論　　文

ドット式表示装置による濃淡図形表示の方法*

藤　村　是　明**

Abstract

Binary dot output devices are widely used to display characters and line drawings. A number of techniques have been developed to display halftone pictures on such devices.

Two problems arise when the number of dots per one picture cell is small. One is quantizing contours and the other is moire pattern. The former is solved by adding noise before quantization and the latter is removed by preparing several micropatterns which is randomly assigned for each level.

This paper presents a technique which regards the brightness value as a probability of white dots and solves the two problems at the same time. The results show that the picture of good quality can be obtained using only 2×2 dots per one picture cell and the size of each cell may be reduced to 1 dot, if "improved gray scale" technique is applicable.

The technique is easy to implement requiring relatively small memory.

1. はじめに

計算機によって濃淡図形を表示する場合，黒白の2値しか許されない装置を用いて，擬似的に，濃淡を表示することが多い[3]．活字を備えたプリンタや，マイクロフィルム出力装置などにおいては，一定領域内の黒色部と白色部の比が比較的多くの値をとるが，最近多く用いられるようになったドット式表示装置では，少数の限られた値しかとり得ない．このような表示装置においては，原図形の1画素に対し，$n \times n$ 点から成るセルを対応させて，そのセル内の白点の個数を濃淡のレベルとする方法がとられる．この時，n をどのようにとるかは，一時に表示すべき図形の広さと出力装置のドット数によって決まるが，通常の 512×512 点程度の出力装置においては，$n=8$ として，濃淡を 65 レベルとれば 64×64 画素しかとれず，空間解像度が低下し，逆に空間解像度を上げて，たとえば 256×256 画素にすると，$n=2$ となり，濃度は5レベルしかとれないことになる．

n が与えられたときに，表示は，次のような2段のステップを経て行なわれる．

(ステップ1)　画素の濃度値を用いて，対応するセル内の白点の個数を決める．(量子化)

(ステップ2)　ステップ1で定まった個数の白点をセル内に配置する．(マイクロパターンの決定)

ステップ1において生ずる問題は，単純な量子化を行なうと，偽の輪郭が出現し画質が低下することであり，これを防ぐためには，適当な雑音（乱数）を加えた後に量子化する必要がある[2),3)]．

ステップ2において生ずる問題は，与えられた白点数に対し常に同一のマイクロパタンを割り当てると，広い領域において，周期的なパタン（モアレ模様）が出現することであり，これの解決方法としては，1つの白点数に対して数種のマイクロパタンを用意し，ランダムに割り当てる方法が考えられる．

本論文では，明度の値を，表示点が白の値をとる事象の確率を示すものと考え，乱数を用いて各表示点の値を決定することにより，前記の2ステップを同時に行ない，しかも，n が比較的少数（1から4程度）の場合にも，良好な画質を得る方法について述べる．

---

* Halftone display using dot plotting devices, by Koreaki FUJIMURA (Information Systems Section, Electrotechnical Laboratory)

** 電子技術総合研究所ソフトウェア部情報システム研究室

2. 各種の表示方法

原図形の明度値を入力明度とよび，$B(i, j)$ ((i, j) は画素の座標値) で表わす．入力明度は，0から1までの連続した値をとり，0が最暗，1が最明であるとする．原図形の1画素に対応して，表示装置上の $n \times n$ 点を1つのセルと考え，その中の座標 (k, l) の点が，黒ならば $R(i, j, k, l)=0$，白ならば $R(i, j, k, l)=1$ とする．ただし，i, j は，原図形上の画素の座標である．(Fig. 1 参照)

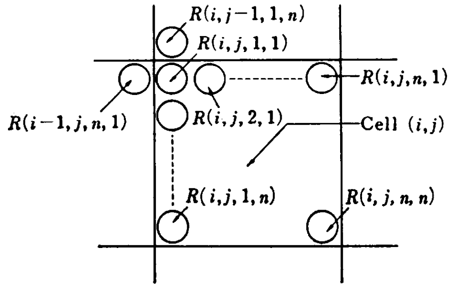


Fig. 1 Arrangement of $R(i, j, k, l)$

1つのセル内の白点の比率を表示明度 ($S(i, j)$) とすれば，

$$S(i, j)=\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} R(i, j, k, l)/n^2$$

であり，$0/n^2, 1/n^2, \cdots, n^2/n^2$ の n^2+1 とおりの値をとり得る．

2.1 固定パタン法

最も単純な表示方法は，入力明度が $B(i, j)$ なるときに，セル内の白点個数 m を

$$m=\left[n^2 B(i, j)+\frac{1}{2}\right] \quad ([\ \ ] \text{はガウス記号})$$

と定め，あらかじめ用意したパタン G_m を用いて

$$R(i, j, k, l)=G_m(k, l)$$

とする方法である．ただし，

$$\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} G_m(k, l)=m.$$

この方法では，n が小なるときに量子化効果により偽の輪郭が生じ，また，$G_m(k, l)$ が反復して配置されることにより，モアレ模様の生ずることがある．(Fig. 3-a 参照) また，G_m として，n^2+1 種類の n^2 ビットパタンを適切に定める必要がある．ただし，mを2進展開し，ビット位置に応じたパタンの重ね合わせを行なえば，$\log_2 n^2$ 種類のパタンを用意するだけでよい[1]．また，セル内の点を走査しながら $B(i, j)$ を累加し，整数部への繰り上がりが起こったときにのみ，$R(i, j, k, l)=1$ とする1種の DDA (Digital Differential Analyzer) 的手法を用いれば，記憶パタンは不要になるが，モアレ模様の発生は避けられない．

2.2 独立確率法[1]

この方法は，セル内の各点を確率 $B(i, j)$ (入力明度) で，独立に1にする方法であり，プログラムとしては，各点について，区間 (0, 1) の一様乱数 (これ以後一様乱数といえば，指定がない限り，区間は (0, 1) とする) を1個づつ発生させ，その値が，$B(i, j)$ よりも小ならば $R(i, j, k, l)=1$，大ならば $R(i, j, k, l)=0$ とすればよい．

この方法によれば，セル内の白点の個数は，平均 $n^2B(i, j)$，分散 $n^2B(i, j)(1-B(i, j))$ の2項分布に従う．例をあげれば，$n=2$ として表示する際，入力明度が 0.4 の領域では，白点個数 0 のセルが 13%，1, 2, 3, 4 のセルはそれぞれ 34%，34%，15%，2.6% 出現する．このようなバラツキのために，この方法による表示は画面にムラが多い．(Fig. 3-b 参照) また，使用する乱数の性質が大きく画面に影響する．(付録1参照)

2.3 条件確率法

この方法は，セル内白点個数のバラツキを少なくするため，そのセル内で既に決定された黒点，白点の数によって，次の決定の確率を変える方法である．Fig. 2

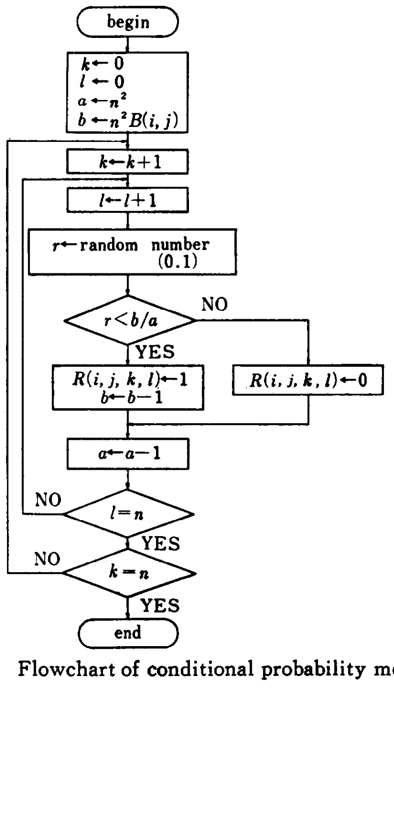


Fig. 2 Flowchart of conditional probability method

に，この方法による，1セル内の黒白決定の流れ図を示す．a は，セル内で未決定の点の数で，当初 n^2 にセットされる．b は，これから出現して欲しい白点の数（一般には非整数）で，当初は $n^2B(i, j)$ である．すると，次の点は，確率 b/a で1にするのが自然であり，一様乱数を発生させ，大小関係によって $R(i, j, k, l)$ を定める．$R(i, j, k, l)=1$ となれば，当然，白点の希望する値は1だけ減小し，$R(i, j, k, l)=0$ ならば，b は変化させない．このようにして，すべての点を決定する．

$n^2B(i, j)$ が整数になるときは，この方法は，あらかじめ n^2 個の球のうち，$n^2B(i, j)$ 個が白，残りが黒のときに，ランダムに1個ずつ取り出してくる過程と同一であり，従って，k, l によらず，

$$\mathrm{Prob}(R(i, j, k, l)=1)=B(i, j) \qquad (1)$$

であり，しかも，必ず $S(i, j)=B(i, j)$ となる．一般の $B(i, j)$ の値については，(1)式は成立しないが，$S(i, j)$ は，$[n^2B(i, j)]/n^2$ または $[n^2B(i, j)+1]/n^2$ の2通りの値のみをとり，その期待値は，ほぼ $S(i, j)$ に等しい．（付録2参照）

この方法では，$S(i, j)$ は $B(i, j)$ をはさむ2つのレベルだけをとるので，画面のムラは小さく，乱数の性質による画質の変化も，独立確率法に比較してきわめて小さい．

固定確率法と条件確率法は，ともに固定パタン法と比較して，G_m に相当するパタンが不要であり，また $S(i, j)$ が同じでも，ミクロな配置は様々な形であるので，モアレ模様は発生しない．

3. 画質の評価

Fig. 3 は，すべて 512×512 点から成る表示装置上の画面に，256×256 画素のデータを表示したもので，1画素は 2×2 の表示点により表わされている．Fig. 3-a は，2.1 節で示した固定パタン法によるものであり，偽の輪郭が顕著である．また，マイクロパタンの反復により，細い縦線のモアレ模様が出現している．Fig. 3-b は，2.2 節で示した独立確率法によるものであり，偽の輪郭は消えている．Fig. 3-c は，2.3 節の条件確率法によるものであり，偽の輪郭は無く．Fig. 3-b に比較して，画面のキメが細かい．

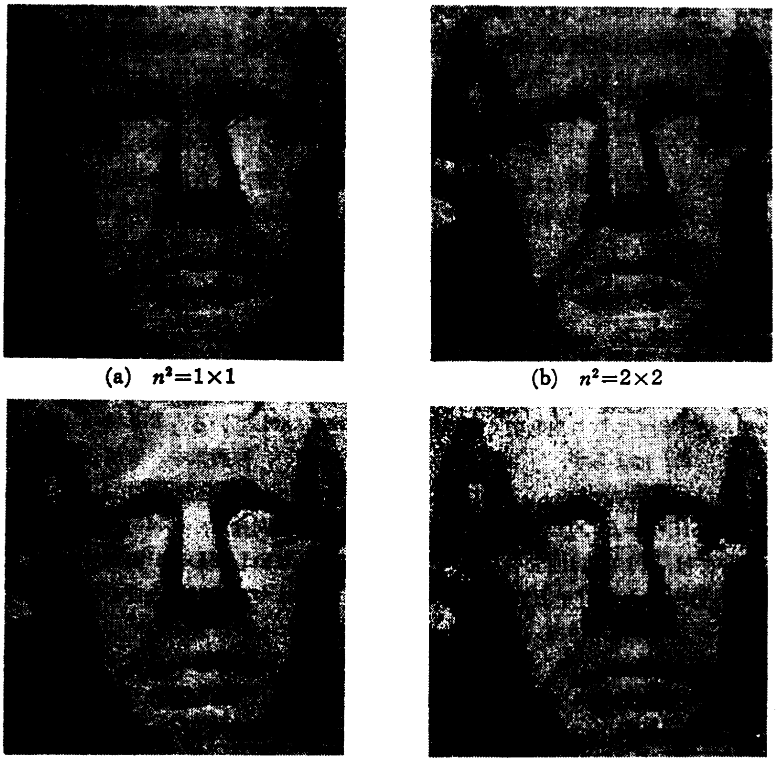
Fig. 4 は，同一の領域を条件確率法によって表示したものであるが，Fig. 4-a は1絵素あたり1点を用い（従って独立確率法と同じ結果を得る），512×512 画素を表示している．Fig. 4-b は，1絵素あたり 2×2 点を用い，原画素を，縦横2点ごとにサンプルした，256×256 画素を表示したものである．Fig. 4-c, d は，それぞれ同様に，4×4 または 8×8 点を用いて，128×128 ないし 64×64 画素を表示したものである．Fig. 4-d では空間解像度の低下によって，明暗の境界に段がハッキリ現われている．また，$n=2$ と $n=4$ では，$n=2$ のほうがキメ細かいだけで，全体としての画質に，大きな差がないことが注目される．

Fig. 3, Fig. 4 は，すべて石膏像を撮映してスライドにしたうえで，ダイセクタ管式入力装置（DICOMED 社製，2048×2048 点）を用いて，明暗精度8ビット，SN 比 41 dB で入力し，各種の方法で蓄積管（TEKTRONIX 社製，611 型）上に表示したものの感熱紙記録である．

一般に，このような確率的決定法は，雑音を付加した後に量子化する方法[2]と等価であるが，Fig. 5 はその例を示すものであって，Fig. 3-a と同じく，固定パタン法で表示したものである．Fig. 3-a が，S/N 比

(a) Fixed pattern method (b) Independent probability method (c) Conditional probability method

Fig. 3 Plaster figures displayed by various methods (2×2 dots/cell)



(a) $n^2=1\times1$ (b) $n^2=2\times2$ (c) $n^2=4\times4$ (d) $n^2=8\times8$

Fig. 4 Plaster figures displayed by conditional probability method with $n\times n$ dots per one cell

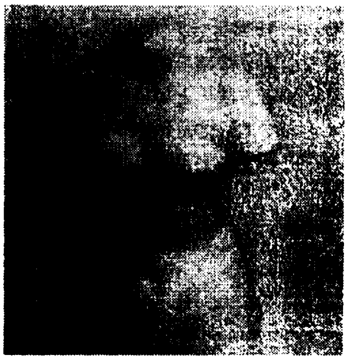


Fig 5 Fixed pattern method display of noisy data (2×2)

41 dB で入力されたデータを用いたのに対し，Fig. 5 は，S/N 比 26 dB となるように入力された，かなりの雑音を含むデータを表示したものである．この場合のほうが，かえって良好な画像が得られており，Fig. 3-b, c と似た感じを示していることがわかる．

4. 画素走査の利用

2節で扱った方法は，いずれも，各セルが独立に決定される方法であったが，他のセルにおける決定結果を利用することによって，画質の向上を図ることも可能である．特に，表示プログラムにおいて，連続して決定されるセルが，画面上でも隣接している場合は，Improved Gray Scale 方式[4] をきわめて簡単に行なうことができる．すなわち，条件確率法において，すべての点の決定が終わった段階で，b の値（Fig. 2 参照）は当初の期待値 $n^2B(i, j)$ と実際に出現した白点数との差に等しいから，それを次のセルの入力明度に加算して，全体での近似を上げることができる．Fig. 6-a, b は，それぞれ，$n=1$，$n=2$ として Improved Gray Scale 方式を用いた，条件確率法による表示である．Fig. 6-a と Fig. 3-b を比較すれば，$n=1$ のときに，大きな改善がなされることが分かる．Fig. 6-c は，$n=2$ の固定パタン法に，Improved Gray Level 方式を加味したものであり，さざ波状にモアレ模様が

(a) Conditional probability method (n=1)　(b) Conditional probability method (n=2)　(c) Fixed pattern method (n=2)

Fig. 6 Effects of improved gray scale method combined with conditional probability method and fixed pattern method

生じている.

5. むすび

計算機による濃淡図形には，これまでラインプリンタの重ね打ちによるものが多かったが，印字に関しても，ドット方式のものが多く使われるようになり，濃淡図形の表示に積極的に使用できる.

本論文で示した方法は，1つのセルの大きさが2×2点程度でも，十分図形を表示でき，また，規則的走査においては，更に，1×1でもほぼ十分であることを示す．これによって，濃淡図形の表示が，さらに多くの計算機システムによって，簡単に行なわれることが望まれる.

おわりに，本研究の機会を与えられた，電子技術総合研究所，西野博二パターン情報部長，石井治ソフトウェア部長，御指導，御討議をいただき，実験環境を整備して下さった，棟上昭男主任研究官ほかの情報システム研究室の方々，およびプログラムの作成を手伝っていただいた慶応大学工学部，金田玄一君に深謝します.

参考文献

1) 戸川隼人：濃淡図形のディスプレイ，第 11 回プログラミングシンポジウム報告集，A 9，(1970).

2) Lawrence G. Roberts: Picture Coding Using Pseudo-Random Noise, IRE Trans. on IT, Vol. IT-8, No. 2, pp. 145-154 (1962).

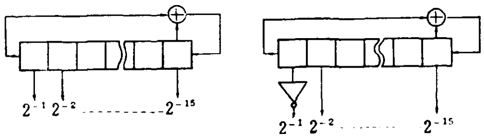
3) Ken Knowlton and Leon Harmon: Computer-Produced Gray Scales, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 1, No. 1, pp. 1-20 (1972).

4) W. T. Bisignani, G. P. Richards and J. W. Whelan: The Improved Gray Scale and the Coarse-Fine PCM Systems, Two New Digital TV Bandwidth Reduction Techniques, Proc. of IEEE, Vol. 54, No. 3, pp. 376-390 (1966).

〈付録〉

1. 独立確率法における乱数の性質の影響

独立確率法においては，使用する乱数の性質による画質の変動が大きい．たとえば Fig. 7-a のような，フィードバックシフトレジスタ方式で，1つの乱数を得るのに1回のシフトですませるならば，Fig. 8-a のようにムラの大きな画像を得る．しかし，レジスタ内容をそのまま乱数とはせず，Fig. 7-b のように，最上位ビットのみを反転させて乱数とすれば，Fig. 8-b のように，画面のムラはいちじるしく減少する．これは，連続した2数の相関の差によるものと思われる．また，Fig. 8-b では，この系列の自然な周期 32,767 回に達する前に，レジスタ内容を外部から変更して周期を長くしているが，それを行なわないと，Fig. 8-c の右側に見られるように，乱数系列と画面走査が同期して，特有のパタンが生じる.



(a)　(b)

Fig. 7 Pseudo-random number generators using feedback shift registers

(a) The result obtained with the shift register of Fig. 7-a (b) The result obtained with the shift register of Fig. 7-b (c) Same as (b), but no external reset of shift register

Fig. 8 Effects of random number quality on independent prob. method

独立確率法においても，条件確率法においても，表示点の数だけ乱数を必要とするので，その計算時間が短いことが要求されるが，満たすべき条件はゆるやかである．Fig. 7-b のような形は，通常好ましくないが，この目的には十分であると考えられる．

2. 条件確率法の出力について

条件確立法において，入力明度を α，表示明度を $S(\alpha)$ とすれば，$S(\alpha)$ は，$[n^2\alpha]/n^2$ か $[n^2\alpha+1]/n^2$ の値のみをとる．これは，次のようにして証明される．1セル内で m 番目の点を決定する時の残存点数を a_m，白点希望数を b_m，それまでに出た白点の数を W_{m-1}，黒点の数を B_{m-1} とすれば，

$$a_m=n^2-m+1, \tag{A 1}$$

$$b_m=n^2\alpha-W_{m-1}, \tag{A 2}$$

$$W_{m-1}+B_{m-1}=m-1 \tag{A 3}$$

なる関係が成立する．今 $W_{m-1}=[n^2\alpha+1]$ となったとすれば，(A 2) 式より，$b_m<0$ となり，m 番目の点は黒になり，以後の点もすべて黒になるから，全体の白点の数 W_{n^2} は，常に次の式を満たす．

$$W_{n^2}\leq[n^2\alpha+1]. \tag{A 4}$$

また，$B_m=n^2-[n^2\alpha]$ となったときには，(A 1)，(A 2)，(A 3)式より，

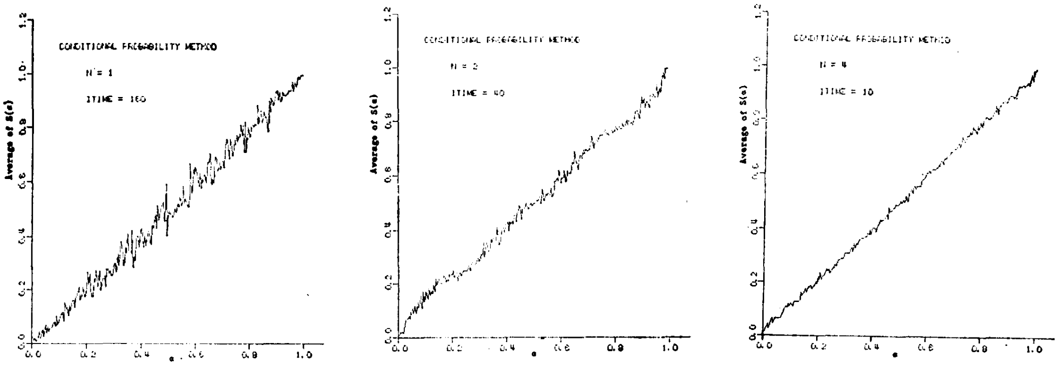
$$b_m=a_m+n^2\alpha-[n^2\alpha]$$

となり，$b_m/a_m>1$ であるから，m 番目の点は白となり，以後全部白となり，

$$W_{n^2}\geq[n^2\alpha] \tag{A 5}$$

が成立する．(A 4) 式と (A 5) 式より，$S(\alpha)$ が，$[n^2\alpha]$ か $[n^2\alpha+1]$ の値のみをとることが分かる．

また，$S(\alpha)$ の期待値 $E(S(\alpha))$ は，小区間 $[i/n^2, (i+1)/n^2]$ 内では α の n^2 次式であり，全体としても，連続かつ単調増大になっている．Fig 9 は，$\alpha=i/256$ $(i=0, 1, \cdots, 256)$ として，一定回数 $S(\alpha)$ を求め，α を横軸にとり，その平均を縦軸に示したものである．Fig. 9-a, b, c は，それぞれ，$n=1$ (独立確



(a) $n=1$, 160 cells (b) $n=2$, 40 cells (c) $n=4$, 10 cells

Fig. 9 The relation between the input and the average of output of conditional prob. method

率法と同結果) で 160 回, $n=2$ で 40 回, $n=4$ で 10 回の平均値をとっていて, いずれも, 160 点の決定がなされている. $1/n^2>\alpha>0$ または $1>\alpha>1-1/n^2$ で, $E(S(\alpha))=\alpha$ からの系統的なずれが生じ, $\alpha=i/n^2$ $(i=0, 1, \cdots, n^2)$ の近傍で, 分散が小になっている様子が分かる.

上記の $E(S(\alpha))$ の α からのずれは, 軽微であり, 実用上は無視でき, 4 節で述べたように, Improved Gray Scale 方式と併用する際には, このずれも全く消滅する. 厳密に(1)式 (2.3 節) を成立させ, しかも $E(S(\alpha))=\alpha$ とするには,

(1) 整数 k_α が, 確率 $n^2\alpha+1-[n^2\alpha]$ で $[n^2\alpha]$ に, 確率 $n^2\alpha-[n^2\alpha]$ で $[n^2\alpha+1]$ をとるようにし, b の初期設定に k_α を使う. (Fig. 2 参照)

または

(2) 得られる乱数を r としたときに, これまで,

(a1) $r<b_m/a_m$ ならば, その点を白にして, $b_{m+1}\leftarrow b_m-1$,

(a2) $r>b_m/a_m$ ならば, その点を黒にして, $b_{m+1}\leftarrow b_m$

としていたのを,

(b1) $r<[b_m]/a_m$ ならば, その点を白にして, $b_{m+1}\leftarrow b_m-1$,

(b2) $[b_m]/a_m\leq r<b_m/a_m$ ならば, その点を白にして, $b_{m+1}\leftarrow[b_m]$,

(b3) $b_m/a_m\leq r<[b_m+1]/a_m$ ならば, その点を黒にして, $b_{m+1}\leftarrow[b_m]$,

(b4) $[b_m+1]/a_m<r$ ならば, その点を黒にして, $b_{m+1}\leftarrow b_m$

とする.

の 2 つの方法がある. (1)は, あらかじめ確率的に量子化したものをランダムに配置する方法で, (2)は, n^2 個の球のうち, $[n^2\alpha]$ 個が白, $n^2-[n^2\alpha+1]$ 個が黒で, 残る 1 個は, 引いたときに, 確率 $[n^2\alpha]-n^2\alpha$ で白にすべき球であるような状況下で, ランダムに球を取り出す過程と同一である. (Fig. 10 参照)

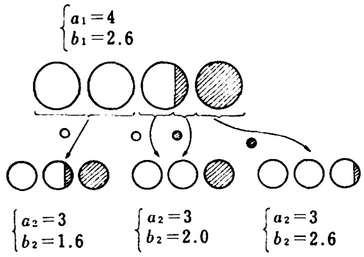


Fig. 10 Example of a correction of conditional probability method

(昭和 48 年 12 月 17 日受付)