

五感と NNP

日大生産工(非常勤) ○篠原 正明
情報システム研究所 篠原 健

1. はじめに

人間の五感、さらには動物、生物一般の感覚について、NNP (Neural Net Process)ならびに DAP(Dynamic Averaging Process)に基づく解釈を考察する。

2. 刺激と感覚に関する DAP

刺激の大きさ s と対応する感覚値 r の間には、 $r = f(s)$ 等の関係が存在する。AHP では感覚層における諸量を扱っており、求められる項目ウェイト x も感覚量と解釈できる。しかし、刺激(入力)と感覚(出力)は相対的な関係であり、感覚量とは言っても視点に依存して刺激(入力)としての側面も持ち合わせており、そこで、項目ウェイト x_i 、項目 j から判断したウェイト $a_{ij}x_j$ の諸量に関して関数変換 $y = f(x)$ を導入し、完全情報 DAP の数理モデルを以下に整理する。

$$\text{算術・比率 DAP : } x_i(t+1) = \sum a_{ij}x_j(t)/n \quad (2.1)$$

x_i と $a_{ij}x_j$ に変換 $y = f(x)$ を作用すると、(2.2)を得る。

$$\text{算術・比率・変換 DAP : } f(x_i(t+1)) = \sum f(a_{ij}x_j(t))/n \quad (2.2)$$

ここで、一般に(2.1)と(2.2)は等価ではない。 $y = f(x)$ を対数関数とすれば、 $y = \log x$ で、(2.2)は(2.3)となる。

$$\log x_i(t+1) = \sum \log(a_{ij}x_j(t))/n \quad (2.3)$$

$y_i = \log x_i$, $g_j = \log a_{ij}$ とすると、(2.4)を得る。

$$\text{算術・差分 DAP : } y_i(t+1) = \sum (g_j + y_j(t))/n \quad (2.4)$$

(2.4)は差分を用いてウェイトを更新する差分 DAP である。

(2.4)を再度、逆変換すると、(2.5)を得る((2.3)と等価)。

$$\text{幾何・比率 DAP : } x_i(t+1) = (\prod a_{ij}x_j(t))^{1/n} \quad (2.5)$$

すなわち、算術比率 DAP(1)のウェイト部を対数変換すると幾何・比率 DAP(2.5)を得る。変換量 $y = \log x$ では、算術・差分 DAP(2.4)となる。同様に、幾何・差分 DAP のウェイト部を指数変換すると算術・差分 DAP を得、変換量 $y = \exp(x)$ では、幾何・比率 DAP ($y_i(t+1) = (\prod h_{ij}y_j(t))^{1/n}$, $h_j = \exp(a_{ij})$)を得る。比率 DAP も差分 DAP も変換と平均操作を工夫すれば等価となることがわかる。不完全情報 DAP についても、重み付き DAP(w-DAP) ([2])の枠組みで、同様の結果を得る。

例えば、(2.5)相当の幾何・比率 DAP は次式(2.6)となる。

$$\text{不完全情報・幾何・比率 DAP : } x_i(t+1) = \prod_j (a_{ij}x_j(t))^{w_j} \quad (2.6)$$

3. DAP の過渡特性

完全情報 DAP においては、整合性が無いほど(CI が大きいほど、第2固有値 λ_2 が大きいほど)、定常解に達する速度は遅く、大きな過渡性が見られる。例えば、CI=0 ならば、即ち定常解である。比較行列 A から主固有値寄与分を除去した B を以下に定義すると、 B の主固有値が A/n の λ_2 に対応する(但し、 λ_1 , x_1 , y_1 は A/n の主固有値、主右固有ベクトル、主左固有ベクトル、 $x_1^T y_1 = 1$ と正規化)。

$$B = (1/n)A - \lambda_1 x_1 y_1^T \quad (3.1)$$

CI=0 の時、 $A = \{w_i/w_j\}$ と表現でき、 $\lambda_1 x_1 y_1^T = \{w_i/w_j\}/n$ となるので、 $B=0$ (零行列)となり、過渡対応が無い。

不完全情報 DAP においては、たとえ整合性成立時でも(「 $\lambda = 1$ あるいは CI=0」 \Leftrightarrow 「パス等長性」 \Leftrightarrow 「 $a_{ij} = w_i/w_j$ (非欠落要素について)」、[2]参照)、即ち定常解とはならず、欠落領域に応じて過渡特性が生じる。

(3.1)と同様に、 B を以下に定義すると、 B の主固有値が $D(n)^{-1}A_0$ の第2固有値に対応する(但し、 μ_1 , x_1 , y_1 は $D(n)^{-1}A_0$ の主固有値、主右固有ベクトル、主左固有ベクトル)。

$$B = D(n)^{-1}A_0 - \mu_1 x_1 y_1^T \quad (3.2)$$

CI=0 の時、 $A_0 = \{a_{ij}\}$, $a_{ij} = w_i/w_j$ と非欠落要素については表現できるが、 $B=0$ とならず、過渡特性が発生する。

4. 視覚と NNP

4.1 時変比較行列 $A(t)$ の DAP

時変 $A(t)$ を持つ DAP の更新式は(4.1)で与えられる。

$$x(t+1) = D(n)^{-1}A_0(t)x(t) \quad (4.1)$$

ここで、 $A_0(t) = \{a_{ij}(t)\}$ の定義として以下の3つを考える。

$$\text{[同時比較法]} \quad a_{ij}(t) \approx x_i(t)/x_j(t) \quad (4.2)$$

$a_{ij}(t)$: t 時点における項目 j からみた t 時点における項目 i の比率で(4.2)で与える。

$$\text{[順時間差比較法]} \quad a_{ij}(t) \approx x_i(t+1)/x_j(t) \quad (4.3)$$

$a_{ij}(t)$: t 時点における項目 j からみた t+1 時点における項目 i の比率で(4.3)で与える。

$$[\text{逆時間差比較法}] \quad a_{ij}(t) = x_i(t)/x_j(t+1) \quad (4.4)$$

$a_{ij}(t)$: t+1 時点における項目 j からみた t 時点における項目 i の比率で(4.4)で与える。

4.2 時変 DAP による補色残像現象

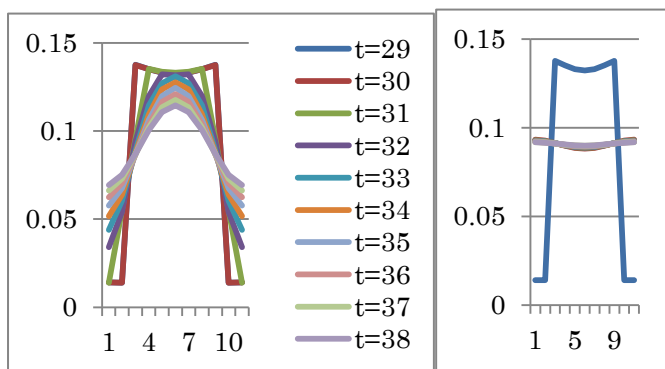
前節で提案した 3 つの時変 DAP を用いて、ある時点から画像が切り換る動画の NNP 特性を考察する。以下の例題では、最初は中央に黒部分が存在し、ある時点からは全面白色に切り換る白黒動画を用いるが、カラー画像では、RGB あるいは CMYK の 1 成分と見なすことができる。

[例 4.1] 図 4.1(a)の前半画像から(b)の後半画像に t=30 から 31 で切り換る 11×11 画素の白黒動画に対して、同時比較法と 2 つの時間差比較法を採用した NNP 特性を計算した。

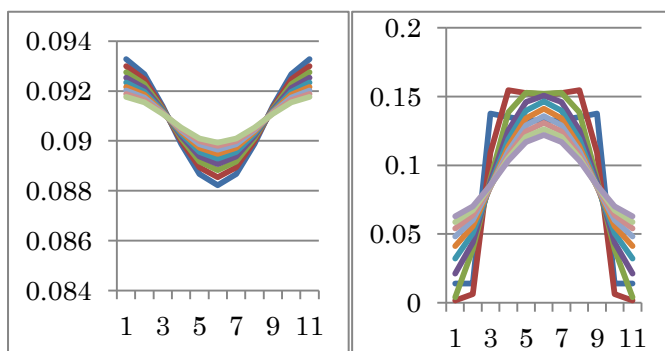


(a) 前半入力画像(t=1~30) (b)後半入力画像(t=31~)

図 4.1 時変入力白黒動画(原画)



(a) 同時比較(t=29~37) (b) 順時間差比較(t=29~37)



(c) 順時間差比較(一部抜粋(t=30~37)) (d) 逆時間差比較(t=29~37)

図 4.2 中央水平線上の出力濃度分布の時間変化

中央水平線上の出力濃度分布の時間変化を図 4.2 に示すが、順時間差比較法では、中央の黒相当部分において前半時の黒の反動として白味傾向が観察できる。一方で、同時、逆時間差比較法では、時間的な濃度逆転は見られない。順時間差比較法を採用した DAP では、カラー画像の 1 成分として見なすと補色残像と考えられる現象が観察でき、現象をよく説明できる。ところで、順時間差比較法の(i,j)比較においては、項目 j のデータを分母に 時間遅れた項目 i のデータを分子として比率計算が行われている。又、補色残像現象はその発生メカニズムからして、従来の 2 次元平面上での空間モードマッハ効果に対して、時間軸モードでの一方向性マッハ効果と言える。ここで、一方向性とは、時間の因果律により、切換後のみに発生するからである。

4.3 マッハバンド消去法

左半分が黒、右半分が白の白黒画像(10×10 画素)において、NNP 特性上の特定の過渡部において観察されるマッハバンドを消去する問題を以下に定式化する。

[マッハバンド消去問題]

$$\text{目的関数} : Z = \sum_{t \in T} P(t) \sum_{i=1, \dots, n} (x_i(t) - g_i)^2 \quad (4.5) \rightarrow \text{最小化}$$

$$\text{制約条件} : X(t+1) = D(n)^{-1} A_0 X(t) \quad t=0, 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

但し、 $A_0 = \{a_{ij}\}$ 、 $a_{i,i+1} = w_i/w_{i+1}$ 、 $i=1, 2, \dots, n-1$ 、 $a_{i,i-1} = w_i/w_{i-1}$ 、 $i=2, \dots, n$ 、その他は 0。

変数 : $W = \{w_i\}$ (画面の中央水平線上の濃度分布を変化)

データ : $X(0)$, $P(t) (t \in T)$

初期状態 $X(0)$ が与えられると、(4.6)により NNP 過渡特性が計算できる。4.1 節の議論より、不完全情報 DAP においては過渡特性が無視できず、さらに我々人間はその過渡特性を感知している。そこで、10×10 画素の画面の中央水平線上の濃度分布に注目して(従って、 $n=10$)、感知しているだろうと想定される時間区間 T に属する時点 $t \in T$ について、NNP 特性 $X(t) = \{x_i(t)\}$ と目標濃度 $G = \{g_i\}$ の間の 2 乗誤差和 $Z(t)$ を重み $P(t)$ で総和した目的関数値 $Z = \sum_{t \in T} P(t) Z(t)$ 、 $Z(t) = \|X(t) - G\|_2$ を、 $W = \{w_i\}$ を変化して最小化する。すなわち、感知想定区間 T 内で画面中央水平線上の濃度分布 $X(t)$ をなるべく目標分布 $G = \{g_i\}$ に近づけるためには、どのように画面の濃度分布 $W = \{w_i\}$ をデザインすればよいかの問題である。感知想定区間 T は人により異なりうるので、以下に 2 種類の T の設定下のマッハバンド消去問題の解を例示する。なおバンド状の入力画面の中央水平線上の濃度分布に注目することにより 1 次元の問題として単純化した。

図 4.3、図 4.4 において、十分時間経過後($t < 6-8$)では、出力濃度パターンは入力パターン **input** に漸近するが、これらのパターンは視覚的には(すぐには)感知されない。一方で、図 4.3 では $t=1$ の出力パターンが目標パターン **goal** に酷似し、図 4.4 では $t=1,2,3$ の出力パターンが目標パターン **goal** を近似する。これら $t=1-3$ 付近のパターンが錯覚として感知されるので、たとえ錯覚でもこれらの制御が肝要である。

〔例 4.2〕 $T=\{1\}$ (初期値 $x_i(0)=0.1$ の一定値, 重み $P(1)=1$)

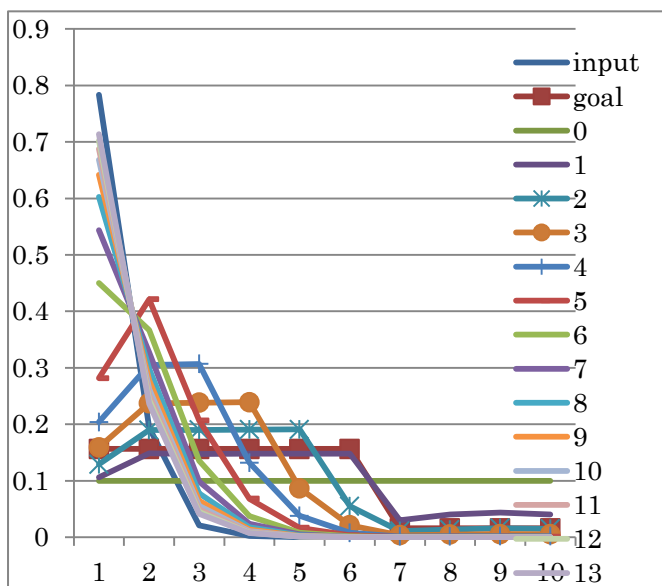


図 4.3 マッシュバンド消去問題〔例 4.2〕

〔例 4.3〕 $T=\{1,2,3\}$ ($x_i(0)=0.1$, 重み $P(1)=P(2)=P(3)=1$)

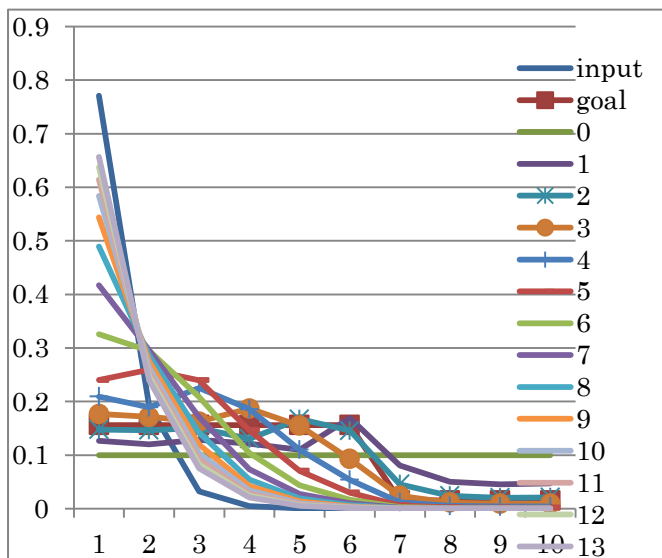


図 4.4 マッシュバンド消去問題〔例 4.3〕

5. 聴覚と NNP

有音周波数帯域の上下限部の周波数において強度がピークを持つ聴覚マッシュ効果については、文献[3]で指摘したが、追加の数値実験として、(i)有音帯域幅を変化した場合〔例 5.1〕、

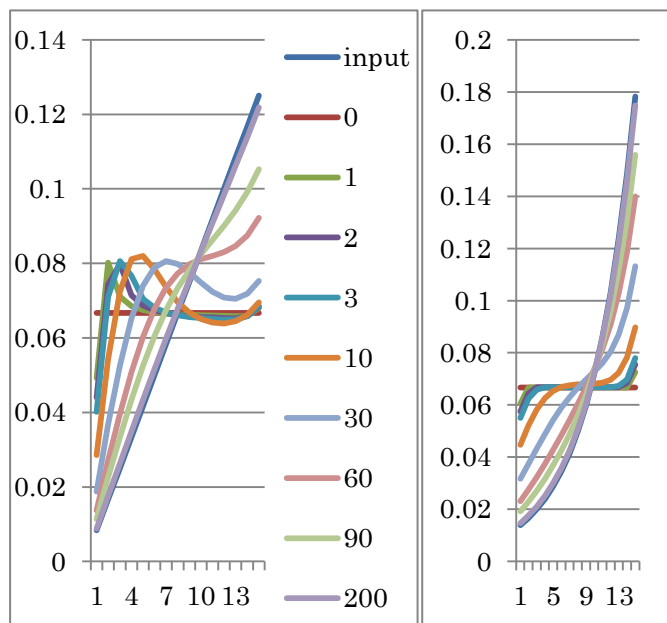
(ii)帯域内の強度を関数で変化した場合〔例 5.2〕、(iii)強度関数が周期的に変化する場合〔例 5.3〕、(iv)高雑音状態から一瞬にして低雑音状態に変化した場合(聴覚での補色残像)〔例 5.4〕、に関する計算例を考察する。

〔例 5.1〕 帯域幅変化実験

周波数離散化の程度に依存するが、帯域 $[f_{min}, f_{max}]$ の幅 $\Delta = f_{max} - f_{min}$ を減少していくと、 f_{min} と f_{max} での強度ピークが、中央部 $f_{center} = (f_{min} + f_{max})/2$ に集約され 1 つのピークとなる。

〔例 5.2〕 帯域内強度変化実験

図 5.1 に(a)線形増加、(b)指数増加の場合の NNP 特性を示す。両特性ともに十分時間経過後に($t > 60$)、入力特性 (**input**) に漸近するが(a)線形増加の場合に、 $t < 30$ の時間域で濃度ピークが観察できる。



(a)線形増加(横軸は周波数) (b)指数増加(横軸は周波数)

図 5.1 帯域内強度関数変化時の NNP 特性

〔例 5.3〕 帯域内強度周期変化実験

(離散隣接周波数で強弱を繰り返す入力信号を与えると、隣接相互にマッシュ効果が打ち消しあって、ほぼ原入力を NNP 出力特性として再現できる。適当な連続値周波数の間隔で、強弱を繰り返して配置すれば、入力波形の特徴が保存できる。

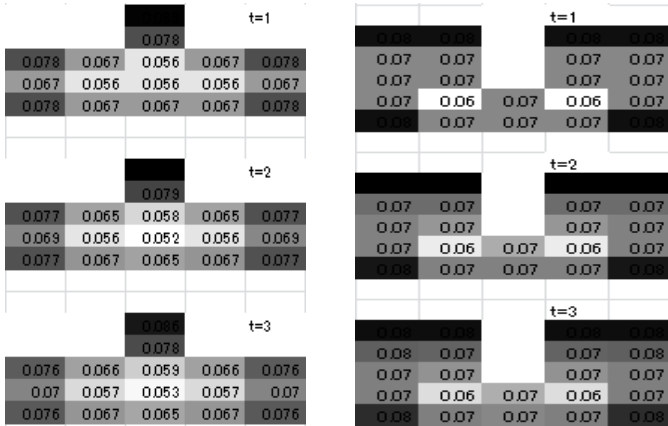
〔例 5.4〕 騒音から静寂への時変聴覚実験

視覚での補色残像(4.2 節)と同様に順時間差比較法を採用した計算実験により、広範囲の帯域に及ぶ騒音状態から、一瞬にしてその雑音を除去すると、その帯域に「嵐の後の静けさ(シーンと言う波打つ静けさ)」とでも言うべき音強度の低減時間特性が観察できる。なお、逆時間差、同時比較法では観察できなかった。

6. 触覚(皮膚感覚)と NNP

感覚受容器が領域表面に分布し、その感覚領域の境界上で何らかの刺激(温感、圧感等)を受けるときに、感覚領域内の受容器が受ける刺激強度の空間的かつ時間的分布の NNP 特性を計算する。

〔例 6.1〕突起状領域(例えば指)では先端部、凹状領域では底ではなく開口周辺部が敏感に感じる部位である。



(a)突起状領域

(b)凹状領域

図 6.1 突起状、凹状の皮膚感覚領域の NNP 計算

7. 味覚と NNP

味覚といえば、「味覚地図」を連想するが、最近の神経解剖学的知見では、その存在が否定されている(例えば[4])。すなわち、各基本味に反応する受容器は、舌のある特定部位に集中して分布せず、広く分布する。しかし、「味覚地図」という概念は約一世紀にわたって、その存在が信じられており、個人的に実験してみても、必ずしも否定できない。そこで、「味覚地図」を視覚におけるマッハ効果のような錯覚と捉え、以下に考察する。

『舌先に甘味受容器が多く存在するのではなく、逆に舌先における甘味受容器の分布が不均一と考え、その差分感覚により、その周辺部で特に甘味を強く感じる』と考える。

〔例 7.1〕図 7.1 に計算例を示す。舌の模式図は[4]より。

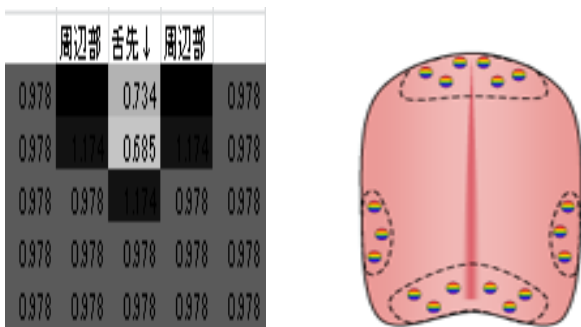


図 7.1 舌先における受容器(味蕾)の不均一分布にもとづく差分感覚により甘味の味覚感覚が発生する NNP 計算

8. 昆虫と植物のマッハ効果

8.1 昆虫のマッハ効果

「飛んで火に入る夏の虫」ということわざがあるが、火の明るさとの対比にもとづき、マッハ効果により周辺に生成された暗黒部を目指して飛んで来るとい説がある(例えば[5])。生物界の各個体において、強者は明指向(支配行動)性、弱者(弱虫)は暗指向(逃避行動)性を持つ、という仮説を前提とすれば、納得できる。特に昆虫のような原始的な動物では、視覚 DAP の感知想定反復回数は(本稿程度の離散化では、1~2 程度で)小さく、強いマッハ効果が出ると予想される。さらに、感知想定反復回数の大きさに依存して、正、負の走光性を統一的に解釈できる。

8.2 植物の向日性とマッハ効果

植物には向日性という性質が観察され、明るい方向へと向かう傾向を持つ。虫と同じく植物は原始的生物で、一般には弱者であり、マッハ効果にもとづき、太陽など、明るさの周辺の暗部を目指しているのが真実ではなかろうか?

9. おわりに

人間の五感の NNP モデルを考察した。特にカラー画像の補色残像現象を時変 $A(t)$ の NNP により解釈できた。同様の時間軸モードでの一方方向性マッハ効果は、聴覚においても「嵐の後の静けさ」として観察できた。嗅覚にも、「味覚地図」と名前が類似した「匂いマップ」が存在するが、匂いを感じるメカニズムの NNP モデル構築は今後の課題とする。また、本来は連続的な時空間での NNP モデルを離散化して数値計算を行うため、離散化近似由来誤差が発生してしまう。NNP 計算結果の解釈において本質的な現象を見極める必要がある。

参考文献

- [1] 留田慎一郎、篠原正明：表層 AHP・深層 AHP によるウェイト評価の比較検討、日本 OR 学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.186-187(2001.9).
- [2] 篠原正明、篠原健：不完全情報 AHP の諸問題、平成 26 年度 日本大学生産工学部 第 47 回学術講演会 (2014.12).
- [3] 篠原正明、篠原健：動的平均化プロセス DAP にもとづく神経ネットワークプロセス NNP、平成 26 年度 日本大学生産工学部 第 47 回学術講演会 (2014.12).
- [4] コーヒー科学研究室：5 つの味質を区別する仕組み <https://sites.google.com/site/coffeetambe/coffeescience/>...
- [5] 弘中満太郎、針山孝彦：昆虫が光に集まる多様なメカニズム、応動昆 Vol. 58 No. 2 pp.93-109 (2014).