

Phenakistoscope とそのテクノロジー

PHENAKISTOSCOPE AND ITS TECHNOLOGY

橋本 英治 芸術工学部まんが表現学科 教授

Eiji HASHIMOTO Department of Manga Media, School of Arts and Design, Professor

要旨

Phenakistoscope は 1832 年に発明された映像遊具である。これは映画の原型とみなされ、映画史の教科書の中でオープニングを飾る発見として華々しく登場する。今日でも映画の原理を理解するための教育遊具として広く使用されている。その構造は簡単で誰にでも作ることができる。

しかし、この遊具を通してアニメーションの動きを感じることは意外に難しい。Phenakistoscope を扱うためにはそれなりの技術やコツが必要なのである。その難しさは、三つの要素が絡み合うからだと想定される。

1. ディスクの回転速度 2. スリット 3. スリットの向こう側の図像

この奇妙な遊具は、Cinématographe（映画）や Tachistoscope といった大掛かりな装置に利用されている。本論文の目的は、そのテクノロジーの歴史をたどりながら、21 世紀の最先端の技術によって、より簡単にアニメーションを表現できる技術的集合体としての Phenakistoscope を、芸術作品を事例に技術変遷の中で具体的に跡付けることである。

Summary

Phenakistoscope is the well-known visual toy invented in 1832. This is regarded as a prototype of a Cinématographe (movie), and its mechanism is described on the first page in the textbook of film history. It has been used widely as the educational equipment to understand a principle of Cinématographe (movie) and animation even today. The structure is very simple, so that everyone can make it with easiness.

But it's a little difficult to feel a movement of animation through this toy. To get the hang of this visual toy, we need a bit more practice to spin the disk steadily. The difficulty is derived from three elements interlocked.

1. The rotating speed of the disk
2. Slit
3. Thither view through slit

This strange visual toy is applied for large-scale equipment such as Cinématographe (movie) and Tachistoscope.

In this paper, I trace the history of Phenakistoscope and the applications of it especially about artworks(ex. Toshio Iwai). Furthermore I indicate a possibility of modern version Phenakistoscope as the technical aggregate to which amazing animation can be expressed more easily by the 21st century technology for example stepping motor, microprocessor, etc..

0. Phenakistoscope の語源について

Oxford English Dictionary によると 1834 年に Phenakistoscope という名前が登場したと記述されている。語源は「あざむく装置」といった意味で、ギリシャ語の φενακίζειν (phenakizein) (あざむく) からだとされる。

他に Zoetrope といいた筒状の装置も考案されている。語源はやはりギリシャ語で ζωή (life) + τροπος (turning) (回転する生命) といった意味である。

語源から明らかなように、本来動かないものが動くことが、こういった視覚装置の驚きであり、そこから日本語としての「驚き盤」として翻訳されたのであろう。残念ながらどのような経緯で「あざむく」から「驚き」に翻訳されたか現在文献等で確定することはできない。

Phenakistoscope は、映画の原理を知るために非常に簡単で安価に製作できる視覚装置である。小中学生対象のワークショップ等でも使用されることが多々ある。筆者も多少その運営に関わったことがある。「春休み こうべ こども映画教室」(2014年3月30日(日) 13:00~) (神戸映画資料館) では、講師に小池照男 (実験映画作家) を招いて親子で Phenakistoscope の製作を行った。子供たちはそれぞれ思い思いの絵をスリットが穿たれた厚紙の円盤に描き鏡を通して映像が動くことを楽しんだ (図1)。

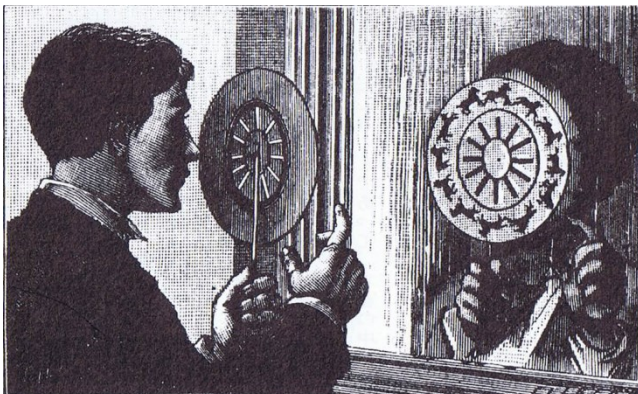


図1 Phenakistoscope

こうした製作の現場に立ち会った際に講師の小池より気にかかる話を伺った。

「最近の子供たちの中にはスリットを通してコマが

動いていることを認識できないことがある。」

つまり子供たちは驚かない。あるいは、驚けない。アニメーションが見えない。見られない。ささやかなワークショップの事実から、動く映像に満ち溢れた 21 世紀の子供たちのプリミティブな映像への注意力の散漫さを推し量ることもできよう。子供たちは、驚き盤という装置を通して注意深く運動の成り立ちを観察する注意力がなくなってしまうと想定することも可能かもしれない。

しかし、円盤を適度な速さで回すこと、さらに、それをスリットから覗くこと、とどめに、鏡の反映を見ることは、実は簡単な作業ではない。これは大人にとってもなかなか難しいものである。そのために Phenakistoscope は改良され、Praxinoscope πράξις (action) + scope (動きをのぞく) や Zoetrope が生み出されたと考えられる。そして、改良が進むにつれて構造は複雑になっていく。以下の図像を参照することで明らかであろう (図2、図3)。

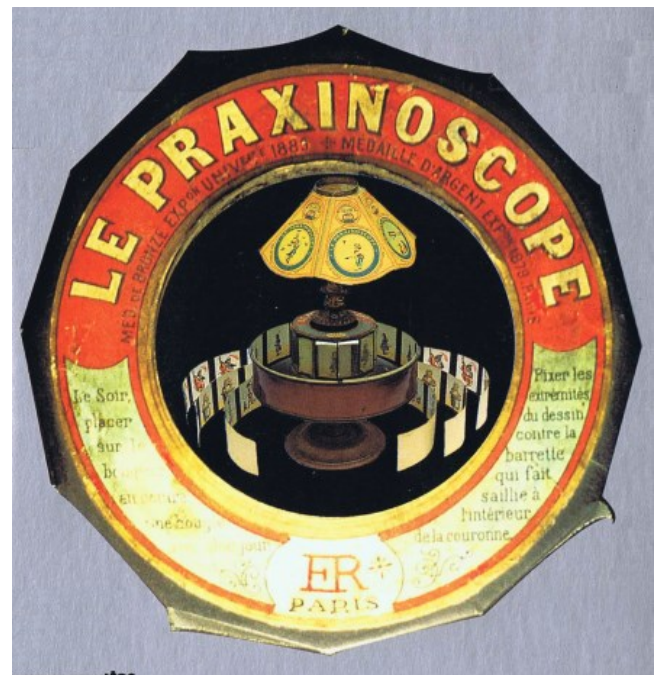


図2 Praxinoscope

“Secrets du cinéma” GALLIMARD JUNESSE p.7 より

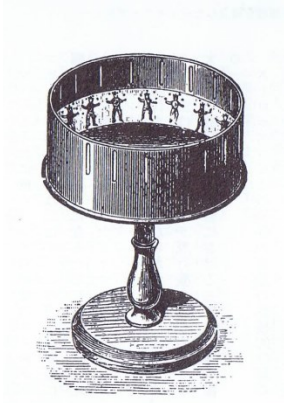


図 3 Zoetrope

1. Phenakistoscope の原理

当代随一のエッセイストである外山滋比古は、文節された「単語」の連なりや「。」で区切られた文章の断続がなぜ自然で滑らかに連続した意味を形成するのか、その基本原理を修辭的残像と呼んだ。そして、その発想の原点は麦の青々とした東京の郊外で耳にした琴の音であった。琴の音は断音であり、一つ一つの音は時間軸上で分断されている。それを全体として把握することでメロディとなり一つのまとまりになる。これをヒントに映画についての言及が行われる。

「映画のフィルムはひとコマひとコマは静止している。となりとの間には空白部がある。これを一定の速度で映写すると、おもしろいことにフィルムのひとコマひとコマの間にある切れ目が消えてしまう。そして、動きがでる。運動の方は、フィルムをまわすからだというので説明できるが、切れ目が消えるのはなぜだろう。などと、改まるまでもなく、残像のためであることは、小学生でも知っている。前のコマの映像を見る。それが消えてもしばらくの間はその残像が見えている。スクリーンの上では何も写っていない瞬間があるにもかかわらず、人間の目はそれを感じない。前の像の残像がその空白をつぶしてしまうからである。こうして、次々像が重なると、切れたフィルムであることはまったくわからなくなってしまう。」¹

外山はコマとコマの間を「空白」と呼んでいる。別の文章では「フィルムのひとコマひとコマの間に白い

部分がなければ」²と表現している。この言い回しは、多少なりとも映画に関わった者ならば首をひねることになる。映画のコマとコマの間には桎梏とした闇があることを映画関係者はよく知っている。コマの映像がスクリーンに投射された刹那、シャッターが回転して次のコマが投影されるまで光を遮断し続けるのである。映画の観客はコマとコマの間に黒の闇（あるいは、そこに微かに浮かぶ灰色のスクリーン）を見ているのである。次章で触れることであるが、正確に述べると映画がコマとコマの連続によって運動を表現するのは、外山が述べるような残像の効果ではない。

外山にとって、映画の動きをもたらす残像という表現は、言葉についての考察の修辭に過ぎない。彼が注目する言葉、特に文字の連なりの間には、紙の表面という白い余白がまぎれもなく存在している。

ここで注目したいことは、外山の述べる「残像」という表現が正しいか否かではない。個々の要素（琴の音、フィルムのひとコマ、一つの単語）に注目すると、その要素が構成する総体を見逃してしまうことに注意をはらっているのである。部分の要素がモザイク的に集まることで全体を成立させるのではなく、全体は個々の要素に還元できない新たな総体としての意味を持つのである。それが、コマの集まりに還元できない映画であり、単語の集まりに還元できない「文章」という存在である。映画も、そして、Phenakistoscopeも単なる部品の集まりではなく、新たなる総体なのである。

この考え方は 1920 年代に心理学の世界を席卷したゲシュタルト学派の思考を見事に敷衍している。そして、まぎれもなく、ゲシュタルト心理学は音の連続の総体、視覚を中心にした運動の総体、その連続性の印象について数々の実験をおこなった学問であった。

2. ゲシュタルト学派

ゲシュタルト学派の一つの大きな成果は運動（特に視覚）の印象についての考察である。

視覚的な図像の運動の印象についての研究はマッ

クス・ヴェルトハイマー (Max Wertheimer) の『運動視の実験的研究』(“Experimental Studies on the Seeing Motion”)(1912年)がある。彼は Tachistoscope (τάχιστο-ς (swiftest) + scope) (素早く見る装置の意味) を用いて視覚についての運動の印象の研究をおこなった。円盤にスリットを穿ち、その背後に異なった素材を提示する。スリットの間隔とモータの早さで呈示時間間隔 (SOA)³や刺激対象呈示時間 (ISI) が操作できる。この装置を使用して三種類の仮現運動 (apparent movement) (1) α 運動、(2) β 運動、(3) γ 運動における β 運動について考察した。本来動きのないものに動きが感じられる現象に注目したのである。実験の主役である Tachistoscope は大がかりな電気仕掛けの Phenakistoscope そのものであることは、写真より明らかであろう (図4、図5)。

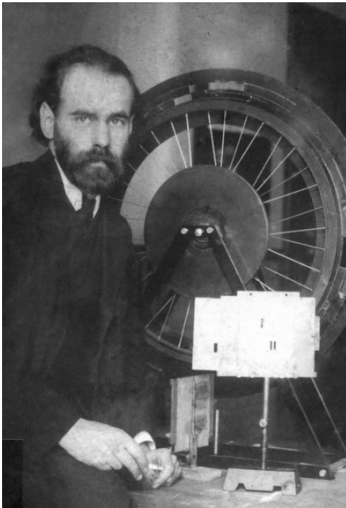


図4 Tachistoscope と Max Wertheimer

“History of Psychology” 2014 Vol. 17,p.154 より



図5 モータ、Tachistoscope、スコープ

“History of Psychology” 2014 Vol. 17,p.156 より

まずは仮現運動について簡単に概観する。

(1) α 運動について

図形の大きさが本来は変化していないにも関わらず、変化して見える運動。ミュラー・リヤーの図形 (図6) を交互に示すと伸縮運動が知覚される。

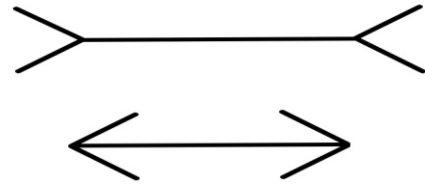


図6 ミュラー・リヤー錯視(Müller-Lyer illusion)

(2) β 運動について

空間上の異なるところに位置する二つの対象が、ある時間間隔で表示された場合、その対象が運動として知覚されるような現象をいう。

提示される対象の時間間隔によって大きく三つの場合に分けられる。

- ・約 30ms 以下の間隔 (約 33 フレーム毎秒)。二つの光点は同時に点灯しているように感じる (同時時相)。
- ・約 60ms 秒間隔 (約 16 フレーム毎秒)。二つの光点はなめらかに移動しているように感じる (最適時相)。この運動を ϕ (ファイ) 現象と呼ぶ。
- ・約 200ms 秒以上の間隔 (約 5 フレーム毎秒)。二つの光点はそれぞれ別の光点として認識され、運動は知覚されない (継時時相)⁴。

この現象はコルテの法則 (Korte's law) として定式化されている⁵。

- ・呈示時間間隔が一定ならば、刺激輝度の上昇とともに、最適空間距離が増加する。
- ・空間間隔が一定ならば、刺激輝度の上昇とともに、最適時間間隔が減少する。
- ・刺激輝度が一定ならば、空間距離の増加とともに、最適時間間隔は増加する。

$$\phi = f(s / (i * g))$$

s : 刺激対象間の空間距離。

i : 対象の刺激強度。

g : 刺激対象呈示時間 + 呈示時間間隔。

この数式は三つの条件が絡まり合って、 ϕ 現象が発

生することを示唆している。つまり、 ϕ 現象は三つ巴の現象であり、単純に説明が出来るものではない。それゆえ、古典的な Phenakistoscope で ϕ 現象がきちんと出現するのはある種驚きなのである。逆に Phenakistoscope でアニメーションが見えづらいことも実は大いにありうることである。

(3) γ 運動

光点の明滅の際に光点が膨張・収縮して見えるような運動を指す。

映画も ϕ 現象が発生する絶妙な状態によって動きを表現している。先に触れた外山滋比古は ϕ 現象を比喩的に残像と述べた。厳密な意味では ϕ 現象と残像は全く異なるものである。仮に網膜に残像が残ると仮定すると、その像が網膜上に重畳されて明確な像を見ることができなくなる。

昔のテレビ放送(1960年~1970年)ではナイター中継のライトが糸を引くように見えたり、夜の車の尾灯が流れて見えたりすることがあった。これは、当時のビデオカメラの撮像管が強い光を受光すると残像が残るためであった。人間の目に残像がのこるのであれば、世界は明るい光が尾を引くように見えることになってしまう。 β 運動(ϕ 現象)は残像ではなく、目についての時間軸上での間歇運動の識別能力を問題にしているのである。

身近なところで β 運動を利用した技術の一つが、ダイナミック点灯である。たとえば、発光ダイオード(LED)を100Hz(10ms)程度で点滅させると、人の目にはLEDが常時して点灯しているように見える。時間軸上で点滅を識別できない。つまり、 β 運動の同時時相である。これにより電力の節約や明るさの調節が可能になる。ただし、点滅の速度によってフリッカーによる健康被害も発生している⁶。点滅周期を5Hz程度(200ms)にすると人の目にはLEDの点滅として認識される。駅や店先で表示されている多くの発光ダイオード(LED)の表示は常時点灯ではなく、ダイナミック点灯だと考えられる。これは β 運動の30ms以

下の間隔の点滅により実現されている。

Tachistoscope にしろ、Phenakistoscope にしろ、発光ダイオードによるダイナミック点灯にしろ、その原理は刺激対象呈示時間や呈示時間間隔をうまく制御した仕掛けなのである。

ここで冒頭に述べた Phenakistoscope の運動観察の困難性(動きを見ることができない)について思い出してもらいたい。Phenakistoscope で動きを見るには人力でディスクを適切に一定の速度で回転させなければならない。それはいささか難しい技能である。ゲシュタルト心理学者はモータという当時最新の技術で、その困難を回避しようとしたに相違ない。

3. Tachistoscope とモータ

1920年代、ヴェルトハイマーの生きた時代は、点滅の時間等の制御が非常に難しい課題であった。光源自体を自在に点滅させることが難しかった。そのため光源と観察者の間に円盤状のスリットを置き、それを一定の速度でモータによって回転させることで点滅時間や提示時間間隔を制御する工夫が必要とされた。Tachistoscope は Phenakistoscope の原理とまったく同じであり、円盤の回転の動力が手動か電動(モータ)かの違いである。Tachistoscope はモータによって成立したといっても過言でない⁷。

ところで永久磁石型電動モータの歴史を紐解くと、その発明は決して古くないことがわかる。歴史を遡っても100年あまりである。Tachistoscope はモータの回転速度(正確にはプーリーのサイズ)を変えることによって点滅時間や提示時間間隔を可変することができる。それは非常に大がかりなシステムであり簡単な実験装置ではない。ヴェルトハイマーは恩師フリードリッヒ・シューマン(Friedrich Schumann)の助けを得て、その装置を使うことができたのである⁸。

ここでモータの歴史を概観する。モータは1824年のアラゴの円盤(Arago's Disk)の発明等が基礎となっている。1834年トーマス・ダヴェンポート(Thomas Davenport)は最初の実用的な直流電動機(DC

electrical motor)を生み出した。その後、多くの科学者の努力により改良が加さねられ、1910年代の初めに直流・単相交流に関わらず運転できる小型電動機(ユニバーサルモータ)が発明される。

歴史の事実として、モータが実用になるのは1910年以降ということである。ゲシュタルト心理学の嚆矢の一冊であるヴェルトハイマーによる『運動視の実験的研究』が発表された年は1912年であり、まさにモータの大衆化の夜明けの時代だった。モータがなければ『運動視の実験的研究』も生まれることがなく、そして、仮現運動の考察もなされなかったと考えられる。

同様に Phenakistoscope がその祖先とされる映画(Cinématographe)もまたそのオートメーション化(自動化)には、モータの技術が欠かせなかった。

フランスにおいて映画の発明者と目されるリュミエール兄弟(Auguste Marie Louis Lumière, Louis Jean Lumière)は、映画撮影・映画投影の動力として人間の力(手回し)に頼っていた。一定の速さでクラックを回転させる技術こそが、映画カメラマンや映写技師に求められた才能である(図7)。フランスでの映画の誕生が1895年12月28日だとすると、その時代一定の速度で回転する電動のモータはまだ一般的でなかった。映写技師が手で映写機クラックを回すことから解放されるのは、つまりモータの時代到来は13年ほどの後である。映写機がモータ駆動になったのは1908年のことである⁹⁾。映画にはカメラと映写機が必要である。映写機は据え置きであるため、その重量や電源設備についてそれほど頓着しなくて済む。一度設置・配電すれば以降は継続的に使用できる。

対して映画カメラは撮影のために持ち運ぶものであり、また撮影現場の電源があるわけでもない。モータにたよれないのである。つまり、つい最近まで電力のいらぬ動力(例えばぜんまい式(clockwork power system))が使われていたことに納得がいく。

それにしても1910年代から現在に至るまでモータは大きく重い。電動化された Cinématographe も Tachistoscope も非常に大がかりで特殊な装置であり、

一般に人の目に触れる代物ではなかった。映画館の裏の映写室や大学の研究室にひっそりと存在しつづけ、今も変わらずそこにある裏方である。

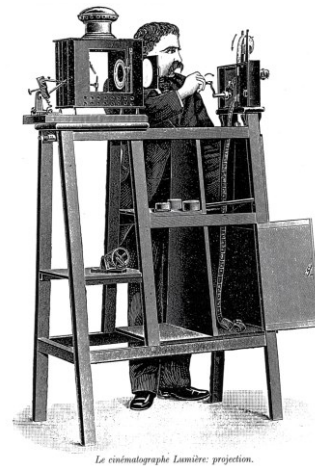


図7 The cinématographe Lumière in projection mode (Louis Poyet - Bernard Chardère, Les Lumière, Payot Lausanne, 1985; Credits: Archives Château Lumière.)

4. モータ・テクノロジーの革新

モータの進化した一つの形がステッピング・モータ(Stepping Motor)¹⁰⁾である。Baby of the Motor Family とも言われ、モータの中では一番の新参者である。その原型が作られたのは1910年頃と言われている¹¹⁾。1933年にイギリス海軍がコンパスのジャイロや標的の指示器に使い、後にアメリカ海軍が第二次世界大戦で使用したらしい¹²⁾。軍事目的であり民間からかけ離れたものであったことは確かである。

このステッピング・モータが一般的に使われるようになったのは、1960年代であった。国産品としては山洋電気株式会社が1959年一号機の生産を開始した。ただし、当時のステッピング・モータはその制御のために、真空管やトランジスタを多数用いる装置が必要であった。そのためモータ自体よりも制御・駆動装置が大がかりなものになってしまう本末転倒な結果に至っている。

とはいうものの、そうしたマイナスを補うに足る特徴がこのモータにはある。それ故、今日に至るまで絶

え間ない進歩を遂げてきたのである。その鍵はオープンループ制御であった。

本来モータは直流であろうが交流であろうが、適切な電圧をモータに印加すると自動的に回転する。この特性は非常に便利であり、我々がモータに対して期待している根本的な機能を満たしている。回ることが目的の装置、例えば洗濯機、扇風機、クーラー室外機、ジュース・ミキサーなどは、回ることによって基本的な目的が満たされる。しかし、モータが何回転して軸がどの位置にいるのか、また、回転速度はどれくらいなのかを瞬時に知るためには非常に面倒な工夫が必要となる。モータ自体は自由気ままに回っており、自分がどれ位の速さで何回回転したのか知らない。その速さやロータ（回転軸）の位置、回転数を知るためには、外部からモータをモニターして制御する必要が出てくる。クローズドループ制御、換言すればフィードバック系の制御が必要になる（図8）。

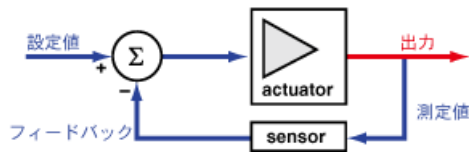


図8 フィードバック図式

これに対してステッピング・モータは、フィードバック系の制御を必要としない。自分が何回転しているのか、ロータ（回転軸）は現在どの位置にいるのか、そして、どれくらいの速さで回転しているのか、そうしたすべての情報をモータ制御するシステムが把握しているからである。こうした制御をオープンループ制御という。フィードバック系が必要ないので、そのシステムは非常に簡単なものとなる¹³。

それではステッピング・モータは何故オープンループ制御可能なのか。それはステッピング・モータが、入力されるパルス数にしたがって、決められた回転角度で回転し静止する構造になっているからだ。さらに回転による誤差も蓄積されない。より具体的に述べるならば、モータが受け入れる1パルスにつきロータ

が7.5度回転する仕様のステッピング・モータは48パルスで360度、つまり一回転する。 $7.5 \times 48 = 360$ 。また、1パルスを100msの間隔で入力すると一回転するには $100\text{ms} \times 48 = 4800\text{ms}$ (4.8秒)かかることになる。入力パルスの数とその速さによってステッピング・モータは精確に動作するのである。

結論としてステッピング・モータはそれを制御するシステムが責任をもって入力パルス数とその速さを管理すれば、その回転を自在に制御することが可能となるのである。

ここだけ見ると良いことばかりのように考えられるが、実は入力パルス数とその速さを管理することは決して簡単なことではない。管理するための面倒な論理回路を組まなければならない。電源をつなげば動くモータとは違うのだ。少なくとも以下のような機能が実装されなければならない。

- (1) クロックパルスジェネレータ（モータに送るパルスを生成する）。
- (2) 周波数可変機能（パルスの生成の周波数を変化させる）。
- (3) 励磁モードの切り替え機能（モータのトルク等の特性を変化させる。1相励磁、2相励磁、1・2相励磁等がある）。
- (4) 励磁相制御機能（モータの励磁コイルに駆動信号（パルス）を配分する）。
- (5) 回転方向切換機能（ロータ（回転軸）の回転方向を変える）。
- (6) モータ起動・停止機能。
- (7) 電力増幅機能（入力パルスに呼応して励磁電流を増幅する）。

本章冒頭に述べた真空管やトランジスタによる制御・駆動装置が大がかりなものになってしまうのはこうした七つのうんざりする論理回路をいちいち作成しなければならないからである。

ステッピング・モータがいくばくか普及しだした1960年代は、七つの機能を制御する安価な論理回路としてのシステム（デバイス）が存在しなかった。すべ

でオーダーメイドで製作されていた。それ故、ステッピング・モータの使用はシステムを自前で調達・開発できる沖電気工業、NEC、IBMといったOA機器製造大手に限定される。1965年山洋電気株式会社のステッピング・モータ生産数は年間数百台だったとその社史に記されている¹⁴。

時代は下って、ステッピング・モータを便利に使いこなすために、制御・駆動システムについて改良がおこなわれる。

「1975年頃からは半導体技術の進歩に伴って、ステッピングモータ駆動部の論理回路がIC化され、これにより装置の駆動部に直接モータを付けるダイレクトドライブ方式が確立し、シリアルプリンタ・ATM・FAX・コピー機などに需要が拡大した。1982年頃にはフロッピーディスクやハードディスクの読み取りヘッド駆動部への採用も増加し、台頭してきた競合メーカーとの価格競争も峻烈を極めた。」¹⁵

1980年以降、ステッピング・モータは日常の機材(プリンタ、デジタルカメラ、家電製品)に大量に使用されコストも大幅に削減されることとなった。制御・駆動部の論理回路も小型化、低価格化されていく。つまり専用ICがレディメイドなものとして利用されるようになった。

例えば、山洋電気株式会社のデバイスのカタログを見ると1987年に専用の制御回路IC PMM-8713が発売されている。UNIVERSAL CONTROLLER for Stepping Motor Drivingと銘打っている。

「PMM-8713はステッピング・モータの取り回しを非常に簡単にすることを目的に開発されてきました。そして、パルス発生器(パルスを入力)、電力増幅トランジスタ、直流電源の三つを用意するだけでステッピング・モータユニットを簡単に構成できるようになっています。」¹⁶

先に説明した七つの論理回路機能の内、四つが一つのパッケージICに詰め込まれている。サイズも20mm×7.6mm×5mmと大変小さい。このデバイスは2010年あたりまで現役で使用されていた。多くのステッピ

ング・モータ制御の教科書にも凡例として掲載されていた。

そうした汎用デバイスの量産とともに1990年以降組込み型のマイクロプロセッサが台頭してくる。固有の制御(レディメイド)にこだわらない汎用的なプログラマブルな論理回路(マイクロプロセッサ)の登場である。オーダーメイドからレディメイド、そして、セルフメイドへとデバイスは変化していく。

5. マイクロプロセッサの進撃

ここでマイクロプロセッサの歴史を概観したい。

1971年に4004マイクロプロセッサが発売。intel社は記す。

「4004マイクロプロセッサは世界初のマイクロプロセッサです。この画期的な発明が、Busicom社の計算機の心臓部となり、パーソナル・コンピュータ(PC)をはじめとした生命のない物にも知性を与えられる道が開かれました。」¹⁷

1976年Z80が発売される。これは日本で個人が所有しうる最初のメインCPU(中央演算装置)となる。1980年後半まで日本でのCPUの中心的存在であった。当時Z80CPUの価格は数万円であり、現在一般に使用されているコンピュータの上位CPUの価格と変わらない。

しかし、ムーアの法則(あるいは、その修正案であるバラックの法則)のごとく性能は40年前のZ80が0.58MIPS¹⁸に対して2014年のintel社のCPU・Intel Core i7 5960x(2014年)は238310MIPSに上り、その性能比率はなんと約41万倍である¹⁹。

それぞれの時代のハイエンドなマイクロプロセッサ(Z80にしるCore i7)は、個人所有の比較的高価なコンピュータとして歩を進めてきた。仕事・家庭の趣味、具体的には文書作成等の個人利用に用いられた。それに対して情報端末機器としてのパーソナル・コンピュータは、一般大衆には1995年を境に普及したと言われる。Windows95の発売である。それまで、存在していたコンピュータはたとえ個人に手の届く金

額の範囲にあったとしても、パーソナル・コンピュータというよりもマイクロコンピュータ、略してマイコンと呼ばれ特定の人々によってしか使用されない装置であった。

ここで誤解を招かぬようマイコンの意味を確認しておく。もともとマイコンの定義はマイクロプロセッサを組み込んだマイクロコントローラの略である。しかし様々な成り行きで **my computer**²⁰、つまり「私(自分)のコンピュータ」の略と思っている人も決して少なくない。どちらも 1995 年までのコンピュータのあり方を示していると思う。マイコンのマイは 1995 年を境にパソコン(パーソナル・コンピュータ)のパーソナルという言葉に置き換えられていく。

My(私)ではなくなり Person(個人)となり、見ず知らずの個人がネットワークを通じて情報をやり取りする世界が一般化する。

一方、コンピュータの内部に使われるマイクロプロセッサは 1990 年代からハイエンドな道(マイコン、パソコン、スマートフォン)とローエンドな道(組み込みデバイス)の二手に分かれるのである。マイコンは物の中に埋没する。

これまで長々と話してきたのは、情報機器の花形的な存在であるハイエンドなプロセッサの進展を称えるためではない。むしろ逆にローエンドなそれについて語るためである。ローエンドなプロセッサとは、一般のメーカーが玩具、家電、車等に組み込んで使用するローコストな CPU であり、特定の機能(玩具を動かす命令を出す、クーラーのルーバーを特定の角度で動かす命令を出す、車のサイドミラーを電動で動かす命令を出す等)に限定された役割をになう。こうしたプロセッサは 1990 年代までは、一般の個人が簡単に手に入れることは難しかった。たとえ運よくプロセッサを手に入れたとしても、それを動かすためのプログラム環境は複雑で簡単に個人が手を出せる代物ではなかった。

6. プログラム可能性

例えば、1980 年代、ハイエンドの CPU(マイクロプロセッサ)(Z80)が手に入ったとしよう。実はこの CPU だけでは何もできない。いくら頭脳が存在しても、それが動かす手足がなければ話にならないのだ。Z80 をまっとうなコンピュータとして動かすためには以下のような取り巻き LSI(ファミリーLSI)が別途必要であった。

- Z80SIO (Serial Input/Output Controller)

CPU と外部のターミナルの通信を行う LSI。

- Z80CTC (Counter/Timer Circuit)

インターバルタイマー等の制御を行う LSI。

- Z80PIO (Parallel Input/Output Controller)

CPU とデータをバイト単位で入出力する LSI。

- Z80 DMA (Direct Memory Access Controller)

メモリと高速にデータ遣り取りを行う LSI。

こうした LSI をハードウェアとして組合さなければコンピュータの体をなさない。仮に、それができたとしても、次のステップとしてプログラム開発が待ち受けている。開発言語はアセンブラ、あるいは機械語でありで非常にプログラムしづらい。プログラムができたとしても、それを ROM (Read Only Memory) に焼き付けなければならない。そのためには ROM ライタが必要になり、ROM のプログラムを消すためには ROM イレイザーが無ければならない。限りなく面倒で手間ひま時間がかかり、開発機材も多数必要となる。ステッピング・モータの論理回路で触れた様々な周辺機能の実装と同じ問題が発生したのである。今日から振り返ってみれば、そうしたファミリーLSI をまとめてワンチップにしたマイクロプロセッサも当然誕生してしかるべきであった。このことは後で触れる。

複雑なコンピュータ開発に関わるもろもろの中でプログラミングは、ソフトウェア開発と呼ばれた。それに必要な道具(ソフトウェア)のまとまりが、SDK (Software Development Kit ソフトウェア開発キット)である。プログラム開発は SDK を手に入れる(プログラム環境を整える)ことから始まる。多くの場合、

開発環境の販売価格は高額であった。

プログラム開発によって、同一の Z80 がゲームボーイ(ゲーム機)になったり、フロッピーディスクのコントローラになったりする。かくして Z80 はプログラムしだいで何の仕事でもこなせる万能装置となる。まさにプログラマブルである。

もちろん、ステッピング・モータを制御する論理回路、すなわちパルス生成装置等も製作可能になった²¹。ステッピング・モータ等の技術やそのコンピュータ制御が Tachistoscope にも用いられるようになった。

「現代の技術革新によって、古典的な Tachistoscope はコンピュータプログラム制御に置きかえられてきた。そのプログラムは、刺激の提示時間を 0.01 秒刻み以下でも滑らかに増減できるからである。」²²

もちろん製作は可能になったが、ハードウェア構成、ソフトウェア構成等複雑さはそのままであった。

1990 年代、こうした状況に大きな変化が生じる。例えば SDK が無料で提供されるようになった。さらに、CPU と周辺の LSI が統合されるワンチップのコンピュータが生み出された。代表的なものとして PIC (Peripheral Interface Controller) などが挙げられる。PIC は米マイクロチップ社(Microchip Technology)が 1985 年より発売した非常に安価なマイクロコンピュータ(CPU 他すべての機能がワンチップに組み込まれている)である。すべて一つに統合され誰でも簡単に、例えばステッピング・モータの制御論理回路をほぼ無料で開発できるようになったのである。

7.1 Phenakistoscope と芸術

Phenakistoscope は以下の三つの要素で構成されている。

- (1) ディスクの回転。
- (2) スリット。
- (3) ディスクに描かれている絵を見る視点と視線。

本論の最終目的は、Phenakistoscope がいとも簡単に構成した運動のマジック(驚き)を現代のテクノロ

ジーで置き換えることが可能かどうか、そして、そうすることの妥当性が歴史的に裏付けられるかどうかという点である。

そのために、Tachistoscope というモータ制御の視覚心理学実験装置を取り上げて、その構成原理を辿ってきた。しかし、そこで実現された装置は巨大なシステムを必要とするものであった。

Phenakistoscope が現在の技術を通して新たなものとしてよみがえる可能性はないのだろうか。一つの答えとして芸術作品の中にその応用が見られる。

芸術にはハイテクノロジーアートという分野がある。時代の最先端の技術を駆使して芸術作品を生み出す分野であろう。特に 1980 年代後半から現代テクノロジーを組み合わせた芸術家が数多く誕生している。その中で代表的存在と目されるのが、岩井俊雄であろう。

Phenakistoscope に関わる作品も数多く発表しており、1990 年代には SGI 社のワークステーションやパーソナル・コンピュータ Amiga 等を使ったインストールやテレビ番組も制作している。多彩な才能に満ちた芸術家だと思う。

彼の作品の中で Phenakistoscope に関わりが深いのは『時間層Ⅰ』(1985 年)、『時間層Ⅱ』(1985 年)、(図 9)『時間層Ⅲ』(1989 年)である。テレビモニタを使用し、円盤上に配置した紙の人形が φ 現象として立ち現われてくるものである。円盤はモータで定速運転していると思われる。

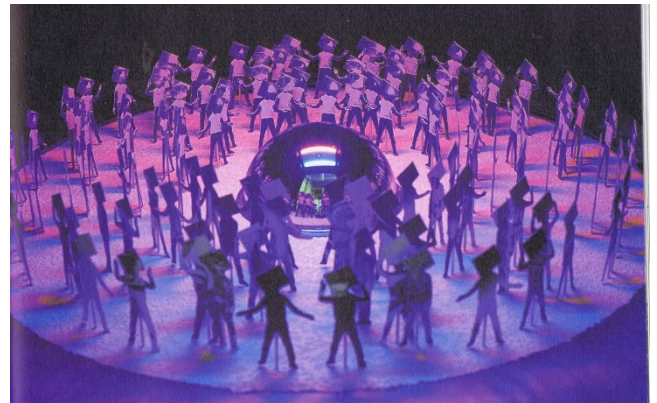


図 9 『時間層Ⅱ』

(『岩井俊雄の仕事と周辺』六耀社、2000 年より)

Phenakistoscope の原理を応用した作品は、定速回転するディスクと、それを覗くスリット、そして、ディスクとスリットを結ぶ視線の確保が重要である。Phenakistoscope はスリットという間歇運動を行う仕組みを持っているが、これが、ディスクの回転速度と視線を拘束し、観察者の視界を狭めている。間歇に像を提示する技術こそ、Phenakistoscope の難点であった。この点を解決するために、Tachistoscope はモータを使ったことは先に述べた。これは明らかに力技である。1920年代にはモータとスリットを組み合わせることしか間歇運動を実現できる術はなかったのである。

7.2 ストロボスコープからストロボへ

Phenakistoscope は別名 Stroboscope (ストロボスコープ) (ギリシャ語で $\sigma\tau\rho\beta\omicron\varsigma$ (twisting or whirling round) であり「回転する」が語源となっている) とも言われる。構造が同じなのに名称が異なるのは発明者が違うからである。前者はベルギー人のジョセフ・アントワヌ・フェルディナン・プラトー (Joseph Antoine Ferdinand Plateau) であり、後者はオーストリア人のジーモン・リッター・フォン・シュタンブファー (Simon Ritter von Stampfer) である。二人はお互いのことを全く知らずに、ほぼ同時期 (前者は1831年、後者1832年) にほぼ同じ装置を発明した²³。現在、ストロボスコープはストロボとして独り歩きして、発明当時のものとはかけ離れた装置になっている。ストロボはエレクトロニックフラッシュの発光によって、短時間対象物を露光する。このフラッシュを回転するディスクに連続発光させれば、間欠運動を再現することができる。もはやスリットは必要なくなる。しかし、フラッシュの連続発光には高電圧が必要であり、機材は大型化せざるを得ない。連続発光によって Phenakistoscope からスリットを取り去ることは可能であるが、装置は非常に大型化してしまうし、当然コストもかかる。

岩井はその点を非常に柔軟な発想で対応している。テレビモニタの使用である。テレビモニタは 60Hz の

フィールド周波数、30Hz のフレーム周波数でブラウン管面を走査している。岩井は白と黒のビデオ信号をコントロールすることによってテレビモニタをストロボのように使用している。彼の作品は間歇するテレビモニタの光と回転するディスクによって Phenakistoscope に必要であったスリットを不要にしたのである。ただし、ディスクが提示される空間は間歇する光によってのみ照らし出されなければならない。

岩井の作品は芸術品としては文句なく素晴らしいが、やはり、元々の Phenakistoscope ほど簡単なものではない。とても大がかりなのである。

いずれにしろ、間歇する光源を正確に制御するのは厄介なのである。エレクトロニックフラッシュによる連続発光は 1980年代まで写真スタジオ、大学等の科学研究室等で使用された。しかし、一般には全く必要のない装置であった。

1990年代、エレクトロニックフラッシュに変わる救世主が少しずつ世に姿を現し始めた。発光ダイオード ((LED) Light Emitting Diode) の登場である。

発光ダイオードは 1962年に赤色ダイオードが発明された²⁴。エレクトロニックフラッシュと違って低電圧の印加で点灯しオン・オフの遮断周波数特性も非常によい。10Mz 程度のオン・オフには対応可能なので間歇する光を正確に制御することはたやすい。更に、製造は構造の単純な PN 接合のため量産が可能である。岩井がテレビモニタを使った以上に小型化、低コスト化が望める電子部品である。

今日、スリットを用いない Phenakistoscope の多くは発光ダイオードを用いて間歇する光源を用いている。

スリットから解放された現代版 Phenakistoscope ではあるが、それを展示する空間の光をコントロールする手間が発生した。この光のコントロールを無用にできないものか。そうすれば、現代版 Phenakistoscope はどの空間でも光源を気にせず見ることができるようになる。

7.3 ステッピング・モータ+PIC

ステッピング・モータに制御用 LSI (PMM-8713) を接続し、ディスクを回転させるとどうなるだろうか。ディスクは一定の角度回転して停止し、また一定の角度回転して停止する。これを繰り返す。一定角度回転する瞬間速度が非常に速い場合、人間はその動きを認知できない。止まっている所だけ認知する。これは Phenakistoscope の原理そのものである。

岩井はこの点に着目して『STEP MOTION』(1990年)(図 10)を制作している。この作品は、スリットを通さず、通常の空間でアニメーションを見ることができる。彼の作品を注意深く見ると、回転するディスクのアニメーションのコマが 48 個であることが分かる。



図 10 『STEP MOTION』

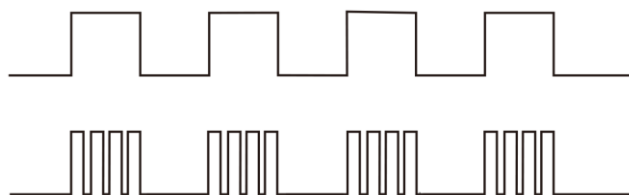
(『岩井俊雄の仕事と周辺』六耀社、2000年より)

何故 48 個なのか。この理由は、もっとも普及している典型的なステッピング・モータの回転角が 7.5 度であるからに他ならない²⁵。360 度を 7.5 度で割ると 48 という数字が出てくる。かつての Phenakistoscope に描かれる図像は 10 コマや 12 コマであるが、モータは 1 パルスで 7.5 度ずつしか動かない。これがコマの数を岩井が 48 にした理由である。

岩井の作品が 1990 年作ということからステッピング・モータをコントロールした LSI は山洋電気株式会社 PMM-8713 (あるいはその相当品) である可能性が高い。一定のパルス(これが重要である)を PMM-8713 に送り続けることでこの作品は成立している。

仮に、このパルスの頻度を以下のようにすると古典的な Phenakistoscope の標準的な 12 コマの『STEP MOTION』も作れたはずである(図 11)。岩井は何故

それをおこなわなかったのか。これは、当時(1990年)一定のパルスを生成することは比較的簡単であったが、逆にパルス幅を自在にコントロールする技術が面倒であったからと推察できる。



program によって、1 パルスを 4 分割する

図 11 パルス幅を変更した例

(上図は 4 ステップ、下図は 16 ステップ)

1990 年以降、6 章で触れたように組込み型のマイクロプロセッサ(例えば PIC (Microchip 社製))が普及した。そしてマイクロプロセッサは個人で購入できるほど価格が下がっている。凡そ数百円程度である。さらに、開発環境は無償(制限付き)でプロセッサ発売元より供給されている²⁶。プログラム書き込みの装置も数千円で購入できる状態となった。

この環境でプログラムを行うと、上記のパルスを生成することは非常に簡単になる。さらに、開発の言語は低水準言語のアセンブラではなく高水準言語 C を使うことが可能である。

以下に筆者が開発した PIC 回路図とプログラムを示す(図 12)。

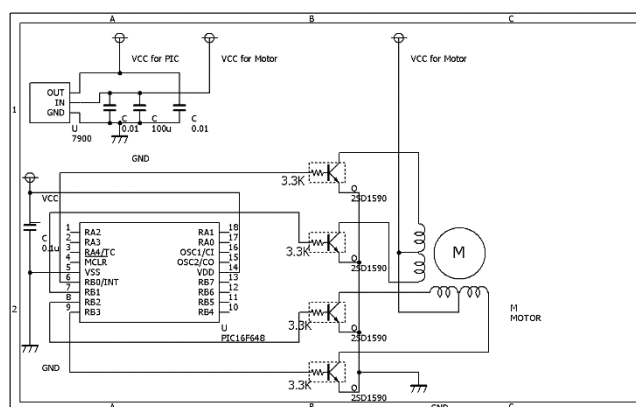


図 12 PIC 回路図

制御用 program (PIC16F648A 用 C 言語プログラムリスト)

```
#include <16F648A.h>
#fuses INTRC_IO,NOWDT,NOLVP,NOPROTECT
```

```

#include <standard_io(A)>
#include <standard_io(B)>
#include <delay(clock=4000000)>
int const StepPhase[4] = {0x05,0x06,0x0A,0x09};
void main()
{
  set_tris_b(0xF0);
  output_b(0x00); //---->①
  while(1) //---->②
  {
    output_b(StepPhase[0]); //---->③
    delay_ms(4); //---->④
    output_b(StepPhase[1]); //---->⑤
    delay_ms(4); //---->⑥
    output_b(StepPhase[2]); //---->⑦
    delay_ms(4); //---->⑧
    output_b(StepPhase[3]); //---->⑨
    delay_ms(90); //---->⑩
  }
}

```

(開発環境は Microchip 社提供の MPLAB IDE と CCS 社提供の CCS-C を使用。本来であればプロセッサ発売元の最新 SDK (MPLAB X) を使用するべきであるが、たまたま手持ちの C 言語が CCS-C であったためこのようになった。)

PIC 回路図に関しては、これ以上簡単なシステムは考えられないものが出来上がっている。製作の都合上 PIC16F648A を使用した。PIC20 ピンの内入出力ポートは 18 ポート制御可能である。しかし、その内 4 ポートしか使っていない。本来であれば PIC6 ピンのものを使うべきであるが実験用のためこのようになった。

ワンチップの中にステッピング・モータを制御するための論理回路七つの内六つがプログラムで構成されている。

Program について簡単に説明する。プログラムはわずか 22 行で最低限ステッピング・モータは制御可能である。

プログラム 5 行目 clock=4000000 によって 4MHz の発振パルスを設定している。プログラム①はすべてのパルスを 0V のレベルでモータに出力する設定である。

②は while(1)

```

{
  ブロック
}

```

の構文でブロックを無限に実行し続ける。

③は最初のパルスを 5V にセットする。

④は 4ms の間 0V にリセット。

⑤は 2 パルス目を 5V にセットする。

⑥は 4ms の間 0V にリセット。

⑦は 3 パルス目を 5V にセットする。

⑧は 4ms の間 0V にリセット。

⑨は 4 パルス目を 5V にセットする。

⑩は 90ms の間 0V にリセット。

③から⑩が②のブロックによって無限に繰り返される。

これをパルスのロジックに図示する (図 12)

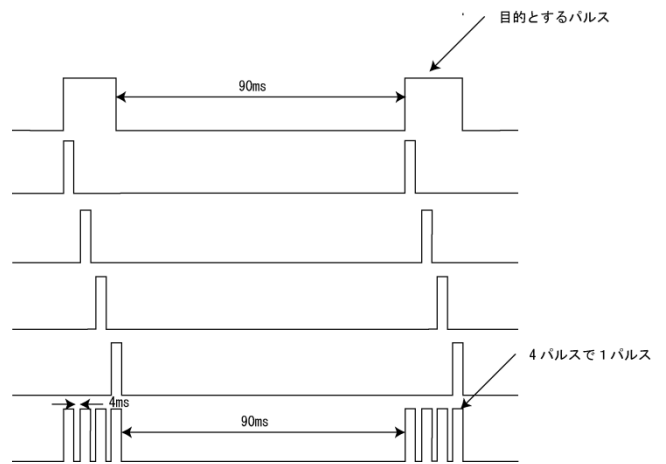


図 12 パルスロジック図

このプログラムによる運動は実際にアニメーションで見ることができる ([ネット \(youtube\) で公開](#))。具体的には図 11 の下側のパルスを発生するプログラムとなっている。正にセルフメイドである。

以下に試作の Phenakistoscope に関する構成図を示す (図 13、図 14)。

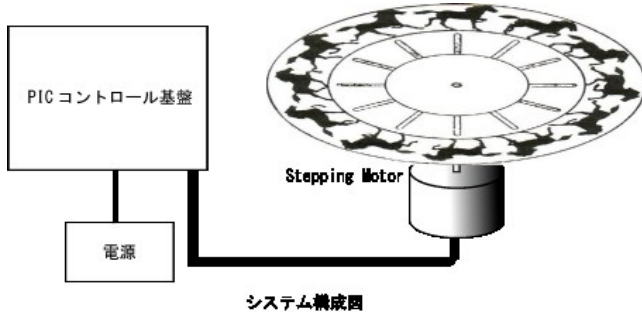


図 13 システム構成モデル

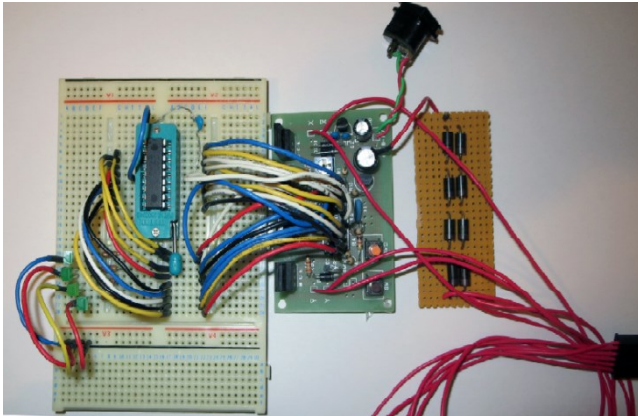


図 14 PIC コントロール実験基盤

8. まとめ

Phenakistoscope を現代の技術で製作するとどうなるかを論じてきた。そこで想定したハードルは以下の三点である。

- (1) 安価であること。
- (2) コンパクトであること。
- (3) 小さな子供でもすぐにアニメーションをみることができること。

(1) については、マイクロプロセッサ(Microchip 社製 PIC)を使用するとかなり安価で作成することができる。

(2) については、10cm×10cm 程度の箱に収めることが可能である。

(3) スリットを通して見る必要がなく誰でも簡単にアニメーションを体験できる。

さらに、補足的に Phenakistoscope をパーソナル・コンピュータでシミュレーションできるソフトも開発した。

これらを利用して Phenakistoscope が映画のオリジンであることを理解し、アニメーションとしての驚きを人々が共有できれば良いと思う。

今もって Phenakistoscope は古典的であり且つ新しい刺激的な視覚装置、すなわち「驚き盤」なのである

(シミュレーション可能なソフトウェア等に関しては、大学の研究成果として Web 等で公開する予定である。

また、現代版 Phenakistoscope の実作機についても、詳しい設計図等 Web 等で公開する予定である。)

脚注

1 外山滋比古 『ことばのある暮らし』、中公文庫、1988年7月10日、p.157

2 同上書、p.164

3 ISI(inter stimulus interval)=刺激間時間間隔

SOA(stimulus onset asynchrony)=第一刺激の開始から第二刺激の開始までの時間間隔

4 cf. Max Wertheimer “Experimental Studies on the Seeing Motion” in *On Perceived Motion and Figural Organization*, Translated by Michael Wertheimer and K. W. Watkins, The MIT Press, 2012, pp.15-16

5 cf. 「運動知覚」 『DVD-ROM 版 スーパー・ニッポニカ 2002 日本大百科全書+国語大辞典』、小学館、2002年

6 蛍光管を ELD に置き換える試みが電力消費削減の目的で行われている。その際におこったダイナミック点灯による健康被害の影響が以下の Web ページに述べられている。

http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2601W_W0A820C1000000/

7 cf. Armin Stock “SCHUMAN’S WHEEL TACHISTOSCOE: Its Reconstruction and Its Operation” in *History of Psychology* 2014 Vol. 17, p.149

8 *ibid.*, p.151

9 cf. ウシオ電機 「特集 映像…デジタル化時代に向けて」 『光学技術雑誌「ライトエッジ」No.19』、2000年、p.4

10 ステッピング・モータは Stepping Motor, Step Motor, Pulse Motor, Stepper Motor 等複数の呼び名がある。

11 cf. 谷腰欣司 『ステッピングモーターの実用技術』、電波新聞社、2006年5月10日

12 cf. Donald Labriola “Precision motion evolution: Early history of precision motors (1960s to 1980s) ,

2002

<http://machinedesign.com/motorsdrives/precision-motor-evolution-early-history-precision-motors-1960s-1980s>

13 モータの駆動能力を超えた強いトルクや高速のパルスを加えると、制御不能になり振動、逆転を引き起こしてしまう。この現象を脱調という。

14 cf. 山洋電気の製品の歴史 (3)

<http://tech-compass.jp/column/history/020/index.html>

2015年7月1日閲覧。

15 同上書

<http://tech-compass.jp/column/history/020/index.html>

より引用 2015年7月1日閲覧。

16 cf. SANYO DENKI CO.,LTD. PMM8713 data sheet

17 cf. マイクロプロセッサの歴史

<http://japan.intel.com/contents/museum/hof/index.html>

1より引用。当時の4004のサンプル価格は100ドル。

2015年7月1日閲覧。

18 MIPS(Millions of Instructions per Second)は、CPUが演算を行う際の速さの指標。数値が大きくなるほど演算速度が速くなる。詳しくは

https://en.wikipedia.org/wiki/Instructions_per_second

を参照のこと。2015年7月1日閲覧。

19 https://en.wikipedia.org/wiki/Instructions_per_second

より算出。2015年7月1日閲覧。

20 マイクロソフト社のOS windows98(日本語版)では「マイ コンピュータ」というアイコンがあるし、マイコン(電波新聞社刊)やマイコンピュータ(CQ 出版刊)といった雑誌もあった。

21 cf. Donald Labriola op.cit.

22 Edward C. Godnig “THE TACHISTOSCOPE ITS HISTORY & USES” in Journal of Behavioral Optometry, Volume 14/2003/Number 2, p.39

23 cf. Georges Sadoul “Histoire Générale du Cinéma 1”, Editions DENOËL, 1948,

24 cf. World's first LED

<http://www.gelighting.com/LightingWeb/emea/news-and-media/news/First-LED-by-the-GE-engineer-Nick-Holonyak.jsp>

2015年7月1日閲覧

25 谷腰欣司 前掲書、p.9

26 以下のページから無償で download 可能

<http://www.microchip.com/> 2015年7月1日閲覧