

— A Theory of Graph Comprehension —

Steven Pinker

Artificial Intelligence and the Future of Testing, chapter 4, pp. 73-126. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, 1990.

・コンピュータ企業が提供するグラフ:

折れ線グラフ, 棒グラフ, 円グラフ, ベン図, フローチャート, 木構造, ノードネットワーク

・これら図やグラフは図を用いない表やリストと同じ情報を与えるが, 図的表現のほうがより理解しやすい(Carter, 1947; Culvertson & Powers, 1959; Schutz, 1961a, 1961b; Washburne, 1927)

・なぜ人は量的データを表現するときに表現方法を変えるのか, 認知科学的な理論あるいは法則について考えることは難しい

・この章の目的は, この説明されていない現象について, 系統立てられた方法で説明すること
特に, グラフの読み取り方について知ったとき何を知ったのか, グラフ読み取りの際にどのような認知的操作が行われているか

○WHAT IS A GRAPH

・数多くのグラフのバリエーションが存在する

・全てのグラフが読み手に与えるもの

n 個の数的な尺度について, n 組の値の集合

visual dimension の利用: 長さ, 場所, 明るさ, 形など

その dimension の相当する値: 特定の長さや位置など

・例

Fig. 4.1: 国名(nominal scale) と GNP(ratio scale)の 2 組, 棒の水平的な位置が国名, 棒の高さが GNP の値

Fig. 4.2: 月(ordinal scale) と温度 (interval scale) の 2 組, 扇形の位置によって月名, その明るさによって温度

・このような特徴づけのやり方を, 最も初めに提案したのは, Bertin(1967)だと思ふ

・Bertin は, グラフの読み手は 3 つのを行わなければならないと指摘

(1) "External Identification": 英数字のラベルを同定し, このグラフが現実世界のどのような事象について説明しているのかを読み取る

(2) "Internal Identification": グラフの図的構成要素を読み取り, visual dimension とグラフが示す概念的な変数との対応付け

(3) "Perception of Correspondence": それぞれの visual dimension の特定の値と, 概念的変数の値との対応付け

・この指摘から, グラフの読み手が行わなければならない 2 つのことが分かる

グラフから必要なオブジェクトを読み取ること (Fig. 4.1 ならば, 棒の横軸に沿った位置やその長さ, 棒の端の形などは必要ない)

グラフが示したい内容やその数的尺度と, グラフ内のオブジェクトとの対応づけ

・この前者における知識を“The Visual Description”, 後者における知識を“The Graph Schema”と呼ぶ

○THE VISUAL ARRAY

・グラフ情報は, 網膜上に 2 次元の強度パターンとして, 神経システムに伝達される.

・最初期における未加工の図的フォーマットをおおまかに“Visual Array”と呼ぶ

・これら情報は入手した生のデータのままなので, 当然ながらグラフ理解には遠い

○THE VISUAL DESCRIPTION

・本理論における用語定義

“Visual Description”: グラフ表現の構造的な記述

“Visual Encoding Processes”: visual array パターンから visual description を作るプロセス

・visual description については様々な記述方法が提案されている (Hinton, 1979; Marr & Nishihara, 1977; Miller & Johnson-Laird, 1976;; Palmer, 1975; Winston, 1975)

・本理論が採用した記述方法 (Fig. 4.3.)

1 つの変数の特徴についての記述: Circle(x), Convex(x), Flat(x), Horizontal(x), Small(x)

2 つの変数に関する述語: Above(x,y), Below(x, y), Higher(x,y), Top(x,y)

3 つあるいはそれ以上の変数に関する記述: Between(x,y,z)・・・x は y と z の間にある, In-line(x,y,z)

変数の数や値に関する記述: Area(x, α)・・・x は α 個の領域を持つ, Width(x, α), Location(x, α , β)

▼Constraining the Visual Description

・Fig. 4.3a のような visual array から, Fig. 4.3b, 4.3c のような visual description が作成される

・作成は与えられた状況によって異なるだろうが, 人間の視覚システムの働きに関する知識から, 3 つの大まかな原則を選んだ

(A) The Indispensability of Space(空間の不可欠性)

オブジェクトの空間的な特性は, 色や明るさ形とは異なる認知的な性質を持つことが知られている

Kubovy は, この性質を体系立てて説明し, 2 つの空間的な次元に関する特性として以下のように 4 つにまとめている

1. Perceptual Numerosity.

理論上グラフは様々な特性を持つことができるが、位置に関する性質を優先的に知覚し、位置的に離れたオブジェクトを別のものとして捉える

例えば、Fig.4.5a のような visual array があつた場合、Fig.4.5c よりも Fig.4.5b の方へと visual description を構成する

そして、その個々のオブジェクトの位置を表現する座標を対応付ける

2. Configural Properties.

Kubovy は、2つの空間的な次元という絶対に欠くことができない特性をグラフが持っていることを指摘しているが、縦横以外の非空間的な特性をもつグラフもある

しかし、Fig.4.6a において横方向の位置とともに高さが変わっていくことには気づきやすいが、Fig.4.6b の棒の方向と色という関係は気づきにくい

注意したいのは、関連する2つの次元というペアのうち一方が空間的なものになりやすいということである

例えば Fig.4.7 では、一つは縦方向の位置だとするともう一つの次元は明るさである

もし Fig.4.7b を与えられたら、明るさという次元以外については、すぐには気づかないだろう

3. Discriminability and Linearity. (区別できることと線形性)

明るさについて2つの box の差がわずかな場合には、その2つの値がほぼ同じように ($\text{lightness}(x,17)$, $\text{lightness}(y,17)$)とられることがある

Kubovy は、欠くことができない特性によって表現する方が2つの値の線形性を判断しやすいことを指摘

例えば、Weber の空間的な広さが0.04であり Stevens の広さが1.0のとする方が、他の物理的特性)を利用したよりも2つの値の線形性を判断しやすい

4. Selective Attention.

1.によって、オブジェクトに座標というユニークな値が対応付けられる。つまり、位置は、視覚的な情報にアクセスする際のインデックスとして働く

これは選択的注意の方法となる、Kubovy は、2次元の位置情報が、他の視覚的な特性よりも選択的であることを示している

例えば、位置的な情報無しに、形のような視覚的な特徴に注目することは難しい。

位置情報により領域を特定し、その領域にオブジェクトが存在するかどうかを確認することは容易である。

(B) Gestalt Laws of Grouping

画像を分解したり分類したりする過程に関する過程

ある対象が他の情報と区別される現象が、Gestalt 心理学者による発見された
彼らは情景や対象物に意味付けをする能力は生得的に組織化原理に基づいていると主張
the Gestalt Laws of Perceptual Organization: 近接(proximity), 閉鎖(closure), 類似(similarity)
類似を元にした分類: Fig.4.8a, Fig.4.8b, Fig.4.8c
Fig.4.9 は Fig.4.8a の, また別の分類方法

(C) Representation of Magnitude

精神物理学者の初期の議論では, visual description の中では, これら次元は連続する間隔尺度によって表現されていることが暗黙の仮説だった.

例えば $height(x, \alpha)$ などがそれに当たる.

しかし x の値が極端な場合には, $tall(x)$, $bright(x)$, $short(x)$ など特別な述語をつけることをこの理論では採用する.

そして, このような特殊な述語は高い頻度で現れることを仮定する

(D) Coordinate Systems (座標系)

複数の次元を伴うグラフの中で, 座標系はオブジェクトを表現するのに適切な手段である

座標系には, デカルト座標系(x, y)や二次元極座標系(r, θ), 円筒形極座標系(r, θ, z)等, 様々なものが存在する

Marr&Nishihara(1978)は, 形に関する記憶表象をオブジェクト中心の円筒形座標系で表現することを提案

この理論でも採用する

(1)原則的に形や位置は極座標系あるいはデカルト座標系で表現する(円筒形極座標系をスライスすると極座標系)

(2)異なる要素の位置は分けて表現する.

座標系の中でそのオブジェクトの値や広さは Fig.4.10 のように描くが, より明確にするために, 垂直方向と水平方向に分けて Fig.4.11 のように描く

○AN EXAMPLE

•Fig.4.12 とその visual description Fig.4.13

•top-down に, まず, L-shape と棒のグループ

L-shape は, 垂直方向の線と水平方向の線

棒グループは, 個々の棒に関して

場所的に近い場合は“near”, 座標系を構成する時の原点を“coordinate system”で表現

○CONCEPTUAL MESSAGES, CONCEPTUAL QUESTIONS

•Fig.4.12 で、気づく可能性があるもの

- (1)graphium は March にとても高くなっている
- (2)先行する月よりも March は高い
- (3)March から June にかけて段々と値が下がっている
- (4)Jan における値段は\$20/オンスだ
- (5)6 月の値段は x だ。(x は心的な量, 1 月の半分ほどなど)

•ここでは、1 組のペアを観察したものとすると

ペアの 1 つ目の要素:特殊な独立変数(March), その後特定のペア(March vs. February), あるいは範囲(最後の 4 ヶ月)に注目する

ペアの 2 つ目の要素:割合値, 絶対的な値(\$20/オンス), 相違(larger), 傾向(decreasing),あるいはレベル(high)

•グラフに変数名がついているならば「(6) $V1 = \text{months}$, $V2 = \text{price-of-graphium}$ 」のような conceptual message が生成される

•グラフの読み手は、グラフから抽出したい全ての情報を統合した時に、それぞれの V_n を特定のシンボルで置き換えることによってより経済的なメッセージ表現へ置き換える。

•“Conceptual Question”は読み手がグラフから抽出したいと考えている情報の断片

- (7) $V1 \text{ absolute-value} = \text{April}$, $V2 \text{ absolute-value} = ?$
- (8) $V1 \text{ range} = \text{January-February}$, $V2 \text{ trend} = ?$
- (9) $V1 \text{ absolute-value} = ?$, $V2 \text{ level} = \text{low}$

○THE GRAPH SCHEMA

•Fig. 4.14 は、理論のフローダイアグラム

•図の中で“?”で示された、まだ知られてない構成要素について説明する

(1) visual description 中の情報 \rightarrow conceptual message に変換する方法

(2) conceptual questions 中の情報 \rightarrow visual description 中の関連する情報にアクセスするプロセス

(3) どんなタイプのグラフが見せられているのかの認識方法

(1)と(2)はグラフの種類によっても異なる可能性がある(折れ線グラフ vs. 棒グラフ)

•以上の 3 つを達成するのに必要な構成知識を“graph schema”と呼ぶ

▼Schemas

•シンプルな電話番号のためのスキーマ Fig.4.15

番号の特定と、グルーピング, A-J のスロット(パラメータ)

•パラメータの概念による visual description の拡張.

▼Graph Schema: A Fragment

・我々が今必要としているのは、視覚情報を、conceptual message 中で発見される量的な情報に変換するデバイス(device)

・conceptual message の式から構成されるこのデバイスを“message flags”と呼ぶことにする

・Fig.4.16a において、点線でノードにつながれているのが flag

・このとき、読み手が、Fig.4.16b のような visual description に出会ったら、パラメータ $A \leftarrow 4, B \leftarrow 37$ を対応付けることができる

・そのため、次のような conceptual message を作ることができる

1: $V1 \text{ ratio-value} = 4, \quad V2 \text{ ratio-value} = 37$

▼A Bar Graph Schema

・Fig.4.17 は棒グラフを解釈するためのスキーマの重要な部分の Chunk を示している

・意図的に、Fig.4.13 の visual description に似せた

・L-shape(横軸線, 縦軸線), 棒, 座標系

・“IV”: Independent Variables, “DV”: Dependent Variables

・ノードにつながれている flag は固定ではなく、読み手によって様々に変化できる

例えば、Fig.4.18 のように、特定の棒の高さに関する特徴付けや、複数の棒の高さの傾向や 2 本の棒の高さ比較に関する flag など

○PROCESSES

・グラフ理解の間にどのようにして様々な構造が操作され、読まれるのかを説明

・グラフ情報を表現する構造にアクセスする 4 つの手続き

(1)MATCH process: 個別のグラフが特定のグラフタイプに属していることを認識する

長期記憶中の様々な種類のグラフスキーマから目の前にあるグラフに適用できるものを判断し、選択する

(2)message assembly process: 例示されたグラフスキーマのために conceptual message を作る

視覚情報から概念的な情報への変換を行うために使われる手続き

グラフスキーマ内を検索し、メッセージフラグが見つかったら、conceptual message を作る

記憶と処理手続きの限界から、全ての flag が conceptual message に変換されるわけではない flag の中でもより高い要求がなされるものについて conceptual message が作られる

(3)interrogation process: conceptual question を元に新しい情報を検索、エンコードする

conceptual message における“?”部分が埋められると、conceptual message となる

visual description 中で対応付けられない場合は、visual array が top-down に走査される

(4)inferential processes: conceptual message の記入のために数学的あるいは論理的な推論規則を適用する

conceptual message 作成のための様々なルール

値の増加の割合を知るために、ある値から他の値を引いたり、ある値で割ったりする

様々な推論規則が考えられるが、ここでは詳細について述べない

•Fig.4.19 は、以上をまとめたもの

○WHERE DO GRAPH SCHEMAS COME FROM?

•ここまでは具体的な棒グラフのグラフスキーマの知識について説明してきたが、理論はその他のグラフ(折れ線グラフ, 円グラフ, 絵グラフ)についても説明しなくてはならない

•人は“general graph schema”を用いて特定のタイプのグラフスキーマを作っているということを提案する

一般的に、グラフはどのように解釈をすべきなのかという知識を含んだもの

•Fig.4.20 はその概要. 重要なキーが3つある

(1)グラフはいくつかの視覚的特性を持ち、それぞれの視覚的特性は概念的な変数を記号化して表している

ある概念的な変数が n 個の値を持つならば、対応する視覚的特性も n 個の値を持つ

(2)一般に、特性の重要さの程度は、グラフフレームワークの一部分に中心化された座標系という観点から同定される

graph schema において、coordinate system を中心に考えることで注目すべき特性が分かる

(3)テキスト形式の構成要素は、オブジェクトの絶対的な値を特定する

グラフ中のテキスト(英数字)は、隣接するグラフ構成要素と結び付けられ、オブジェクトの絶対的な値として利用される

•人は、初めてのタイプのグラフに出会ったら、general graph schema を利用して特定の graph schema を作る

•そして、“pictorial content”, “associated”, “attribute”, “geometric figure”などを、新しいグラフの中で発見したものと取り替えなくてはならない

•新しいグラフのタイプが、general graph schema と類似しているならば置き換えは容易であるし、高次の述語(descending-staircase)の利用も可能である

•しかし、似ていないならば高次述語の利用どころか、基本的な述語置き換えも失敗する可能性がある

•それでは、そのような general graph schema はどこから手に入れたのだから?

•この質問に対して答えることは意味深いだが、答えはまだ不透明である

一つの考えは、複数のグラフについて、具体的な読み方を明示的に教えられたから

だがこの考えは、学校で習う非常に少数のグラフ事例から一般化する方法についての疑問を

生み出す

・最も深い答えとしては、多くの抽象的な概念は、最初から人間に備わっているという考え方である

(see Clark, 1973; Cooper & Ross, 1975; Jackendoff, 1978; Lakoff & Johnson, 1980; Talmy, 1978)