単純型細胞のガボールフィルタ空間特性を取り入れた視差検出法

正員 池田 直人 (神戸大学)

正員 赤澤 堅造 (神戸大学)

Disparity Detection Method with Spatial Gabor Filter Characteristic
of Simple

Masato Ikeda, Member, Kenzo Akazawa, Member (Kobe University)

The purpose of this paper is to construct a disparity detection method based on the spatial characteristic of simple cells in the visual cortex and to evaluate its availabilities for the stereopsis. The receptive fields of simple cells are approximated by two-dimensional spatial filters described with Gabor function. This filter is referred to as Gabor filter, which selectively responds of to stimulus patterns with specific spatial frequency and phase.

The principle of the disparity detection is as follows. When input images are given, a pair of the Gabor filters which have a certain phase difference show the maximum output among the filters. The phase difference between the right and left Gabor filters is approximately proportional to the disparity.

The disparity is calculated in the following three steps. First, the left and the right images are spatially filtered with a Gabor filter and the value of phase differences is calculated at each pixel. Second, the phase differences are calculated at several spatial frequencies of Gabor filter. Finally, a unique disparity at each pixel is obtained from a weighted sum of these phase differences, and spatial profile of the disparities in adjacent pixels is made smooth.

キーワード：単純型細胞, ガボールフィルタ, 位相差

1. ま え が き

対象物体の3次元形状を知るための、両眼立体視に関する研究は、盛んに行われている。そして、立体視を行うための視差検出については、様々な手法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、視差検出を独立した視覚情報処理と位置付けるのではなく、特徴抽出、物体認識を行う視覚システムの一部としての視差検出法が望まれており、未だそのような手法はない。

一方、生体において、立体視は容易に行われており、特徴抽出や物体認識も同時に行われている。そこで、生体の視覚情報処理機能を参考にすれば、特徴抽出と視差検出とを同時に行うことのできる視覚システムの開発が可能となるであろう。網膜に与えられた視覚情報は、網膜から外側膝状体を経て、大脳皮質第一次視覚野(V1野)に伝えられる。V1野には、単純型細胞と呼ばれる細胞が存在し、この細胞により、視覚情報の基本的な処理が行われる。筆者らは、この単純型細胞の受容野の空間特性を参考にした視覚モデルを作成し、特徴抽出、パターン認識の性能を調べ、人の顔画像における目の位置検出が可能であることを示した⁽³⁾。それはガボールフィルタ特性を利用したものである。

そこで、本研究では、単純型細胞のガボールフィルタ空間特性を取り入れた視差検出法を提案し、その有用性を示すことを目的とする。

単純型細胞の受容野の空間特性は、2次元のガボール関数で記述できる⁽⁴⁾。2次元のガボール関数を空間フィルタとして用いたものに、ガボールフィルタがある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ガボールフィルタは、特定の位相、周波数の入力に対して大きな出力を示す。本手法では、このガボールフィルタを用いた視差検出法を提案する。

視差は対応する点を中心とした局所領域における、左右の入力画像での位置ずれの差として表される。入力画像が与えられると、対応する局所領域について最大の出力を示すガボールフィルタの位相は、左右で異なる。このとき、左右のガボールフィルタの位相差は、視差に比例した値を示す。これが本視差検出法の原理である。

本手法では、まず画像上の各点における最大出力を示すガボールフィルタの左右での位相差を計算する。この位相差をガボールフィルタの周波数ごとに求め、視差を検出する。次に、周波数ごとに検出した複数の視差を結合することにより、各点ごとに単一の視差を算出する。最後に、画像上の局所領域において、平滑化を行う。

2. 視差検出法

〈2・1〉 ガボールフィルタ 本手法では、2次元のガボール関数を空間周波数フィルタ（以下、ガボールフィルタと呼ぶ）として用いる。ガボール関数とは、正弦波にガウス関数を乗じた形で表される。位置 $\vec{x}_0$ に中心をもつ2次元のガボールフィルタを以下の式で表す。

$$G_{\alpha, f_0, \phi}(\vec{x} - \vec{x}_0) = \exp\left(-\frac{\vec{k}^2 \cdot (\vec{x} - \vec{x}_0)^2}{2\pi^2}\right) \cos(\vec{k} \cdot (\vec{x} - \vec{x}_0) - \phi) \quad (1)$$

$$\vec{k} = 2\pi f_0(\cos \alpha, \sin \alpha) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α は最適方位、 f_0 は最適周波数、 ϕ は位相を表す。

ガボールフィルタの出力は、入力画像と2次元ガボール関数との畳み込み積分により得られる。出力は入力に依らず $1/f_0^2$ に比例した値となるので、係数 k^2/π^2 により正規化を行う。ここで、入力画像を $I(\vec{x})$ とすると、位置 $\vec{x}_0$ に中心をもつガボールフィルタの出力 $O_{\alpha, f_0, \phi}(\vec{x}_0)$ は、下式で表される。

$$O_{\alpha, f_0, \phi}(\vec{x}_0) = \frac{k^2}{\pi^2} \int I(\vec{x}) G_{\alpha, f_0, \phi}(\vec{x} - \vec{x}_0) d\vec{x} \quad (3)$$

以降、位置 $\vec{x}_0$ における左のガボールフィルタの出力を $O_{\alpha, f_0, \phi}^L(\vec{x}_0)$ 、右のガボールフィルタの出力を $O_{\alpha, f_0, \phi}^R(\vec{x}_0)$ と表す。

〈2・2〉 位相ユニット 単純型細胞は、ガボール関数で近似したときの位相が 0 から 2π [rad] まで一様に分布するという生理学知見が得られている。本手法では、最適方位、周波数が等しく、位相が $\pi/4$ [rad] ごとに異なる8個のガボールフィルタを、1組の画像処理ユニットとして用いる（以下、位相ユニットと呼ぶ）。位相ユニットの出力（以下、位相ユニット出力と呼ぶ）は、各ガボールフィルタの出力を成分とする8次元のベクトルとなる。よって、位置 $\vec{x}_0$ における、左右の位相ユニット出力 $O_{f_0}^L(\vec{x}_0)$ 、 $O_{f_0}^R(\vec{x}_0)$ は以下の式で表せる。

$$O_{f_0}^L(\vec{x}_0) = \{O_0^L(\vec{x}_0), \dots, O_{\phi}^L(\vec{x}_0), \dots, O_{7\pi/4}^L(\vec{x}_0)\} \quad (4)$$

$$O_{f_0}^R(\vec{x}_0) = \{O_0^R(\vec{x}_0), \dots, O_{\phi}^R(\vec{x}_0), \dots, O_{7\pi/4}^R(\vec{x}_0)\} \quad (5)$$

但し、 $O_{\phi}^L(\vec{x}_0) = O_{\alpha, f_0, \phi}^L(\vec{x}_0)$ 、 $O_{\phi}^R(\vec{x}_0) = O_{\alpha, f_0, \phi}^R(\vec{x}_0)$ である。図1に示すように、位相ユニットの各フィルタの出力は、位相 ϕ に関して正弦波となる。これは、入力に依存しない特性である。したがって、ある入力を与えられたとき、左右の位相ユニットにより2組の正弦波 $A \sin(\phi+a)$ 、 $B \sin(\phi+b)$ が作られる。その位相差 $(a-b)$ を $\Delta\Phi_{f_0}(\vec{x}_0)$ とする。位相差 $\Delta\Phi_{f_0}(\vec{x}_0)$ は、ベクトルの内積の公式により、以下のように計算できる。

$$\Delta\Phi(\vec{x}_0) = \cos^{-1} \left(\frac{O_{f_0}^L(\vec{x}_0) \cdot O_{f_0}^R(\vec{x}_0)}{\|O_{f_0}^L(\vec{x}_0)\| \|O_{f_0}^R(\vec{x}_0)\|} \right) \dots (6)$$

ここで、“ $\cdot$ ” はベクトルの内積、 $\| \cdot \|$ はノルムを表す。

図1 左右のユニット出力の比較

Fig. 1. Comparison of outputs of phase units.

図2 位相差と視差の関係

Fig. 2. Relation of phase difference and disparity.

〈2・3〉 位相差 $\Delta\Phi(\vec{x}_0)$ と視差の関係 位相ユニット出力間の位相差 $\Delta\Phi(\vec{x}_0)$ と視差の関係について説明する。図2に示すように、周波数 f_0 [cycles/pixel] の正弦波状の入力（1次元）が与えられた場合を考える。このとき、位置 x_0 を中心とする局所領域において、左右の入力画像には、位置ずれが生じている。したがって、最大の出力を示すガボールフィルタの位相 ϕ は左右で異なる。このときの視差を $\Delta d(x_0)$ [pixels]、左右のガボールフィルタの位相差を $\Delta\phi(x_0)$ で表す。ここで、 $\Delta d(x_0)$ が、正弦波の1周期、すなわち $1/f_0$ [pixels] で与えられたと仮定すると、ガボールフィルタの位相差 $\Delta\phi(x_0)$ は近似的に 2π [rad] となる。したがって、以下の近似式が得られる。

$$\Delta d(x_0) : \frac{1}{f_0} \approx \Delta\phi(x_0) : 2\pi$$

$$\Delta d(x_0) \approx \frac{\Delta\phi(x_0)}{2\pi f_0} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、(6) 式において求めた位相差 $\Delta\Phi(\vec{x}_0)$ は $\Delta\phi(x_0)$ と等価と考えられ、以下の式が成立する。但し、ガボールフィルタの最適周波数を f_0 に設定する。

$$\Delta d(\vec{x}_0) \approx \frac{\Delta \Phi(\vec{x}_0)}{2\pi f_0} \dots\dots\dots (8)$$

〈2・4〉 入力空間周波数を考慮した視差の推定 視差を算出するための(8)式は、入力画像の空間周波数とガボールフィルタの最適周波数 f_0 が等しい場合に成立する。実際の入力画像を考えると、局所領域の入力においては、一般的に単一の周波数ではなく、ある帯域をもった信号と考えることができる。したがって、視差の推定ではこの分布を考慮する必要がある。推定の基本は次の通りである。

ある点 $\vec{x}_0$ を中心とする局所領域について、ガボールフィルタの最適周波数 f_0 を種々に変化させ、(8)式により視差 $\Delta d(\vec{x}_0)$ を算出する。これを改めて、 $\Delta d(\vec{x}, f_0)$ とする。次式の荷重平均により、推定視差 $\Delta d'(\vec{x})$ を求める。

$$\Delta d'(\vec{x}) = \frac{\sum_{f_0} \Delta d(\vec{x}, f_0) \times w_1(f_0)}{\sum_{f_0} w_1(f_0)} \dots\dots\dots (9)$$

荷重 $w_1(f_0)$ は次の考えに基づいて決定する。基本は、入力信号に含まれる周波数成分の大きな視差に対して重みを大きくするというものである。ガボールフィルタは、帯域通過型の周波数特性をもつので、入力の周波数とガボールフィルタの最適周波数 f_0 が一致するとき、出力は大きくなる。そこで、荷重として左右の位相ユニットの出力(ノルム)を用いる。

$$z = \|O_{f_0}^L(\vec{x}_0)\| + \|O_{f_0}^R(\vec{x}_0)\| \dots\dots\dots (10)$$

$$w_1(f_0) = \begin{cases} z & (z \geq \Theta_1) \\ 0 & (z < \Theta_1) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 Θ_1 は閾値を表す。位相ユニット出力が小さいとき、その最適周波数によって求める視差は、誤差を含んでいる可能性が大きいので、荷重を 0 としている。

〈2・5〉 入力空間周波数を考慮した平滑化 2 枚の入力画像から 3 次元形状を知ることは、左右の画像の対応を取らなければならない、不良設定問題となる。この問題を解決するために、奥行きに関する物理的な法則を拘束条件として用いる。本手法では、Marr ら⁽¹³⁾の報告した「視差は物体の境界部以外では滑らかに変化する。」という条件を用いる。

本手法では、画像上の各点で独立に視差を検出する。したがって、雑音などにより隣接する点において、検出した視差が大きく異なる可能性をもつ。そこで、検出した視差に対して、エッジ部以外の領域では、視差が滑らかに変化するように、平滑化を行う。平滑化の方法として、重み付き局所平滑化を用いる。位置 $\vec{x}_0$ を中心とする平滑化を行う領域を $S(\vec{x}_0)$ とし、平滑化後の視差 $\Delta d_m(\vec{x}_0)$ を次式により求める。但し、位置 $\vec{x}$ において検出した視差を $\Delta d'(\vec{x})$ とする。

$$\Delta d_m(\vec{x}_0) = \frac{\sum_{\vec{x} \in S(\vec{x}_0)} \Delta d'(\vec{x}) \times w_2(\vec{x})}{\sum_{\vec{x} \in S(\vec{x}_0)} w_2(\vec{x})} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $w_2(\vec{x})$ は、点 $\vec{x}$ において検出した視差 $\Delta d'(\vec{x})$ に対する重みを示す。以下、重み $w_2(\vec{x})$ の計算方法について説明する。

$w_2(\vec{x})$ は、(9)式により推定した視差 $\Delta d'(\vec{x})$ と種々の最適周波数 f_0 を用いて検出した視差 $\Delta d(\vec{x}, f_0)$ の比較、および境界部か否かの状況を反映する左右の位相ユニット出力の比較により求める。

$$w_2(\vec{x}) = \frac{\sum_{f_0} W_{f_0}(\vec{x})}{\sum_{f_0} W_{f_0} + \sum_{f_0} W_{f_0}(\vec{x}) |\Delta d'(\vec{x}) - \Delta d(\vec{x}, f_0)|} \dots\dots\dots (13)$$

まず、検出した視差 $\Delta d(\vec{x}, f_0)$ の信頼性が高い ($\Delta d(\vec{x})$ の値に近い)ほど、 $w_2(\vec{x})$ は 1 に近づく。 $\Delta d(\vec{x}, f_0)$ が $\Delta d(\vec{x})$ と大きく異なるとき、 $w_2(\vec{x}) < 1$ となる。次に、 $W_{f_0}(\vec{x})$ は(14)、(15)式で与えられるものである。視差の境界部では大きく、連続部では小さな値となるように設定している。 $W_{f_0}(\vec{x})$ が大きいときは、 $w_2(\vec{x})$ も大きくなる。

$$q = \min \left[\frac{\|O_{f_0}^L(\vec{x})\|}{\|O_{f_0}^R(\vec{x})\|} \text{ or } \frac{\|O_{f_0}^R(\vec{x})\|}{\|O_{f_0}^L(\vec{x})\|} \right] \dots\dots\dots (14)$$

$$W_{f_0}(\vec{x}) = \begin{cases} q & (q \geq \Theta_2) \\ 0 & (q < \Theta_2) \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 Θ_2 は閾値を表す。エッジなどの境界部、あるいはノイズの混入があるとき、左右の位相ユニットの出力は大きく異なる。このとき、 $W_{f_0}(\vec{x})$ は 1 よりも小さな値となる。一方、物体の境界部以外では、左右の入力画像には位置ずれが生じていても、局所領域については、階調値や空間周波数成分は、ほぼ等しくなる。したがって、左右の位相ユニットの出力はほぼ同じ大きさとなり 1 に近い値を示す。

3. 検出結果

本手法を実際の入力画像に対して適用した結果について説明する。入力画像として、ランダムドットステレオグラム入力、正弦波入力を用いた。ここで、検出に用いたガボールフィルタのパラメータを以下にまとめる。

$$\alpha = 0 \text{ [rad]}$$

$$f_0 = \left\{ \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16} \right\} \text{ [cycles/pixel]}$$

$$\phi = \left\{ 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4} \right\} \text{ [rad]}$$

また、入力画像の大きさを 800×800 [pixels] とした。以下では、各入力に対する検出結果、および結果に対する考察を述べる。

〈3・1〉 ランダムドットステレオグラム入力 図 3 にランダムドットステレオグラム入力の一例を示す。ランダムドットステレオグラムの中央部 600×600 [pixels] に視差 1 [pixel]、 200×200 [pixels] に視差 2 [pixels] を与え、

図3 ランダムドットステレオグラム入力
Fig. 3. Example of random-dot stereogram.

図4 検出結果
Fig. 4. Example of estimated disparities.

検出を行った。

図4(a)に検出結果の一例をグレースケール256階調で示す。最も視差の小さい点を0、最も大きい点を255で表す。また、図4(b)に、検出結果を1次元で示す。図4に示すように、視差を比較的正確に検出することができた。ランダムドットステレオグラムは、広い範囲に周波数の成分を含む。入力周波数成分の中にフィルタの最適周波数と等しい成分が含まれていると、その成分については(8)式が成立し、全体としては小さい誤差で視差を検出することができた。

〈3・2〉正弦波入力 図5に正弦波入力の一例を示す。入力画像の中央部(400×400 [pixels])に視差1 [pixel]を与えた。但し、正弦波の周波数は1/16 [cycles/pixel]と

図5 正弦波入力

Fig. 5. Example of sinusoidal gratings.

図6 検出結果

Fig. 6. Example of estimated disparities.

した。

図6(a)に検出結果をグレースケール256階調で示す。最も視差の小さい点を0、最も大きい点を255で示す。また、図6(b)に、検出結果を1次元で示す。

図6に示すように、ランダムドットステレオグラム入力と同様、1 [pixel]と正しく検出できた。これは、正弦波の周波数がガボールフィルタの最適周波数 f_0 と等しいためである。

つぎに、様々な周波数の正弦波入力を視差1 [pixel]で与えたときの、正弦波の周波数と検出誤差の関係を示す(図7)。入力の周波数が $f = 1/16$ [cycles/pixel]より低いとき、検出誤差は大きな値を示した。これは、ガボールフィルタの最適周波数が $f_0 = 1/16$ [cycles/pixel]より低いものを用意していないためである。入力の周波数が1/16 [cycles/pixel]より高いとき、最大検出誤差は18%となった。

4. 検 討

〈4・1〉検出精度 本手法の検出精度に関する検討を行った。まず、位相差と視差の関係について考える。図2

図7 様々な周波数の正弦波に対する検出結果

Fig. 7. Relation of input frequency and absolute error of estimated disparities.

において、視差が $\Delta d(x_0) = 1/f_0$ [pixels] で与えられたとき、位相差は $\Delta\phi(x_0) \approx 2\pi$ [rad] と近似値となる。これは、ガボール関数が正弦波にガウス関数を掛けた形をしているためである。したがって、(7)、(8)式は近似式となり、位相差から視差への変換において、検出誤差が生じる。

(8)式は入力周波数をガボールフィルタの最適周波数 f_0 で近似している。したがって、入力周波数とガボールフィルタの最適周波数が異なる場合、検出誤差が生じる。ここで、図8に視差1 [pixel]の正弦波入力に対し、3種類の最適周波数のガボールフィルタを用いて検出した結果をそれぞれ示す。横軸は正弦波入力の周波数、縦軸は検出誤差、および位相ユニット出力の大きさを示す。図8に示すように、ガボールフィルタの最適周波数が正弦波の周波数に等しい場合、検出誤差は0 [pixels]となった。また、そのときの位相ユニット出力は、最大値を示した。しかし、ガボールフィルタの最適周波数が正弦波の周波数から離れるにしたがって、検出誤差の増大、および位相ユニット出力の減少が見られた。以上のように、周波数成分が未知の入力画像に対しては、最適周波数ごとに検出誤差が生じる。したがって、結合後の視差にも、その影響により検出誤差が生じた。また、視差の結合時において、位相ユニット出力と検出誤差を線形の関係と近似した。したがって、視差の結合時においても検出誤差が生じていることがわかった。

〈4・2〉顔画像への試用 本手法を、撮影した顔画像に試用した。入力画像を図9に示す。入力画像は 120×120 [pixels]、グレースケール256階調とした。背景を視差0 [pixels]として(図中×印)、撮影を行った。また、図10に検出結果をグレースケール256階調で示す。

図10に示すように、鼻近傍で最も視差が大きく、次に額、目と顔の凹凸に沿った順に視差が検出できた。しかし、顔以外の点では、ガボールフィルタが十分大きな値を出力しないため、検出が行えなかった。

本手法で用いたガボールフィルタは、コントラストに依存した出力を示す。したがって、背景や衣服など、コントラストの低い点では、ガボールフィルタは十分に出力しな

図8 最適周波数ごとの検出結果

Fig. 8. Relations of input frequency and errors of estimated disparities on each frequency channel and output of phase unit.

図9 入力画像

Fig. 9. Input images.

い。また、顔の頬などの領域は、局所的に見るとコントラストが低いため、高い最適周波数をもつガボールフィルタの出力は小さくなる。低い最適周波数をもつガボールフィルタにより検出を行わなければならない、精度良く検出を行うことができなかった。また、本論文では、ガボールフィルタの最適方位は、 $\alpha = 0$ [rad]の1通りとした。したがって、口などの水平方向の成分を有する領域については、ガボールフィルタの出力が小さいため、検出を行うことができなかった。

以上より、本手法を顔画像に適用するためには、背景等にもコントラストを有した入力画像を用いる必要がある。ま

図 10 検出結果

Fig. 10. Example of estimated disparities.

た, 入力画像に含まれる周波数成分について既知であれば, 用意する最適周波数パラメータを決定することが可能であり, 精度良く検出が行えるだろう。

5. む す び

本研究では, 単純型細胞の空間特性を取り入れた新しい視差検出法を提案し, その有用性を示した。結論を以下に要約する。

- (1) ランダムドットステレオグラム及び様々な周波数の正弦波入力に対して視差が正しく検出できることを示した。
- (2) 検出誤差及び顔画像への適用について検討を行い, 本手法の基本的な特性を明確にした。

(平成 10 年 1 月 26 日受付, 同 10 年 9 月 28 日再受付)

文 献

- (1) Sanger, T. D., "Stereo disparity computation using Gabor filters," *Biol. Cybern.*, **59**, pp. 405-418, (1988).
- (2) Nomura, M., Matsumoto, G., and Fujiwara, S., "A binocular model for the simple cell," *Biol. Cybern.*, **63**, pp. 237-242, (1990).
- (3) 川上 公一郎, 松隈 賢作, 赤澤 堅造, 加藤 和範, 浜田 隆史, "単純型細胞の特性を用いた目の領域抽出法," 信学技報, **NC95-41**, pp. 95-102, (1995).
- (4) Jones, J. P., Palmer, L. A., "The two-dimensional spatial structure of simple receptive fields in cat striate cortex," *J. Neurophysiol.*, **58**, pp. 1187-1211, (1987).
- (5) Gabor, D., "Theory of communication," *J. Inst. Elec. Engin.*, **93**, pp. 429-457, (1946).
- (6) Marčelja, S., "Mathematical description of the responses of simple cortical cells," *J. Opt. Soc. Am.*, **70**, pp. 1297-1300, (1980).
- (7) 福島 邦彦, "神経回路と情報処理," 朝倉書店, (1989).
- (8) Field, D. J., Tolhurst, D. J., "The structure and symmetry of simple-cell receptive-field profiles in the cat's visual cortex," *Proc. Roy. Soc. London B: Biol. Sci.*, **228**, pp. 379-400, (1986).
- (9) DeAngelis, G. C., Ohzawa, I., and Freeman, R. D., "Spatiotemporal organization of simple-cell receptive fields in the cat's striate cortex. I. General characteristics and postnatal development," *J. Neurophysiol.*, **69**, pp. 1091-1117, (1993).
- (10) Ohzawa, I., DeAngelis, G. C., and Freeman, R. D., "Stereo-

scopic depth discrimination in the visual cortex: Neurons ideally suited as disparity detectors," *SCIENCE*, **249**, pp. 1037-1040, (1990).

- (11) Ohzawa, I., DeAngelis, G. C., and Freeman, R. D., "Encoding of binocular disparity by simple cells in the cat's visual cortex," *J. Neurophysiol.*, **75**, pp. 1779-1805, (1996).
- (12) Poggio, T., "Vision by man and machine," *Sci. Am.*, Vol. **250**, No. 4, April, pp. 106-116, (1984).
- (13) Marr, D., Poggio, T., "A computational theory of human stereo vision," *Proc. Roy. Soc. London B: Biol. Sci.*, **204**, pp. 301-328, (1979).
- (14) 川人 光男 他, "視覚と聴覚," 岩波書店, (1994) pp. 1-87.

池 田 直 人 (正員) 1971 年 5 月 24 日生まれ。95 年神戸大学工学部計測工学科卒業。97 年神戸大学大学院自然科学研究科前期博士課程修了 (現在クボタ株式会社)。在学中初期視覚の神経回路モデルおよびその応用に関する研究に従事。

赤 澤 堅 造 (正員) 1943 年 2 月 20 日生まれ。71 年大阪大学大学院博士課程単位修得退学。同年大阪大学工学部助手, 講師, 助教授を経て, 90 年度神戸大学工学部教授。現在情報知能工学科にて, 筋運動制御系と視覚処理系の解析と応用, および生体信号処理に関する研究に従事。工博。