

微分解析機再生プロジェクト

和田 英一

(株) IJ イノベーションインスティテュート

微分解析機の再生プロジェクト

近年、欧米においてかつて活躍した微分解析機を再生したというニュースが届くようになったので¹⁾、私は東京理科大学の微分解析機²⁾も再稼働させられないかと思い始めた。理科大近代科学資料館の科学コミュニケータの大石和江さんに再生計画を提案したのは2011年の秋の頃であったが、そのときはしばらく検討したいという返事であった。

2013年3月6日から8日、東北大学川内キャンパスで情報処理学会第75回全国大会が開催され、大会中に2012年度の情報処理技術遺産の認定式も行われた。認定された遺産に、理科大近代科学資料館が保管するパラメロン計算機FACOM 201があったので、大石さんも仙台に来ていた。

私は大石さんに会い、以前も提案した微分解析機を再稼働させるプロジェクトをそろそろ始めるのはどうかと尋ねたところ、今回はやりましょうかという返事を得た。

ところで私ひとりでは無理なので、こういうことに興味を持って実働してくれるのではないかとひそかに考えていた、国立情報学研究所(NII)教授の橋爪宏達君にメールしたところ、さっそく、ぜひプロジェクトに参加させてほしいと言ってきた。

3月27日、近代科学資料館で、竹内伸館長、大石さん、橋爪君、私で最初の会合をもった。そしてとりあえず微分解析機の状態を詳しく調べることになった。

橋爪君は、微分解析機を改修するには、部品の修理や欠損品の補充に、情報通信研究機構(NICT)の社会還元促進部門の協力が絶対に必要と考え、研

究開発支援室の小室純一主幹に打診したところ、その賛同が得られた。

4月4日午後、小室さんとNICT研究開発支援室囑託の梅津純さんが近代科学資料館に来られ、橋爪君と私も一緒になって微分解析機の現状を調査した。

この機械は、かつて阪大の清水辰次郎先生の周りで使われていたものが、分解されて理科大の資料館に届けられ、展示を目的として再組み立てされたものである。そういう経緯なので、ざっと見るともっともらしく見えるが、よく眺めると間違えだらけの構成になっているのが分かった。

積分機の円盤には傷があり、トルク増幅器のベルトは切れ、バスシャフト、クロスシャフト、歯車、加算器なども錆防止のラッカーが塗られて動かない状態であった。ラッカー剥がしがまずは前途に立ちはだかった。

調査の結果、積分機、トルク増幅器、出力卓などはNICTへ移送してそこで修復せざるを得ないということになった。それと同時に、東京理科大学に微分解析機の再生プロジェクトを申請し、また東京理科大学、NII、NICTによる共同研究契約を始めることになった。私は首謀者であったはずだが、IJが共同研究の機関に入らなかったため、理科大の協力員という立場で小さくなってプロジェクトに加わることになった。

微分解析機に対して作業を開始する前に、現状の図面を作っておくことになり、機械工学科教授の吉本成香さんとその学生諸君に計測をってもらうことになった。6月15日に計測作業が行われた。その後積分機2台を取り外し、NICTへ移送した。

我々は微分解析機については、実際に使った経験

はないので、東大の航空研究所で使われたり、生産技術研究所で高性能の微分解析機を開発されたりした渡辺勝先生に昔の話を伺う機会を持つことにした。

渡辺先生はご高齢なので、先生のお宅の近くで7月3日に会合を持った。参加者は渡辺先生のほか、竹内、橋爪、大石、和田である。また再生作業中の微分解析機の各部分の写真も先生にお目にかけて。

トルク増幅器の1段目のベルトは琴糸だったという貴重な情報をいただいた。

再生への道のり

8月12日から16日にかけて、移送してあった0号機の積分機とトルク増幅器の解体と清掃をNICTで実施した。

9月5日、NICTで2台目(1号機)の分解があり、竹内、大石、橋爪、和田も参加した。

9月20日、学生諸君を動員し、理科大でベイからシャフト、歯車類を取り外しシンナーに浸ける。外してあったシャフトの洗浄は9月27、28日に行い、10月1日にベイに組み戻す。

11月11日ころからNICTでトルク増幅器の復元作業が始まった。トルク増幅器駆動用モーターやベルト類を用意した。

12月13日、NICTでトルク増幅器と積分機を接続した。見かけは快調。無負荷ではトルク増幅器が静かに動作していることを確認した。

図-1の写真をクリスマスカードに同封して何人かに送ったところ、早速MITの元同僚の2人から微分解析機を動かそうとしているのかというメールが届いた。

年が明けて2014年1月30日トルク増幅器の増幅度を計測すると、数倍～十数倍しか出ていないことが判明。それを解決すべくいろいろな案を出す。

2月は毎回トルク増幅器の調整。1次側は琴糸、2次側はケブラー糸で行けそうになってきた。トル

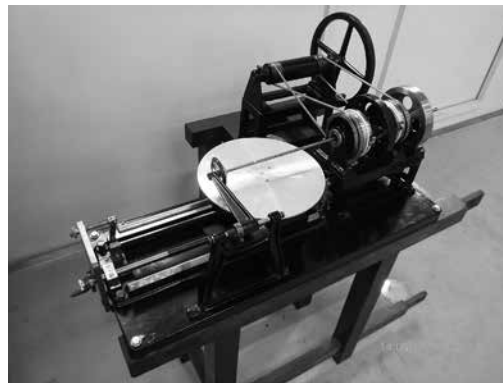


図-1 組み立て完了の積分機とトルク増幅器

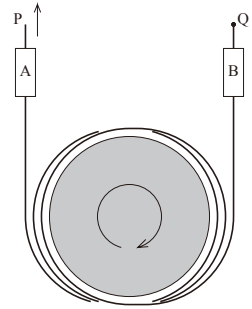


図-2 トルク増幅器計測のモデル

ク増幅器の腕でばね秤を引かせてトルクを計測したがなかなか難しかった。

3月20日、独立変数軸用モーター試運転。

あるときは、旋盤の軸にトルク増幅器のドラムを取り付け、旋盤をゆっくり回転しながら、ドラムに巻き付けた糸の両端にばね秤をつけ、増幅度を計測した。図-2でP点を引き上げ、A、Bのばね秤の読みを比べる方法だ。

4月3日は午前から1号機の積分機とトルク増幅器の組み立てを行った。積分機の円盤やトルク増幅器のドラムの研磨は済んでいたため、トルク増幅器の糸の取り付け金具を工作する他はほぼ順調に作業できた。0、1号機とも円盤の初期位置設定用のハンドルつまみを作り直した。

試運転の日々

4月9日午前NICTで積分機とトルク増幅器2組を車に積み、理科大へ移送。午後理科大で本体への接続作業を開始した。簡単なテストのために、独立変数軸モーターの近くの0号機のベイに、 e^x を計算する軸接続を設定した。手でバスシャフト、クロスシャフトを回すがはずば歯車を固定するビスの頭が長く、それが当たってしまう。短いビスに変えたり、クロスシャフトを調整したりして、軸同士は噛み合うようになった。

次は積分機側の入出力3軸とクロスシャフトの接続だが、どう見ても積分機側が低いようなので、当座の対策として、木製の台枠との間に木切れを挟んで調整した。これで手で回すと積分機とクロスシャ

フトはギア比 1:1 で接続できたようであった。

そこで、積分機の円盤の初期値を適当なところに設定し、トルク増幅器のモーターの電源を入れ、次に独立変数軸モーターの電源を入れ、回転子を円盤の上に静かに置くと、円盤の回転につれて回転子も回り、トルクアンプも順調に作動して、1 台だけの微分解析機が無事に動き出した。

次に初期位置を前とは中心の反対側に置いて試運転したが、これも順調に動くので、トルク増幅器はいずれの方向にも調整できていることが判明した。この日の運転の軸連結を図-3 に示す。

上端に $32x$ と注記した縦のバスシャフトが独立変数軸である。モーターを回すと軸は矢印 A の方向に回転する。この回転ははすば歯車 B でクロスシャフト C に伝えられ、クロスシャフトは C 軸上の矢印方向に回転する。それに従い円盤は D の方向に回転する。回転子は円盤の中心より左にあるから、その軸は E の方向に回転し、この回転はトルク増幅器を経てはすば歯車 F に伝わり、 $40y$ と注記したバスシャフトを回す。これがすなわち被積分関数 $40dy/dx$ となり、H のはすば歯車によりクロスシャフト I を矢印方向に回す。この回転は円盤の支持架台を矢印 J の方向に送るので、積分値はさらに大きくなり e^x が計算できるのである。

2 台目の積分機 (1 号機) を動かすためには、もう 1 個のトルク増幅器用モーターの設置用台座を用意する必要がある。この日のテストはここまでとした。

4 月 16 日、1 号機用の積分機のトルク増幅器モーターが到着。1 号機も動くことを確認した。

微分解析機の載っている木製の架台が水平でないらしいので、計測したりシムの購入準備をした。

4 月 23 日、ギアの噛み合わせの調整をしながら、サークルテスト $y'' = -y$ 用の軸連結 (図-4) を行う。

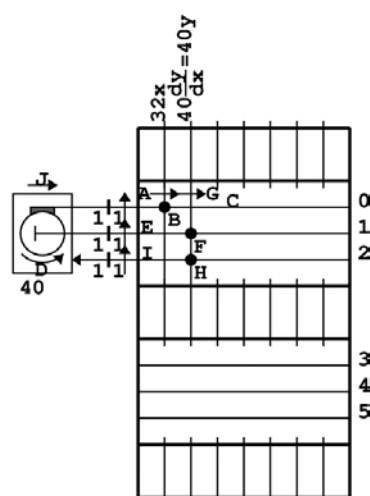


図-3 最初に試運転した e^x の軸連結

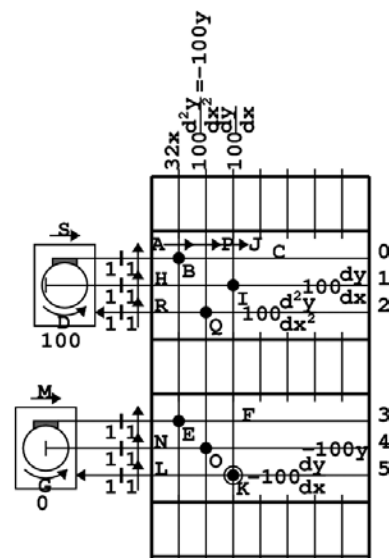


図-4 サークルテスト用の軸連結

一応サークルテストらしく動くようになったが、出力卓もまだないし、出力卓をシミュレートするためのデータを採取するロータリーエンコーダも接続に手間取っている。サークルテストはトルク増幅器の動作から想像するだけであった。動画も撮影した。

画像から時間的な評価をすると、独立変数軸の回転速度は 2 秒/回転。独立変数軸の係数は $32x$ なので、 x が 2π になるには $200 \times 2 \times \pi = 201.0619$ 回転。その時間は約 400 秒 (6 分 40 秒) である。

画像で見ると d^2y/dx^2 の積分機の出力が停止するまでの時間が 1 分 40 秒程度であったから、サークルを一周する時間は 6 分 40 秒でちょうど同じであった。

4 月 30 日、両方の積分機で回転子が円盤の中心に来たときの目盛りを読んだ。2 本の被積分関数軸を 2 本分独立変数軸の方へ移動し、バスシャフトを出力卓の方まで接続し、出力卓のクロスシャフトのはすば歯車も設置した。この最大負荷をトルク増幅器が回せるかをテストする。

独立変数用のモーターの回転数をこれまでの約 2 倍に上げ、0 号機の初期位置を 100 にしてサークルテストを実施した。接続したすべてのシャフトは無事に回転した。1 象限のサークルテストに約 50 秒かかった。

今日の作業の最後として出力卓のクロスシャフト

にロータリーエンコーダを取り付けたが、取り付け方に修正の必要ことが判明。作業は翌週に持ち越した。

5月になってからも、毎週水曜の午後には微分解析機の調整が続いた。なんといってもトルク増幅器のところが最も微妙で、トルク増幅器の方から回転子に力がかかり、円盤に追従した回転をしなくなったりする。ベルトの固定部分も改良した。徐々に運転に信頼性が出てきて、この分ならどうにか公開できるであろうというところまで来た。

6月4日、東京理科大学で開催された情報処理学会2014年度定時総会で公開運転した(図-5)。

出力卓と入力卓

情報処理学会総会での公開後、出力卓と入力卓の整備にとりかかった。7月にNICTに運ばれた出力卓はラッカーや錆を落とし、わずかに曲がっていたドライブシャフトを修正し、ペンホルダー(2個)を新しく作った。出力卓は9月5日に微分解析機に接続された。

出力卓は3本のクロスシャフトで、1本は x 方向にブリッジを駆動し、あとの2本はブリッジ上を y 方向に動くペンホルダーを駆動する。だから時間にそって変化する2本の関数を描くことができる。

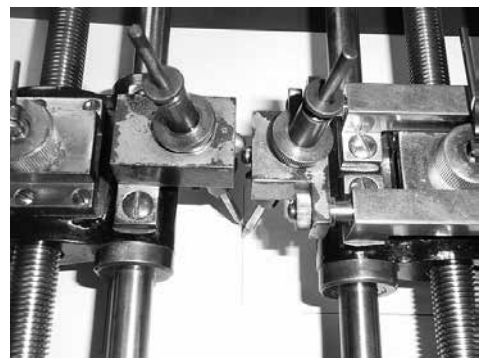
2本のペン(今回はボールペンを使う)は同一 y 軸上で交差することがあるが、その仕掛けが前から疑問であった。

図-6の写真はNICTの梅津さんが撮ったものだが、右のペンホルダーがバネで押し出されているのが見える。ペンホルダーの先端にはそれぞれ半球状のものがあり、左右のペンが交差するときはこの半球が押し合い、右のペンホルダーが押し込まれるのであった。

ペンホルダーのペンは上に引き上げて右に捻ると浮いたままになる。ペンホルダーはギアに従って駆動されるが、ここにハーフナットという仕掛けがあり、上のつまみを90度回転すると、ナットはギアから外れて自由に滑る。これは x 軸の方もそうになっている。



図-5 情報処理学会総会で公開運転



©梅津純

図-6 ペンホルダーの交差の様子

ペンの y 方向の移動距離は、円板上の回転子の移動距離と同じである。

出力卓は見学者のいる位置から離れているので、その真上にテレビカメラを設置して、出力の様子がディスプレイで見られるようにした。

修復を終えた入力卓が理科大に戻ったのは11月25日である。入力卓はペンホルダーが1個の出力卓である。ただ y 軸を駆動するシャフトの先端にハンドルがついていて、それを回転してペンホルダーの先についているスタイラスで卓上の関数曲線をたどると刻々の関数値が入力できる。やってみるとなかなか難しい。

今回は入力卓のペンホルダーに、ボールペンもつくようにNICTにお願いした。つまりサークルテストのデモのとき、出力卓はサインとコサインの曲線を描き、入力卓は円を描くのに使える。

フロントラッシュと加算器

私はこのプロジェクトが始まる前から、佐々木達

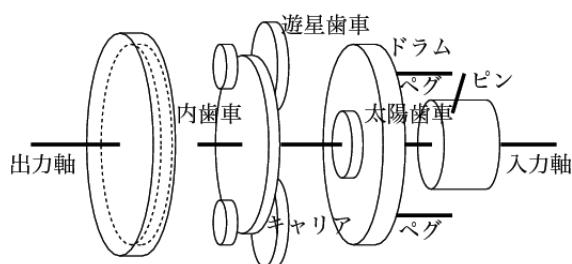


図-7 フロントラッシュの機構

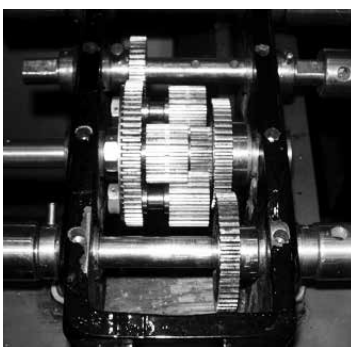


図-8 加算器

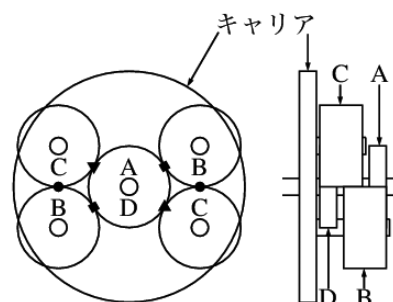


図-9 加算器の構造

治郎「計算機械」の「常微分方程式」³⁾の章をよく読んでいたが、分からなかったのががた補正装置(がた追ひ)と加算器であった。加算器は遊星歯車のはずであるが、ほかで見た図とは違うのだ。実際に再生プロジェクトでこれらの装置を観察し、すっかり理解できた。

がた補正装置はCrankの本⁴⁾ではフロントラッシュという。軸の回転方向が変わったときに追従が少し遅れるのをバックラッシュというが、遅れるのではなく加速して進めるのでしゃれてフロントラッシュらしい。

フロントラッシュの構造を図-7に示す。右からの入力軸はピンの立っている車を回転する。次にドラムがあり、ピンの側に2本のペグが差してある。ドラムは普段はいずれかのペグがピンに押されていずれかの方向に回転している。

ドラムのペグと反対側には太陽歯車が固定されている。太陽歯車はその次の入力軸に固定されているキャリアに載る遊星歯車と噛み合っている。反対側の遊星歯車は左端の内歯車と噛み合っていて、内歯車と出力軸は固定されている。

定常状態ではこれらは一体となって同一角速度で回転する。問題は入力軸が逆転するときである。ピンはいままで押していたペグから離れ、もう1つのペグへ向かう。そのわずかな間、ドラムはフェルトのついたバンドで押さえられて停止している。

太陽歯車が止まり、入力軸に固定されて回転しているキャリアの入力側の遊星は、太陽歯車で自転させられながら、公転する。入力側の遊星歯車の自転はそのまま出力側の遊星歯車の自転になっている。

出力側の遊星歯車の公転と自転により、内歯車が回転し、出力軸も回転する仕掛けである。太陽歯車半径 r_0 、入力側遊星歯車半径 r_1 、出力側遊星歯車半径 r_2 、内歯車半径 r_3 とする。入力軸が θ_0 回転したとき、遊星歯車の回転角 θ_1 は $\theta_0 r_0 / r_1$ である。内歯車はキャリアに従って回転するほか、出力側遊星歯車の回転でさらに θ_2 だけ回転する。その角 θ_2 は $\theta_1 r_2 / r_3$ になる。したがって内歯車=出力軸は、キャリア=入力軸が θ_0 回転するのに対して $\theta_0 + \theta_2$ 回転する。 θ_2 が θ_0 の10%なら、Crank本の通りだ。理科大の微分解析機の歯数は太陽歯車22、入力側遊星歯車28、出力側遊星歯車12、内歯車62。したがって $\theta_2 = \theta_0 r_0 r_2 / r_1 r_3 \approx 0.15 \theta_0$ 。15%であった。ドラムには円周上に多くの穴があり、ペグの間隔は調整できる。フロントラッシュを水泳選手がターンの時壁を蹴って加速するようなものだというのはおかしいかしら。

図-8が加算器の写真である。車の差動装置のような傘型歯車は見えない。これは平歯車差動装置という仕掛けである。

図-9に加算器の構造を示す。左側が軸方向(写真の右)から見た図。同径、同歯数の歯車6枚があり、Bの2枚とCの2枚は遊星キャリアに載っている。

中央にあるAとDは、キャリアと同じ軸に載っているが、Aとキャリアは軸には固定されていない。歯車による束縛条件はあるが、その下で自由に回転できる。

この図を左方から見たのが右の図で、遊星歯車のBとCは見ての通り、深さ方向にずれて配置されている。つまりAはBと左図の黒四角で接し、B



と C は黒丸で接し、C は D と黒三角で接している。回転角を記述するのに、反時計回りを正として、歯車 A の回転角を ϕ 、D のを ψ 、キャリアのを θ と表すことにする。

まずキャリアを固定し、A を反時計方向に回転する。すると B は時計方向に、C は反時計方向に回転する。ゆえに D は時計方向に回転するわけだ。歯車の歯数が同じだから、回転の角度も同じである。

隣同士の歯車は逆に回る。中間歯車が 1 個なら同じ方向に回るが、A と D は間に歯車が 2 個あるから、逆に回るわけだ。そこでこれを $\theta_0=0$ のとき $\phi=-\psi$ と書いておく。キャリアが A と一緒に回転すると、この図がこのまま回転するから、D も A と同様に回転する。これを $\phi=\theta=\alpha$ のとき $\psi=\alpha$ と書いておく。つまり、この遊星歯車では $\phi+\psi=2\theta$ となっている。

もう一度写真 (図-8) を見てほしい。ベイとベイを繋ぐバスボックス内にある 3 本 (手前から X, Y, Z とする) のスタブシャフトに設置してある。中央の Y に載っているのが、上述の遊星歯車である。手前の X の歯車と噛んでいる平歯車と一緒にいる真鍮のが A である。その左、A と噛んでいる手前と向こうのが B、A からは離れているが、B と半分の幅で噛んでいるのが C、C の奥に D があるのだが、それは見えていない。D は Y 軸に固定されている。

歯車の歯数は A, B, C, D が 24、X 軸と A に固定の平歯車がどちらも 52、キャリアが 68 でそれと噛み合う Z 軸のが 34 である。したがって真鍮の歯車群の左にあるキャリアと Z 軸は 2:1 で噛んでいる。 $\phi+\psi=2\theta$ だったので、 2θ にして $x+y=z$ にしている。ただし x, z は y に対して逆向きである。

あと書きと謝辞

出力卓と入力卓が揃ったので 12 月 1 日に完成報告会を開催した。2015 年 1 月からは来館者向けに週に 2 回の公開運転を実施している。1 月半ばに修理の終わったフロントラッシュが装着された。その実力の検証はこれからである。なおネットワークを

「東京理科大微分解析機」で検索すると、本機運転の動画が見つかる。

微分解析機については、城先生の本⁵⁾を始め、たくさん読んでいたし、理科大の展示も見ていたので、分かっているつもりであったが、分解、組み立て、運転をしてみて大いに理解を深めることができた。機械部品が回転するので、もっと騒々しいものと思っていたが、静かなのに驚いた。精度を保持するための工夫が随所であって、それらが Bush の 1930 年代には実用されていたことに感銘を受けた。貴重な経験を積めたと思っている。

この記事の前半部分の要約を IEEE Annals of the History of Computing に寄稿した⁶⁾。それを讀んだ、マンチェスター大学で再生プロジェクトを主導した Lindsey 君から「おめでとう」のメールが来た。

今回の再生プロジェクトが完成までいけたのは、実に NICT の社会還元促進部門研究開発支援室の協力のお陰であった。小室さんと梅津さんには献身的に多くの作業をしていただいた。白状すればこんなに順調に進むとは予想していなかった。感謝感激である。

また東京理科大学はプロジェクトを承認し、経済的な支援がいただけた。マンチェスター大学の再生プロジェクトに比べて、我々は非常に恵まれていたと言わざるを得ない。最後になったが心からお礼を言いたい。

参考文献

- 1) Lindsey, C. : The Hartree Differential Analyzer, <http://www.cs.man.ac.uk/CCS/res/res54.htm#a>.
- 2) 和田英一: 情報処理技術遺産「微分解析機」, 情報処理, Vol.52, No.3, pp.368-373 (Mar. 2011).
- 3) 佐々木達治郎, 志賀 亮: 計算機械, 応用数学第 10 巻, 河出書房 (1947).
- 4) Crank, J. : The Differential Analyser, Longmans, Green & Co. (1947).
- 5) 城 憲三, 牧之内三郎: 計算機械, 共立全書 57 (1953).
- 6) Wada, E. : Restoration of the Differential Analyzer at the Tokyo University of Science, IEEE Annals of the History of Computing, 36, 4, pp.92-93 (Oct.-Dec. 2014).

(2015 年 1 月 23 日受付)

和田英一 (名誉会員) eiiti.wada@nifty.com

1955 年東京大学理学部物理学科卒業。東京大学工学部、富士通研究所を経て IJ インノベーションインスティテュート技術研究所研究顧問。Happy Hacking Keyboard、和田研フォントの開発に関与。WIDE プロジェクトメンバ。