

並列ビジョンのための2次元座標変換回路

向井利春 石川正俊

東京大学 工学部 計数工学科

〒113 東京都文京区本郷7丁目3番1号

あらし

視覚フィードバックによって高速な制御を行なうためには、高速ビジョンの開発が必要である。そのためには並列処理によって処理速度を高める手法が有効であり、これまでに初期視覚的な処理を並列に行なう回路が各種提案されている。しかしフィードバックを行なうためには2次元パターン情報をそのまま用いることはできず、分布の特徴を表すフィードバックに適当な量を抽出しなければならない。また、その際にビジョンから見た作業座標系のような、非線形座標系での特徴量が計算できれば好都合である。そこで本報告では、パターンの総和と非線形座標系に関する1次モーメントを並列に計算する抵抗のネットワーク回路を提案する。この回路をLSI化することにより、高速でインテリジェントな視覚センサができる。

和文キーワード 視覚フィードバック, 高速ビジョン, 並列処理, 座標変換, 抵抗ネットワーク, インテリジェントセンサ.

Two-dimensional Coordinates Transform Circuit for Parallel Processing Vision

Toshiharu MUKAI and Masatoshi ISHIKAWA

Department of Mathematical Engineering and Information Physics,

Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo

Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

Abstract

In order to achieve high-speed control by visual feedback, it is necessary to develop high-speed vision systems. Parallel processing is useful for such high-speed vision, and many circuits which solve early vision problem by parallel processing were proposed. However, we can't use two-dimensional pattern information itself for feedback, so feature value has to be extracted. In addition, feature value on nonlinear coordinates, such as working coordinates obtained from a vision sensor, is very useful. In this report, we propose a resistive network circuit which extracts sum and first order moment of a input pattern on nonlinear coordinates. By making LSI based on this circuit, high-speed intelligent vision sensor will be developed.

英文 key words Visual feedback, High-speed vision, Parallel processing, Coordinates transformation, Resistive network, Smart sensor.

1 はじめに

視覚フィードバックによって高速な制御を行なうためには、高速ビジョンの開発が必要である。そのためには並列処理によるデータパラレルな処理を行なって処理速度を高める手法が有効である。これまでに、エッジ抽出やオプティカルフローの計算、表面の再構成及び両眼立体視などを行なうアナログ回路が各種提案^{1),2),3)}されている。また、Ishikawa et al.⁴⁾はLSI化の可能な簡単な機能を持つプロセッシングエレメントを $64 \times 64 = 4096$ 個並列に並べて局所的なパターン処理を行なえるシステムを試作し、2次元パターンのエッジ抽出や細線化、動物体の検出などをマイクロ秒のオーダーで実現した。

しかし、このような初期視覚的な処理だけでは、出力される情報がパターン情報であるため、そのままの形でフィードバック制御に利用することはできない。フィードバックを行なうためには2次元パターン情報をパターンの分布の総和や中心位置などといった、分布の特徴を表しなおかつ制御に必要な量に変換しなくてはならない。この計算を行なうのに2次元パターンをスキャンしていたのでは時間がかかってしまい、初期視覚的処理を行なう並列回路の高速性を活かすことができない。そこで図1に示すように並列処理回路から2次元パターン情報を直接並列に受けとり、分布の基本量を並列に高速計算できる回路が必要となる。

さらに、フィードバックを行なう際には画像の座標系ではなく、アクチュエータの存在する作業座標系でのパターン分布の基本量を計算できると好都合である。例えば図1のようなシステムでマニピュレータによる対象の操作に高速ビジョンによる視覚フィードバックを使いたい場合、並列ビジョンから見た作業座標系による分布の基本量を計算できる必要がある。この座標系は画像本来のデカルト座標系から非線形変換して得られる座標系になる。そこで、分布の基本量を計算する際に、任意の非線形な座標系での値を計算できるとよい。このようなことができればさらに、画像上の任意の点にマニピュレータの手先を持っていった時の関節角の値を直接計算したり、生物の網膜のように受容器が非一様に分布している場合の自然な座標系での基本量の値なども計算できる。

2次元デカルト座標系での総和と中心位置を計算できる回路は石川⁵⁾によって提案されている。また、1次元上の非線形座標系での総和と中心位置を計算できる回路が宇都木と石川⁶⁾によって提案され、1次元の組み合わせとして2次元回路が実現⁷⁾されている。そこで、本報告ではこれらの方法を発展させて、ある範囲内の任意の非線形座標系で

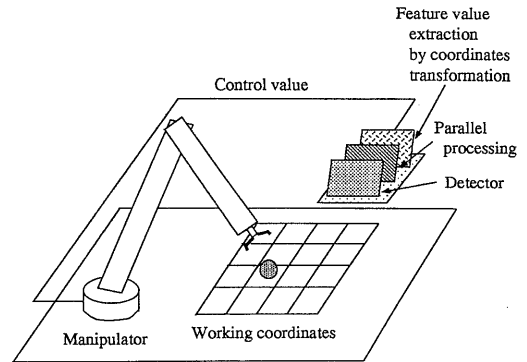


図1 並列ビジョンを用いた視覚フィードバック系

の2次元パターンの総和と中心位置を並列に計算できる新しい回路を提案する。この回路を並列ビジョンとともに集積化すれば、作業座標系での高速なフィードバックが可能となる。

2 測定原理

2.1 Greenの定理の拡張

測定原理では離散系に対するGreenの定理⁸⁾を拡張したものを使用する。本報告では2次元について考えるのであるが、説明の都合上まず1次元について説明する。

1次元上の点 i に $\alpha_i (i = 0, \dots, n+1)$ が割り当てられているとする。この α_i に対し、拡張された2階差分 $\tilde{\nabla}_i^2$ を

$$\tilde{\nabla}_i^2 \alpha_i = f_i(\alpha_{i+1} - \alpha_i) - f_{i-1}(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

と定義する。ただし f_i は $i = 0, \dots, n$ に対し定義されている値である。 $f_i \equiv 1$ のときは $\tilde{\nabla}_i^2$ は通常の2階差分と同じになる。1次元離散系に対するGreenの定理を拡張した以下のような定理が成り立つ。

定理1 点 $i (i = 0, \dots, n+1)$ に α_i, β_i が割り当てられている時、次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \alpha_i \tilde{\nabla}_i^2 \beta_i &= \sum_{i=1}^n \beta_i \tilde{\nabla}_i^2 \alpha_i \\ &+ f_n \alpha_n \beta_{n+1} - f_n \alpha_{n+1} \beta_n \\ &+ f_0 \alpha_1 \beta_0 - f_0 \alpha_0 \beta_1 \end{aligned} \quad (2)$$

(証明)

$$\begin{aligned}
& \text{(左辺)} \\
&= \sum_{i=1}^n \alpha_i \{f_i(\beta_{i+1} - \beta_i) - f_{i-1}(\beta_i - \beta_{i-1})\} \\
&= \sum_{i=2}^{n+1} f_{i-1} \alpha_{i-1} \beta_i - \sum_{i=1}^n f_i \alpha_i \beta_i \\
&\quad - \sum_{i=1}^n f_{i-1} \alpha_i \beta_i + \sum_{i=0}^{n-1} f_i \alpha_{i+1} \beta_i \\
&= \sum_{i=1}^n f_{i-1} \alpha_{i-1} \beta_i + f_n \alpha_n \beta_{n+1} - f_0 \alpha_0 \beta_1 \\
&\quad - \sum_{i=1}^n f_i \alpha_i \beta_i - \sum_{i=1}^n f_{i-1} \alpha_i \beta_i \\
&\quad + \sum_{i=1}^n f_i \alpha_{i+1} \beta_i + f_0 \alpha_1 \beta_0 - f_n \alpha_{n+1} \beta_n \\
&= \text{(右辺)} \qquad \qquad \qquad \text{(証明終り)}
\end{aligned}$$

2次元の場合に定理1を拡張する。ノード (i, j) ($i, j = 0, \dots, n+1$) に対して α_{ij} が割り当てられているとする。これに対して、拡張された離散系に対するラプラシアン $\tilde{\nabla}_{ij}^2$ を

$$\begin{aligned}
\tilde{\nabla}_{ij}^2 \alpha_{ij} &= g_{ij}(\alpha_{i,j+1} - \alpha_{ij}) - g_{i,j-1}(\alpha_{ij} - \alpha_{i,j-1}) \\
&\quad + h_{ij}(\alpha_{i+1,j} - \alpha_{ij}) - h_{i-1,j}(\alpha_{ij} - \alpha_{i-1,j}) \\
&\qquad \qquad \qquad (i, j = 1, \dots, n) \qquad (3)
\end{aligned}$$

と定義する。ここで g_{ij}, h_{ij} は $i, j = 0, \dots, n$ に対し定義されている値であり、これらが全て1のときは、 $\tilde{\nabla}_{ij}^2$ は通常の離散系に対するラプラシアンになる。

2次元の離散系に対するGreenの定理を上で定義した $\tilde{\nabla}_{ij}^2$ に対して拡張すると、次のような定理が得られる。

定理2 ノード (i, j) ($i, j = 0, \dots, n+1$) に α_{ij}, β_{ij} が割り当てられている時、次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \tilde{\nabla}_{ij}^2 \beta_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \tilde{\nabla}_{ij}^2 \alpha_{ij} \\
& + \sum_{i=1}^n (g_{in} \alpha_{in} \beta_{i,n+1} - g_{in} \alpha_{i,n+1} \beta_{in}) \\
& + \sum_{i=1}^n (g_{i0} \alpha_{i1} \beta_{i0} - g_{i0} \alpha_{i0} \beta_{i1}) \\
& + \sum_{j=1}^n (h_{nj} \alpha_{n,j} \beta_{n+1,j} - h_{nj} \alpha_{n+1,j} \beta_{nj}) \\
& + \sum_{j=1}^n (h_{0j} \alpha_{1j} \beta_{0j} - h_{0j} \alpha_{0j} \beta_{1j}) \qquad (4)
\end{aligned}$$

(証明) 1次元の場合と全く同様にして、(4)式の左辺を項別に展開し、添字の付け方を変更してまとめると右辺が得られる。 (証明終り)

2.2 2次元抵抗ネットワークによる0次及び1次元モーメントの検出

図2のような回路を構成する。ノード (i, j) ($i, j = 1, \dots, n$) に電流源が接続されていて、その電流を J_{ij} とする。この値が回路に対する入力であり、前段の並列処理系の出力である2次元パターン情報が並列に入力される。それぞれのノード間は抵抗により接続されてネットワークを構成しており、その結果実現されるノード (i, j) の電圧を V_{ij} とする。ノード (i, j) とノード $(i, j+1)$ をつなぐ抵抗のコンダクタンスを g_{ij} ($i = 1, \dots, n; j = 0, \dots, n$)、ノード (i, j) とノード $(i+1, j)$ をつなぐ抵抗のコンダクタンスを h_{ij} ($i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n$)とする。そして、回路の周辺のノードは全て接地されているとし、その結果ノード $(i, 0), (i, n+1), (0, i), (n+1, i)$ ($i = 1, \dots, n$)を流れる電流をそれぞれ $I_{i0}, I_{i,n+1}, I_{0i}, I_{n+1,i}$ とする。この値が回路の出力である。

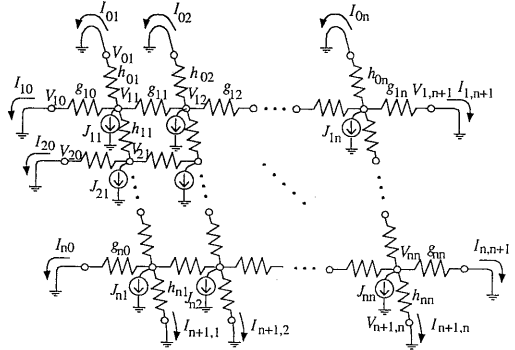


図2 2次元抵抗ネットワーク

画像のパターン分布の総和と中心位置を求めるためには、パターンの0次と1次元のモーメントがわかればよい。ノード (i, j) に割り当てられた非線形座標を (ξ_{ij}, η_{ij}) とすると、それらは

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n J_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_{ij} J_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \eta_{ij} J_{ij} \qquad (5)$$

と表される。これらの値を $I_{i0}, I_{i,n+1}, I_{0i}, I_{n+1,i}$ だけから求めることを考える。

まず、この回路のコンダクタンス g_{ij} , h_{ij} に対して $\tilde{\nabla}_{ij}^2$ を定義すると、各ノードに Kirchhoff の法則を適用することにより

$$\begin{aligned}\tilde{\nabla}_{ij}^2 V_{ij} &= g_{ij}(V_{i,j+1} - V_{ij}) - g_{i,j-1}(V_{ij} - V_{i,j-1}) \\ &\quad + h_{ij}(V_{i+1,j} - V_{ij}) - h_{i-1,j}(V_{ij} - V_{i-1,j}) \\ &= J_{ij}\end{aligned}\quad (6)$$

が得られる。そこで定理 2 で β_{ij} を V_{ij} で置き換え

$$\begin{aligned}V_{0i}, V_{n+1,i}, V_{i0}, V_{i,n+1} &= 0 \\ g_{i0}V_{i1} = I_{i0}, \quad g_{in}V_{in} &= I_{i,n+1} \\ h_{0i}V_{1i} = I_{0i}, \quad h_{ni}V_{ni} &= I_{n+1,i} \\ &\quad (i = 1, \dots, n)\end{aligned}\quad (7)$$

を用いると、

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} J_{ij} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_{ij} \tilde{\nabla}_{ij}^2 \alpha_{ij} \\ &\quad - \sum_{i=1}^n (\alpha_{i,n+1} I_{i,n+1} + \alpha_{i0} I_{i0}) \\ &\quad - \sum_{j=1}^n (\alpha_{n+1,j} I_{n+1,j} + \alpha_{0j} I_{0j})\end{aligned}\quad (8)$$

が得られる。

ここで $\alpha_{ij} \equiv 1$ とおくと

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n J_{ij} = - \sum_{i=1}^n (I_{i,n+1} + I_{i0} + I_{n+1,i} + I_{0i}) \quad (9)$$

より、0 次モーメントが得られる。 ξ_{ij}, η_{ij} に関する 1 次モーメントを $I_{i,n+1}, I_{i0}, I_{n+1,i}, I_{0i}$ から得るためには (8) 式で α_{ij} を ξ_{ij}, η_{ij} で置き変えた場合を考えて、右辺第 1 項を消すために

$$\begin{cases} \tilde{\nabla}_{ij}^2 \xi_{ij} = 0 \\ \tilde{\nabla}_{ij}^2 \eta_{ij} = 0 \end{cases} \quad (i, j = 1, \dots, n) \quad (10)$$

が成り立てば良い。これを満たすような g_{ij}, h_{ij} を求めるのであるが、(10) 式は $2n^2$ 個の連立方程式であり、一方変数は $2(n^2 + n)$ 個ある。つまり、変数の自由度が過ぎる。残りの $2n$ 個の方程式をどのように決めるかで g_{ij}, h_{ij} の値が変わってくるが、ここでは以下のような方法を用いる。

(10) 式を変形すると

$$\begin{cases} g_{ij} = N_{ij}^g / D_{ij}^g \\ \text{ただし} \\ N_{ij}^g = g_{i,j-1} \{ (\xi_{ij} - \xi_{i,j-1})(\eta_{i+1,j} - \eta_{ij}) \\ \quad - (\xi_{i+1,j} - \xi_{ij})(\eta_{ij} - \eta_{i,j-1}) \} \\ \quad + h_{i-1,j} \{ (\xi_{ij} - \xi_{i-1,j})(\eta_{i+1,j} - \eta_{ij}) \\ \quad - (\xi_{i+1,j} - \xi_{ij})(\eta_{ij} - \eta_{i-1,j}) \} \\ D_{ij}^g = (\xi_{i,j+1} - \xi_{ij})(\eta_{i+1,j} - \eta_{ij}) \\ \quad - (\xi_{i+1,j} - \xi_{ij})(\eta_{i,j+1} - \eta_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} h_{ij} = N_{ij}^h / D_{ij}^h \\ \text{ただし} \\ N_{ij}^h = g_{i,j-1} \{ (\xi_{ij} - \xi_{i,j-1})(\eta_{i,j+1} - \eta_{ij}) \\ \quad - (\xi_{i,j+1} - \xi_{ij})(\eta_{ij} - \eta_{i,j-1}) \} \\ \quad + h_{i-1,j} \{ (\xi_{ij} - \xi_{i-1,j})(\eta_{i,j+1} - \eta_{ij}) \\ \quad - (\xi_{i,j+1} - \xi_{ij})(\eta_{ij} - \eta_{i-1,j}) \} \\ D_{ij}^h = (\xi_{i+1,j} - \xi_{ij})(\eta_{i,j+1} - \eta_{ij}) \\ \quad - (\xi_{i,j+1} - \xi_{ij})(\eta_{i+1,j} - \eta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

となる。この式によると g_{ij}, h_{ij} は $g_{i,j-1}, h_{i-1,j}$ によって決まるので、

$$g_{i0} = h_{0i} \equiv 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (13)$$

とすると、図 3 のように順番に g_{ij}, h_{ij} を求められる。

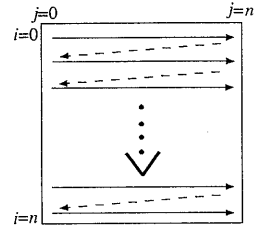


図 3 g_{ij}, h_{ij} を求める順番

2.3 実際の回路構成と考察

実際の回路では (8) 式の右辺の第 2 項以下 (周辺の電流値の和) も回路で行なう。そのためにまず

$$\begin{cases} \xi_{i0} = -1, \quad \xi_{i,n+1} = 1 \\ \xi_{ki} = -1 + \frac{2i}{n+1} \\ (i = 0, \dots, n+1; k = 0 \text{ or } n+1) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \eta_{0j} = -1, \eta_{n+1,j} = 1 \\ \eta_{jk} = -1 + \frac{2j}{n+1} \\ (j = 0, \dots, n+1; k = 0 \text{ or } n+1) \end{cases} \quad (15)$$

とおく。ここで座標を固定した周辺のノードは入力 J_{ij} が入らないため、固定しても回路の能力は変わらない。そして (10) 式を満たす g_{ij}, h_{ij} を求めると (8) 式は

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \xi_{ij} J_{ij} = \sum_{i=1}^n (I_{i0} - I_{i,n+1}) - \sum_{j=1}^n \left(-1 + \frac{2j}{n+1}\right) (I_{n+1,j} + I_{0j}) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \eta_{ij} J_{ij} = \sum_{j=1}^n (I_{0j} - I_{n+1,j}) - \sum_{i=1}^n \left(-1 + \frac{2i}{n+1}\right) (I_{i,n+1} + I_{i0}) \quad (17)$$

となる。この式の右辺の和の部分に、前節で説明した回路の原理を 1 次元の場合に適用したものを使う^{5),6),7)}。

図 4 のような回路を考える。この図で g_c は抵抗のコンダクタンスであり、全て同一の値である。定理 1 を使って前節と同様に考えると、1 次元の入力の総和と各点に -1 から 1 まで等間隔に座標 $x_i = -1 + 2i/(n+1)$ をわりふつた時の中心位置は

$$\sum_{i=1}^n J_i = -I_0 - I_{n+1} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i J_i = I_0 - I_{n+1} \quad (19)$$

と計算できる。

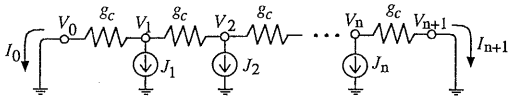


図 4 1 次元の抵抗ネットワーク

そこでこの 1 次元抵抗ネットワークを、図 5 のような電流入力電流源を介して 2 次元抵抗ネットワークの各辺に接続する。すると 2 次元パターンの入力の総和と非線形座標系に関する 1 次モーメントを出力する回路が図 6 のように構成できる。ただし図 6 の 1 次元抵抗ネットワークは図 4 の回路の両端に電流-電圧変換器を付け加えたもので、電圧を出力値として持つとする。

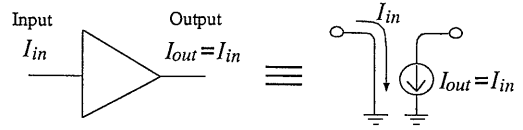


図 5 電流入力電流源

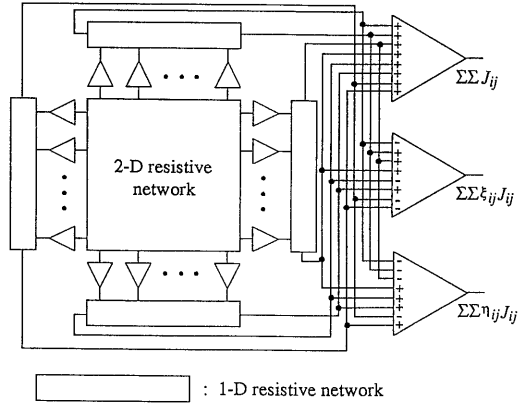


図 6 総和と 1 次モーメントを出力する回路

実際の回路を製作する場合には、抵抗値が負の値を持たないということが必要である。そのためには、(11) 式、(12) 式で、 $g_{ij} > 0, h_{ij} > 0$ が必要である。これは (ξ_{ij}, η_{ij}) 座標系のデカルト座標系からのずれが小さければ成り立つ。

(ξ_{ij}, η_{ij}) 座標系がデカルト座標系の場合には $g_{ij} = h_{ij} \equiv 1$ であるので、 (ξ_{ij}, η_{ij}) 座標系がデカルト座標系に近い場合は g_{ij}, h_{ij} も 1 に近い値をとる。このような回路は抵抗のレンジが狭いので、回路的に実現しやすい。

3 計算機シミュレーション

本報告で述べた回路の動作を確認するため、図 6 の回路の計算機シミュレーションを行なった。

非線形座標系を

$$\begin{aligned} \xi_{ij} &= (x_{ij} + 0.5x_{ij}y_{ij}^2)/1.5 \\ \eta_{ij} &= (y_{ij} + 0.5y_{ij}x_{ij}^2)/1.5 \\ \text{ここで} \\ x_{ij} &= -1 + \frac{2j}{n+1}, \quad y_{ij} = -1 + \frac{2i}{n+1} \\ &\quad (i, j = 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (20)$$

と仮定した。ただし $n = 9$ とした。また、周辺の座標の値は (14) 式, (15) 式に従った。このとき、非線形座標系の様子を図 7 に、それから求めた g_{ij}, h_{ij} の値を図 8 に示す。

2 次元の回路では入力 J_{ij} に対する電圧 V_{ij} を回路の方程式を Gauss-Seidel 法で解くことによって求め、その値から $I_{i0}, I_{i,n+1}, I_{0i}, I_{n+1,i} (i = 1, \dots, n)$ を求めた。1 次元の回路でも同様のことを行なった。その結果、提案した回路を用いることにより、理論どおりに総和と 1 次元モーメントが求められた。

4 おわりに

非線形座標系での 2 次元パターン情報から、その基本的な特徴量である総和 (0 次元モーメント) と中心位置 (1 次元モーメント / 0 次元モーメント) を計算する回路を提案し、動作を計算機シミュレーションで確認した。この回路は LSI 化可能であり、並列に入力を受けとり並列に計算を行なうため、高速ビジョンで初期視覚的処理を行なう LSI のうしろ、あるいは LSI の内部に直接接続することが可能である。これにより、フィードバックを行なうための高速でインテリジェントな視覚センサができる。

また、この回路で使用した原理は、触覚センサなどのパターンを扱うほかのセンサにも応用できる。

参考文献

- 1) T. Poggio, V. Torre and C. Koch : "Computational vision and regularization theory", *Nature*, **317**, 26, pp. 314-319 (1985).
- 2) C. Mead : "Analog VLSI and Neural Systems", Addison-Wesley (1989).
- 3) J. L. Wyatt, D. L. Standley and W. Yang : "Vision Chip Project : Analog VLSI System for Fast Image Acquisition and Early Vision Processing", *Proc. 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1330-1335 (1991).
- 4) M. Ishikawa, A. Morita and N. Takayanagi : "High Speed Vision System Using Massively Parallel Processing", *Proc. 1992 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 373-377 (1992).
- 5) 石川正俊 : "マトリクス状センサからの出力分布の中心位置と総和の検出方法", 計測自動制御学会論文集, **19**, 5, pp. 381-386 (1983-05).

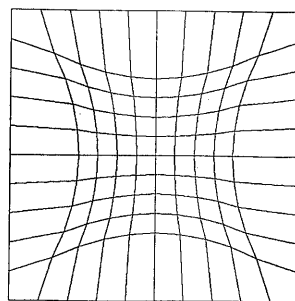


図 7 非線形座標系

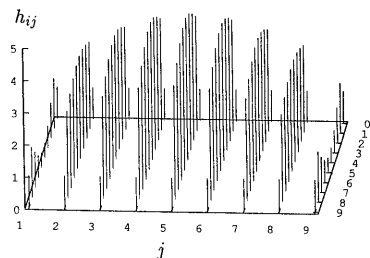
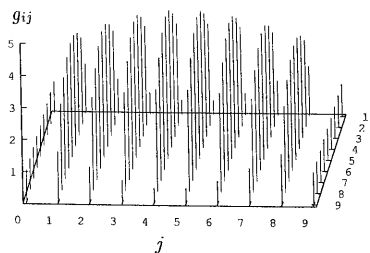


図 8 抵抗の値

- 6) 宇津木明男, 石川正俊 : "格子型ネットワーク回路による線形連想画像の学習", *信学論 (D-II)*, **J72-D-II**, 12, pp. 2103-2110 (1989-12).
- 7) A. Utsugi and M. Ishikawa : "Construction of Inner Space Representation of Latticed Network Circuit by Learning", *Neural Networks*, **4**, pp. 81-87 (1991).
- 8) G.Y. Tang : "A Discrete Version of Green's Theorem", *IEEE Trans.*, **PAMI-4-3**, pp. 242-249 (1982).