棒材の切断における最適組合せへの ニューラルネットワークの応用

正 員 小 野 俊 彦 (福岡工大)

Application of Neural Networks to Optimal Selection of Cutting Length of Bars

Toshihiko Ono, Member (Fukuoka Institute of Technology)

A new method of optimal selection of cutting length of steel bars etc. using mutually connected Hopfield type neural networks is proposed. When each raw bar of various length is cut to several finished bars of required length, the combination of cutting length in a bar should be determined to keep the amount of scraps produced minimum as well as to maintain the balance among the products in accordance with the customer's order. The proposed neural networks can determine the optimal combination of length by searching the networks using energy function. The configuration of networks, the definition of network energy function and the derivation of the network constants, such as weight and threshold, are explained, along with the results of simulation studies.

キーワード：ニューラルネットワーク，最適切断，相互結合形ネットワーク

1. ま え が き

ニューラルネットワークのなかでも相互結合型のホップフィールドニューラルネットワークは最適問題の解法として有効に利用できることから、現在各方面で研究が進められている。特に、代表的な NP 完全問題であるセールスマン巡回問題に上記方式が適用されて、その有効性が実証されてから多くの関心を呼んでいる⁽¹⁾。本論文で取り上げる、棒状粗材より製品を切断する際の最適組合せ（以下、最適切断と略記）問題もまた NP 完全問題の一つであり、これまで効果的な解決法は見当たらなかった。この問題は、例えば製鉄所などにおいて圧延設備により製造された長尺の棒状製品（ここでは粗材と呼ぶ）から各種の所定長さの最終製品群を切り出す際に、各粗材をいかなる長さの製品の組合せで切断すれば、発生する端材（製品に使用できない長さ不足の製品）の長さを最小にできるかである。更に、この組合せの決定に際しては、端材の長さを最小にすることのほかに、こうして得られた各

製品の最終生産量が顧客よりの注文量に対して過不足を生じないようにバランスのとれたものとする必要もある。これを従来の解法により組合せ問題として取り扱えば多量の計算を必要とするとともに、生産の進行に応じて動的に変化する状況を考慮しながら最適化を図るという問題は、セールスマン巡回問題のようにすべての条件が与えられての最適化とは異なった難しさがある。

本研究は、上記のように時時刻刻に長さの変化する粗材より所定の長さの製品群を切り出す際に、発生する端材の長さを最小にしつつ、かつ各製品の生産量間にバランスを保つには、どのような製品長さの組合せで切断すればよいかという動的最適化の問題の解をホップフィールドニューラルネットワークにより求めることを目的に行ったものである。本論文では、この方式についてネットワークの構成法、ネットワークのエネルギー式とそれに基づくネットワークの各定数の決定法などについて述べ、併せてシミュレーションによる性能の検証結果について報告する。

2. 問題の設定

本論文では棒状粗材，例えば製鉄所における棒綱や型綱の製造過程において圧延設備により製造された棒状粗材を，客先より求められている各種長さの最終製品に切り出す際の最適な切断組合せ方法を求める問題を扱っている。粗材を幾つかの製品の組合せで切断してゆくと，図1に示すように端材が発生する。各粗材の長さは，原料のインゴットやブルームの大きさや製品工程で発生するスクラップの量などにより1本ずつ異なるので，粗材1本ごとにどのような長さの製品を組み合わせで切断すれば，発生する端材の長さを最小（できれば零）にできるかという問題がある。この組合せを求めるのが第1の最適切断問題である。一方，この方法のみでは生産される各製品の生産量の間に不均衡を生ずるので，これを防ぎ生産される各製品の本数を需要に見合ったものに保ちながら端材の長さを最小にするには，どのように切断すればよいかが重要と

図1 棒材の切断状況
Fig. 1 Cutting of bars.

なる。これが第2の最適切断問題である。本研究ではこの両者の方式を順次確立することができた。第2の最適切断には第1の方式も含んでいるので，以下の説明ではこの第2の方式について行う。

3. ニューラルネットワークの構成

本最適問題の解法には相互結合型ホップフィールドニューラルネットワーク (HNN)⁽²⁾を用いた。このネットワークでは，まず制約条件に応じたネットワーク定数（結合係数としきい値）を求め，この値に従ってネットワークを構成したのち，適当な初期状態より動作を開始して探索を続け，安定状態に達した時点の状態が求める解となる。従って最適切断問題をニューラルネットワークで解くには，まずどのようなネットワークの構成にするかを定める必要がある。それにはネットワークの各ユニットにどのような値を割り付けるかを決定せねばならない。これらのユニットは当然，探索すべき全空間を表す必要があることを考えると，必要になる値としては製品長さとその本数とそれに関連したものであり，検討の結果，図2に示す構成を採用した。

まず，全ユニットを製品の長さによりグループ分けし，更にその各グループ内を切断本数により細分して個々のユニットを定めた。すなわち，ある長さの製品の切断本数を自然数系列1, 2, 3, …の組合せで表すことにして，これらの値を順次各ユニットに割り当てた。これにより，その製品の切断本数はその製品長さをもったユニットなかの中で出力が1となっているユニットに割り当てられている本数の合計より求めることがで

ユニット番号	1	2	...	MN_i	...	M_i+1	M_i+2	...	M_i+MN_i	...	N
製品種別	1	1	...	1	...	i	i	...	i	...	n
製品長さ	l_1	l_1	...	l_1	...	l_i	l_i	...	l_i	...	l_n
切断本数	N_1	N_2	...	N_{MN_i}	...	N_{M_i+1}	N_{M_i+2}	...	$N_{M_i+MN_i}$	...	N_n
上記値	1	2	...	MN_i	...	1	2	...	MN_i	...	MN_n
切断長さ	L_1	L_2	...	L_{MN_i}	...	L_{M_i+1}	L_{M_i+2}	...	$L_{M_i+MN_i}$	...	L_n
上記値	$N_1 l_1$	$N_2 l_1$	...	$N_{MN_i} l_1$	...	$N_{M_i+1} l_i$	$N_{M_i+2} l_i$	...	$N_{M_i+MN_i} l_i$	...	$N_n l_n$
生産比率	R_1	R_2	...	R_{MN_i}	...	R_{M_i+1}	R_{M_i+2}	...	$R_{M_i+MN_i}$	...	R_n
上記値	r_1	r_1	...	r_1	...	r_i	r_i	...	r_i	...	r_n
過去の生産総数	P_1	P_2	...	P_{MN_i}	...	P_{M_i+1}	P_{M_i+2}	...	$P_{M_i+MN_i}$	...	P_n
上記値	p_1	p_1	...	p_1	...	p_i	p_i	...	p_i	...	p_n

図2 ニューラルネットワークの構成
Fig. 2. Construction of neural networks.

きる。従って、長さ l_i の製品 i が最低限必要とするユニットの数は次式より求まる最低整数値 n_i となる。

$$n_i(n_i+1)/2 \geq \max_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\max_i$: 最長粗材の長さをこの製品の長さ l_i で割った値の整数値、すなわち最大切断本数

この各ユニットに与える本数の系列としてはこのほかバイナリ系列 $1, 2, 4, 8, \dots, n$ が考えられ、こちらのほうが必要なユニット数は少なくともすむが、最適解への収束状況がよくなかったので採用を見送った。その理由としては、ネットワークの動作、すなわち各ユニットのオン-オフに伴う切断本数の増減において、自然数系列に比べてバイナリ系列では $1, 2, 4, 8, 16, \dots$ のように変化本数が大きく、かつ間隔も本数に応じて大きくなるためと考えられる。

次に、生産本数を均衡させるための制約条件の入れ方としては、図に示すように過去の生産総数を順次記憶していき、それに基づいて以下の方法を採用している。各製品間に均衡を保つ方法として

(1) 各製品ごとに生産本数に上限を設ける

(2) 各製品間の生産本数の比率を所定値に保つなどが考えられるが、本研究では後者の生産比率を保ちながら端材最小の最適切断を行う方式を採用した。

以上より、各ユニットには図に示すように製品長さ、切断本数、切断長さ、生産比率、過去の生産総数などを割り付けた。なお番号付けでは後述の式の誘導の関係でユニット番号 $1, \dots, N$ と製品種別番号 $1, \dots, n$ の2種類を併用しており、これにより変数名(ユニット番号基準)とその値(製品種別基準)の二つの記号を使用している。これら記号の説明は式の説明の際に必要なに応じて行う。

4. エネルギー式とネットワーク定数

<4.1> ネットワークのエネルギー HNN では、各ユニット間の結合係数 w_{ij} 、しきい値 θ_i 、ネットワーク出力 v_i とネットワークエネルギー E との関係を次式のように定めれば、常にエネルギー減少方向にネットワークを動作させることができる⁽²⁾⁽³⁾。

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} w_{ij} v_i v_j - \sum_i \theta_i v_i \dots\dots\dots (2)$$

従って、エネルギー関数として目的とする最適状態で最小となるものを選べば、ネットワークの動作により最適解を得ることができる。

本方式では二つの制約条件：端材の最小化と製品生産本数の均衡、を考慮する必要があることから、エネルギーとしてはこの両者を取り入れたものを考える。

すなわち、

$$E = E_1 + E_2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 E_1 : 端材の長さに関連したエネルギー、 E_2 : 生産本数の不均衡に関連したエネルギー

以下ではこれらの誘導を行う。

<4.2> 端材に関連したエネルギー式 端材の長さを最小にするという目的から、エネルギー式としては次のものを採用した。

$$E_1 = \frac{1}{2} A \left(L - \sum_{i=1}^N L_i v_i \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L : 各粗材の長さ、 L_i : ユニット i に割り付けられた製品の切断長さ、 N : ユニットの総数、 A : ゲイン係数

また v_i は各ユニットの出力であり、切断するかどうかに応じて1または0になる。

この式を変形すると次のとおりになる。

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{2} A \left[L^2 - 2L \sum_{i=1}^N L_i v_i + \left(\sum_{i=1}^N L_i v_i \right) \left(\sum_{j=1}^N L_j v_j \right) \right] \\ &= \frac{1}{2} A \left[L^2 - 2L \sum_{i=1}^N L_i v_i + \sum_{i=1}^N L_i^2 v_i^2 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N L_i L_j v_i v_j \right] \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 $v_i = 1$ または 0 、の関係より $v_i^2 = v_i$ となるので、この関係を上式に代入して整理し、かつ L^2 は定数であるゆえ、これを除いたものを新しく E_1 とすると、次式が得られる。

$$E_1 = \frac{1}{2} A \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N L_i L_j v_i v_j - \sum_{i=1}^N (2L - L_i) L_i v_i \right] \dots\dots\dots (6)$$

<4.3> 生産に関連したエネルギー式 ここでは生産本数の不均衡に基づくエネルギー式を誘導する。まず、次のとおり記号を定める。

製品の種類(長さによる)	n
生産本数比率の目標値	r_i ($i=1, \dots, n$)
過去の生産総数	p_i ($i=1, \dots, n$)
総生産本数	TN_i ($i=1, \dots, n$)

TN_i は各製品ごとに過去の生産総数と今回の粗材の切断本数とを合計したものであるので次式で表される。

$$TN_i = p_i + \sum_{j \in G_i} N_j v_j \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 G_i : 製品 i に属するユニットの集合、 $\sum_{j \in G_i}$: 製品 i に属するすべてのユニットに対する合計、 N_j : 各ユニットに割り付けた切断本数

なお、粗材番号を表す記号は省略している。

各製品本数の比率を所定比率の r_i ($i=1, \dots, n$) と

する条件より次の関係が成立する。

$$\frac{TN_1}{r_1} = \dots = \frac{TN_i}{r_i} = \dots = \frac{TN_n}{r_n} \dots\dots\dots (8)$$

従って、生産本数の不均衡に基づくエネルギーとしては次式を定義することができる。

$$E_2 = \frac{1}{2} B \sum_{i,j \neq i} (TN_i r_j - TN_j r_i)^2 \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\sum_{i,j \neq i} : j \neq i$ 以外の $i=1, \dots, n ; j=$

$1, \dots, n$ のすべての組合せについての合計、

B : ゲイン係数

次に、この式からネットワーク定数を求めるに必要な式への誘導を行う。

まず、(9)式の $\sum$ 内の項の変形を行う。この項に(7)式を代入して整理すると

$$\begin{aligned} & (TN_i r_j - TN_j r_i)^2 \\ &= (p_i r_j - p_j r_i)^2 + 2(p_i r_j - p_j r_i) \\ & \quad \times \left(\sum_{k \in G_i} N_k r_j v_k - \sum_{k \in G_j} N_k r_i v_k \right) \\ & \quad + r_j^2 \left(\sum_{k \in G_i} N_k v_k \right)^2 + r_i^2 \left(\sum_{k \in G_j} N_k v_k \right)^2 \\ & \quad - 2r_i r_j \left(\sum_{k \in G_i} N_k v_k \right) \left(\sum_{l \in G_j} N_l v_l \right) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここで、 v_k, v_l はいずれも 1 または 0 であることから $v_k^2 = v_k, v_l^2 = v_l$ となるので、この関係を用いて変形・整理すると、

$$\begin{aligned} & (TN_i r_j - TN_j r_i)^2 \\ &= \sum_{k,l \in G_i, k \neq l} r_j^2 N_k N_l v_k v_l \\ & \quad + \sum_{k,l \in G_j, k \neq l} r_i^2 N_k N_l v_k v_l \\ & \quad - 2 \sum_{k \in G_i, l \in G_j} r_i r_j N_k N_l v_k v_l \\ & \quad + \sum_{k \in G_i} [r_j^2 N_k^2 + 2(p_i r_j^2 - p_j r_i r_j) N_k] v_k \\ & \quad + \sum_{k \in G_j} [r_i^2 N_k^2 + 2(p_j r_i^2 - p_i r_j r_i) N_k] v_k \\ & \quad + (p_i r_j - p_j r_i)^2 \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

この関係を(9)式に代入すると E_2 の式が得られる。これに対し、更に以下のようにして各項の簡単化を行う。まず、

$$S \equiv \sum_{i=1}^n r_i^2, \quad U \equiv \sum_{i=1}^n p_i r_i$$

と置くと、 E_2 の式のなかの各項は次のように変形できる (付録を参照)。

$$\begin{aligned} & \sum_{i,j \neq i} \left[\sum_{k,l \in G_i, k \neq l} r_j^2 N_k N_l v_k v_l \right. \\ & \quad \left. + \sum_{k,l \in G_j, k \neq l} r_i^2 N_k N_l v_k v_l \right] \\ &= 2 \sum_{i=1}^n (S - r_i^2) \sum_{k,l \in G_i, k \neq l} N_k N_l v_k v_l \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i,j \neq i} \left[\sum_{k \in G_i} r_j^2 N_k^2 v_k + \sum_{k \in G_j} r_i^2 N_k^2 v_k \right] \\ &= 2 \sum_{i=1}^n (S - r_i^2) \sum_{k \in G_i} N_k^2 v_k \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i,j \neq i} \left[\sum_{k \in G_i} (p_i r_j^2 - p_j r_i r_j) N_k v_k \right. \\ & \quad \left. + \sum_{k \in G_j} (p_j r_i^2 - p_i r_j r_i) N_k v_k \right] \\ &= 2 \sum_{i=1}^n (S p_i - U r_i) \sum_{k \in G_i} N_k v_k \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

以上の関係を(9)式に代入し、更に $(p_i r_j - p_j r_i)^2$ は定数項であり最適化には関係ないので、これを除いたものを新しくエネルギー E_2 とすると次式が得られる (付録を参照)。なお、ここでは式の表現を HNN の標準エネルギー式に対応させるために変数 r_i, p_i ($i=1, \dots, n$) をそれぞれ R_i, P_i ($i=1, \dots, N$) に変えている。 R_i, P_i は図 2 を参照。

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{1}{2} B \left[2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{i,j} N_i N_j v_i v_j \right. \\ & \quad \left. + 2 \sum_{i=1}^N \{ (S - R_i^2) N_i^2 + 2(S P_i - U R_i) N_i \} v_i \right] \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} F_{i,j} &= S - R_i R_j : i, j \text{ が同一長さの製品グループの場合} \\ &= -R_i R_j : \text{同上でない場合} \end{aligned}$$

<4・4> ネットワーク定数 前節で求めた端材の長さとし生産本数の不均衡に基づくエネルギー関数を用いると、総合エネルギー E は次式で表される。

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= \frac{1}{2} A \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N L_i L_j v_i v_j - \sum_{i=1}^N (2L - L_i) L_i v_i \right] \\ & \quad + \frac{1}{2} B \left[2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{i,j} N_i N_j v_i v_j \right. \\ & \quad \left. + 2 \sum_{i=1}^N \{ (S - R_i^2) N_i^2 + 2(S P_i - U R_i) N_i \} v_i \right] \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

この式と、さきに挙げた HNN のエネルギー式の(2)式と等しいと置くことにより、ネットワークの動作を規定する定数であるユニット間の結合係数 $w_{i,j}$ としきい値 θ_i が次のとおり求まる。

$$w_{i,j} = -A L_i L_j - 2B F_{i,j} N_i N_j \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned} \theta_i &= A L_i \left(L - \frac{1}{2} L_i \right) \\ & \quad - B \{ (S - R_i^2) N_i^2 + 2(S P_i - U R_i) N_i \} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

ここで、これまで触れなかった係数 A, B について考える。この係数は端材の長さとし生産本数の不均衡と

による各エネルギー間の比重を決めるものであり、換言すれば端材最小の条件と生産本数の均衡の条件との比重を決めるものである。上記エネルギーの式よりわかるように、本ニューラルネットワークは端材の長さと生産本数の不均衡との各々より定まる各エネルギーの合計を最小するように動作する。一般にそれぞれの最小解は一致しないので総合の最小解は両者のトレードオフで決まり、係数 A, B の大きさによりいずれに重点を置くかが定まる。生産の最終段階では当然のことながら製品の生産本数の均衡をとる必要があり、端材の長さは増加しても均衡のほうを重視しなければならないが、生産の初期段階では不均衡があっても何ら差し支えないので、むしろ端材の長さに重点置いてこれをできるだけ小さくするのが望ましい。これらを考えると、 A, B の値は生産の進行に応じて変えるのがよいことがわかる。本システムではこれらを考慮して次のとおり設定している。

まず、係数 A の値は一定とし、係数 B の値は生産の初期では小さく、生産が進むにつれて増大するように設定する。具体的には、後述のシミュレーションでは生産の進行に応じて階段状に B を増加させている。

5. ネットワークの動作

本方式のシミュレーションプログラムの流れ図を図3に示す。まず、初期入力として粗材関係では各粗材の長さ、製品関係では各製品の長さとし生産比率を与える。また、係数 B の変化パターンもあらかじめ決めておく。現在は粗材の生産の進行に応じて段階的に増加するように変化させている。粗材1本目から順次切断方法を求めながら全粗材が終了するまで進ませる。まず、粗材1本ごとに各製品の過去の生産本数、製品間の生産比率などに基いて(17)、(18)式により結合係数、しきい値を求めて設定し、そのうえでネットワークを動作させる。その結果、最適解が得られると中間データとして記録する。こうして、すべての粗材の結果が得られると出力表示を行う。

次に、粗材1本ごとのネットワークの動作について説明する。

〔ステップ0〕 ネットワークの初期状態としてネットワーク出力 $v_i(0)$ を乱数により設定する。

〔ステップ1〕 ネットワークよりランダムに1個のユニット i を取り出す。

〔ステップ2〕 選ばれたユニット i ($i=1, \dots, N$) についてユニット入力値 $u_i(k)$ 、端材の長さ $\Delta L(k)$ を求める。

図3 シミュレーション用プログラム
Fig. 3. Flowchart of simulation program.

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N w_{ij} v_j(k) + \theta_i \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\Delta L(k) = L - \sum_{j=1}^N L_j v_j(k) \quad \dots\dots\dots (20)$$

〔ステップ3〕 $\Delta L(k)=0$ 、すなわち端材の長さが零なら終了する（最適解）。

〔ステップ4〕 $u_i(k), \Delta L(k)$ の値によってユニット i の出力 $v_i(k+1)$ を更新する。

$$u_i(k) \geq 0 \text{ かつ } \Delta L(k) > 0 \text{ なら } v_i(k+1) = 1$$

$$\text{上記以外の場合は } v_i(k+1) = 0$$

〔ステップ5〕 ユニット i 以外のユニット j ($j \neq i$) の出力は変化させない。

$$v_j(k+1) = v_j(k) \quad (j \neq i)$$

〔ステップ6〕 $\Delta L(k+1)$ を求め、これまでのうちの最小値なら最小端材データをこの値に更新して記憶する。

〔ステップ7〕 所定の回数実行させたら終了。これまで記憶してきた端材最小データを切断データとして採用する。

〔ステップ8〕 〔ステップ1〕に戻る。

なお、〔ステップ4〕において $\Delta L(k) > 0$ なる条件を入れたのは負の長さの端材は存在しないためである。また同じく〔ステップ4〕において、極小解に陥ることを防止するために、 $u_i(k)$ には正規雑音を付加し、その大きさを探索ステップに応じて指数関数的に減少させる焼きなまし操作を組み込んでいる。

6. シミュレーション結果

本システムの性能を検証するために各種のシミュレーションを行った。ここではその一部を紹介する。このシミュレーションは性能の比較のため下記の条件により行った。

(1) 粗材1本について最適切断を行った場合。これは係数 $B=0$ とすることにより実現できる。

(2) 製品の生産本数の平衡を考慮しつつ最適切断を行った場合。この場合は係数 A は一定に保ち、 B は生産の進行に応じて階段状に順次増加させた。また各製品の生産比率については3種類の場合について行った。

以下のシミュレーションでは、いずれも下記に示す5本の粗材から4種類の製品を生産する場合について行った。

粗材の長さ	製品の長さ
123 m	11 m
131 m	13 m
137 m	17 m
145 m	21 m
151 m	

〔シミュレーション-1〕 生産の平衡を考えずに粗材1本ごとの端材最小の最適切断を行った場合であり、表1にその結果を示す。

〔シミュレーション-2〕 4種の製品の生産本

表1 個別粗材の最適切断
Table 1. Optimal cut of individual bar.

	1本目	2本目	3本目	4本目	5本目	合計	比率(%)
粗材(m)	123	131	137	145	151	687	結果
製品	11 m	0	1	2	3	1	7 16.3
切断	13 m	2	6	4	1	1	14 32.6
本数	17 m	2	0	0	2	5	9 20.9
	21 m	3	2	3	3	2	13 30.2
端材(m)	0	0	0	2	0	2	100.0

表2 生産全体を考慮した最適切断-1
Table 2. Optimal cut with production balance-1.

	1本目	2本目	3本目	4本目	5本目	合計	比率(%)
粗材(m)	123	131	137	145	151	687	目標 結果
製品	11 m	1	3	2	3	1	10 25.0 23.3
切断	13 m	0	4	3	1	3	11 25.0 25.6
本数	17 m	4	0	2	2	3	11 25.0 25.6
	21 m	2	2	2	3	2	11 25.0 25.6
端材(m)	2	4	0	2	8	16	100.0 100.0

数を同一にする条件のもとでの端材最小の最適切断を行った場合であり、結果は表2に示す。

〔シミュレーション-3〕 4種の製品の生産本数を、1,1,2,2の比率に保ちつつ同様の最適切断を行った場合であり、結果は表3に示す。

〔シミュレーション-4〕 4種の製品の生産本数を2,2,1,1の比率に保ちつつ同様の最適切断を行った場合であり、結果は表4に示す。

なお、端材の長さと生産本数の不均衡との比重を決定する係数 A, B は次のとおり設定した。まず、 A は一定値0.01とした。 B については生産の進行に応じて増大させる必要があるため、それまでに処理した粗材の本数を累計し、これの総粗材本数(今回は5本)との割合に応じて段階的に増加させた。すなわち、0~40%までは0.02、40%以上70%までは1.0、70%以上90%までは3.0、90%以上は7.0とした。 A, B の理論的決定法は現在のところ未確立であり、これらの値はシミュレーション結果を勘案しつつ決定している。

以上のシミュレーション結果から次の結果が得られた。

(1) 粗材1本ごとについての最適切断のみを行った場合は、全端材の量は小さくなっているが各製品の生産本数には大きなばらつきが見られる。

(2) 生産本数の比率を保ちつつ端材最小の最適切断を行った場合には、各製品の生産比率が生産の最終

表3 生産全体を考慮した最適切断-2
Table 3. Optimal cut with production balance-2.

	1本目	2本目	3本目	4本目	5本目	合計	比率(%)
粗材(m)	123	131	137	145	151	687	目標 結果
製品	11 m	1	1	0	4	0	6 16.7 15.0
切断	13 m	0	6	0	0	1	7 16.7 17.5
本数	17 m	4	0	4	2	3	13 33.3 32.5
	21 m	2	2	3	3	4	14 33.3 35.0
端材(m)	2	0	6	4	3	15	100.0 100.0

表4 生産全体を考慮した最適切断-3
Table 4. Optimal cut with production balance-3.

	1本目	2本目	3本目	4本目	5本目	合計	比率(%)
粗材(m)	123	131	137	145	151	687	目標 結果
製品	11 m	5	0	2	4	4	15 33.3 31.9
切断	13 m	5	0	4	3	4	16 33.3 34.0
本数	17 m	0	5	0	1	2	8 16.7 17.0
	21 m	0	2	3	2	1	8 16.7 17.0
端材(m)	3	4	0	3	0	10	100.0 100.0

段階においてほとんど目標値に維持されており、目的を達成している。しかし、端材の量は前者に比べて多くなっている。これは、生産本数の均衡と端材最小との両最適値が一般には同一ではないため、両者を満足する最適値は両者の中間値付近に決まるためであり、やむを得ないことである。

以上により本方式の有効性がシミュレーションにより検証できた。

7. あとがき

本論文では、棒材状を対象にした最適切断方式を相互結合ニューラルネットワークにより実現する方式について報告した。このネットワークを使用して最適切断を行うに必要なネットワークの構成法とそれに使用する結合係数としきい値を求め、シミュレーションにより所期の性能を発揮できることを実証した。

今回は長さという一次元の量を対象にしたが、ここに述べた最適選択方式は二次元あるいは三次元を対象にした最適問題へも発展して適用できると思われる。

終わりに、本研究は児玉和彦、高倉栄作、高崎保行および中村康則らの諸君に卒業研究として協力していただいた。その努力に謝意を述べる。

(平成4年12月28日受付, 同5年3月17日再受付)

文 献

- (1) R. P. Lippmann: "An introduction to computing with neural nets", *IEEE ASSP Magazine* p. 4 (1987-4)
- (2) J. J. Hopfield: "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", *Proc. National Academy of Science*, 79, 2554 (1979)
- (3) J. J. Hopfield: "Artificial neural networks", *IEEE Circuit & Device Magazine*, p. 3 (1988-9)
- (4) B. Bavarian: "Introduction to neural networks for intelligent control", *IEEE Control System Magazine*, 3 (1988-4)
- (5) J. A. Anderson & E. Rosenfeld ed.: *Neurocomputing*, p. 729 (1988) The MIT Press
- (6) 小野: 「ニューラルネットワークによる材料採りの最適化」, 平3電気関係学会九州支部連大, p. 667
- (7) 小野, 他: 「ニューラルネットワークの最適切断制御への応用」, 第31回計測自動制御学会学術講演会予稿集, p. 769 (平4)
- (8) 小野: 「ニューラルネットワークによる最適切断制御」福岡工大言語情報工学研究所集報, 3, 53 (平4)

付 録

1. 本文の(12)~(14)式の誘導

(12)式の第1項は

$$\sum_{i,j \neq i} r_j^2 \sum_{k,l \in G_i, k \neq l} N_k N_l v_k v_l \\ = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n r_j^2 \right) \sum_{k,l \in G_i, k \neq l} N_k N_l v_k v_l$$

となるので、ここで次の関係

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n r_j^2 = \sum_{j=1}^n r_j^2 - r_i^2 = S - r_i^2$$

を代入すると得られる。また第2項は変数 j と i を入れ換えると同一の式が得られるので(12)式となる。

(13), (14)式も同様の方法で誘導できる。

2. 本文の(15)式の誘導

本文の(12)~(14)式を(11)式に代入すると、

$$E_2 = \frac{1}{2} B \left[2 \sum_{i=1}^n (S - r_i^2) \sum_{k,l \in G_i, k \neq l} N_k N_l v_k v_l \right. \\ - 2 \sum_{i,j \neq i} r_i r_j \sum_{k \in G_i, l \in G_j} N_k N_l v_k v_l \\ \left. + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{k \in G_i} \{ (S - r_i^2) N_k^2 \right. \\ \left. + 2(S p_i - U r_i) \} N_k v_k \right]$$

ここで、合計演算の変数を製品の種類から HNN のユニットの番号に置き換える。上式の〔 〕の中の各項について考える。

第1項は

$$2 \sum_{i=1}^n (S - r_i^2) \sum_{k,l \in G_i, k \neq l} N_k N_l v_k v_l \\ = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (S - R_i R_j) N_i N_j v_i v_j$$

となる。ただし、 i, j は同一製品群にあるもののみを選ぶ。

第2項は

$$2 \sum_{i,j \neq i} r_i r_j \sum_{k \in G_i, l \in G_j} N_k N_l v_k v_l \\ = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n R_i R_j N_i N_j v_i v_j$$

となる。ただし、 i, j は同一製品群に含まれないものを選ぶ。

以上の二つの式を一つに表したものが、本文の(15)式の第1項である。

第3項も同様に誘導できる。

小 野 俊 彦 (正員)

昭和6年10月10日生。29年3月九州大学工学部電気工学科卒業。29年4月東京芝浦電気(株)(現、(株)東芝)技術部、53年7月同社重電技術研究所勤務。

62年10月福岡工業大学工学部通信工学科教授、平成2年4月情報工学科教授、現在に至る。システムの故障診断技術、知識工学・ニューラルネットワークの応用などの研究に従事。工学博士。技術士。計測自動制御学会、情報処理学会、人工知能学会会員。