EA77−52(1978−01)

(18) 柳田，角所：“一般逆行列の信号処理への応用”，電子通信学会技術報告 EA78−8(1978−05)

(19) F.J.Harris:"On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform", Proc. IEEE, Vol.66, No.1, pp.51−83(1978).

(20) H.S.Silverman:"An introduction to programming the Winograd Fourier transform algorithm", IEEE Trans. Vol. ASSP−25, No.2, pp.152−165(1977).

(21) D.P.Kolba and T.W.Parks:"A prime factor FFT algorithm using high-speed convolution", IEEE Trans., Vol.ASSP−25, No.4, pp.281−pp.281−294(1977)

(22) 西田，西山，柳田，溝口，角所：“スペクトル上の距離に基づいたバイオリン音のクラスタリング”，電気関係学会関西支部連合大会，Ｇ15−18（1978）。

（Ｓ53. 7. 28受理）