

状態監視システムの高度化について

— 人間的手法の導入 —

酒井 義郎*・野山 英郎**

A Human-Factors Analysis for Systems Supervision

Yoshiro SAKAI and Hideo NOYAMA

Abstract

Human methods of regulating the system state in operation is analyzed with the aid of a simple computer game. The computer game employed is a two-dimensional simulator of system regulation procedures where a nonlinear relationship between the state and the corresponding operating condition. The game was played by human players (beginners and good players who know its mechanism) and a computer program. Comparing their results, some features of human players are discussed in order to utilize the results in constructing supervisory systems for systems in operation.

1. 緒 言

現在、工場の生産ラインにおいて、急速に自動化が進められ、人間に代わるコンピュータが必要となってきた。切削加工についても、オートメーション化が進められているが、従来の数値制御では加工中の異常に十分対処できなかった。本報告では、複数の対象を簡単なモデルに置き換え、状態異常の検知、修正における知識の運用、知識の管理に、人間的手法を取り入れることについて述べる。そのために、人間の修正法を解析し、システムが人間と同じような知識、感覚を用いるようにする。したがって、知識を階層構造に位置づけて利用すると、運用における自由度の幅を広げることができる。以上のようにして、最小限の知識を用いて、複雑な対象をコントロールすることを目指すものである。

2. 切削加工における知識構造

2.1 知識の種類

切削加工を行うに当たって、熟練者はどのような異常が発生した時に、どの切削条件をどう修正すれば、正常な状態に戻すことができるかという知識を経験的に身につけている。ただし、この経験的な知識は、

「IF 切りくずが少し長くなった

THEN 送りを少し増加させる。」

という具合にあいまいな表現で表わされており、範囲をもっている。

これとは別に、作業者は加工に関する専門的な知識を持っている。しかし、この知識をそのまま利用することは少なく、一般に自分の判断を確かめるのに用いられる。

さらに、切りくずが飛び散ると危険だといった切削加工と直接関係しない一般的な知識も利用されていると考えられる。

したがって、切削加工において利用する知識を次の3つの段階に分ける。

**大学院生産機械工学専攻
*生産機械工学科

- 1 経験上の方策
- 2 専門的知識
- 3 常識

2.2 切削条件と切削状態

切削に関する専門的知識は、一般に時間経過を無視すれば、切削条件（送り，切削速度，切り込み） X から切削状態（びびり） S への写像 $F: X \rightarrow S$ であり，Fig. 1において，三次元的な模式図を示す。

熟練者が感覚的に持っている知識は，どのような異常に対して，どのような対処をすれば良いかということについてのものである。条件文を用いて書くと，

$$\begin{aligned} \text{専門的知識 IF } X \text{ THEN } S \\ \text{経験的知識 IF } \Delta S \text{ THEN } \Delta X \end{aligned} \quad (1)$$

ここで， ΔS は正常な状態からのずれであり， ΔX は現在の状態を正常な状態へ戻すのに必要な修正量である。式(1)についての一般論としての説明を与えておく。いま，送り，切削速度，切り込みなどの狭義の切削条件の数を一般に n 個として， $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ で表わす。また，工具の形状や材質などの広義の切削条件の数を r 個として， p_1, p_2, \dots, p_r で表わす。同様に切削状態についても m 個パラメータがあるとして， s_1, s_2, \dots, s_m で表現する。これらの関係を数式的に表現すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} s_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_r) \\ &\vdots \\ s_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_r) \\ &\vdots \\ s_m &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_r) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで，

$$S = \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_r \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix}$$

とおくと式(2)は

$$S = F(X; P) \quad (3)$$

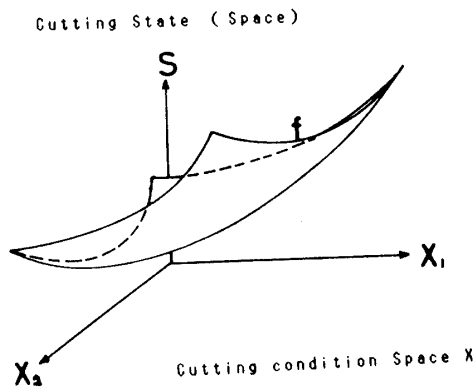


Fig. 1 Cutting Condition and Cutting State.

と書くことができる。広義の切削条件 P が決められてから切削が始まるので，加工中は式(3)は X と S だけの関係になる：

$$S = F(X) \quad (4)$$

関数 F が X について微分可能とすると近似的に，

$$\Delta S = \frac{dF}{dX} \Delta X \quad (5)$$

を得， ΔS と ΔX の関係は上式で与えられる。

熟練者の経験的知識は変化量から変化量への写像であると同時に，切削状態から切削条件への写像である。すなわち，式(1)における経験的知識は式(5)とは逆の関係として与えられる。しかし， F は必ずしも逆写像を持たない。

そこで，空間全体のごく小さい部分について考えることにする(局所化)。ある切削条件 x_0 の近傍を考えると，三次元的には f を表す曲面は近似として平面と考えることができる(線形化)。このように，正常な状態からのずれと切削条件の修正量との関係は次のように表わされる。

$$\begin{pmatrix} \Delta s_1 \\ \vdots \\ \Delta s_n \end{pmatrix} = R(x_0) \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix}, R(x_0) = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

すなわち，局所化を採用することで，写像 f を線形化することができ， $R(x_0)$ を決定することができた。しかし， $R(x_0)$ は m 行 n 列の行列で，一般に $m = n$ ではないから，解析的に $R^{-1}(x_0)$ を定義することはできない。

そこで，例えば，びびりをなくすには，切削速度を上げるのが最も効果的であるという具合に，切削状態の修正 Δs_i に最も影響の大きい条件のみの修正 Δx_k を考えることにする。すなわち

$$\Delta s_i = r_{ik} \Delta x_k \quad (7)$$

とすることで， $R(x_0)$ を次式のように対角化することができる。

$$R(x_0) = \text{diag}(r_{11}, r_{22}, \dots, r_{nn}) \quad (8)$$

以上の処理により， $R^{-1}(x_0)$ に相当するものを求めることができる。これをスカラー化と呼ぶことにする。

2.3 人間の特性

人間が知識を用いる場合，対象や状態がどういったものであるかを理解しなければならない。この時，人間が用いると考えられる手法を次にあげる。

- (1) 局所化
- (2) 線形化
- (3) スカラー化

前節において、これらの手法を切削に当てはめてみたが、一般に人間の持つ感覚、例えば距離感覚についても同じ手法を用いていると考えられる。後に、人が距離感覚を用いて非線形な対象に対応する例を示すが、わずかな非線形性には経験の蓄積によって十分対応できているといえる。

知識の中にわずかな非線形性を取り入れるために、一般に尺度を変化させている。たとえば、車の運転において停止距離は速度の二乗に比例するが、ドライバー自身がこの関係を知っている事は少ない。視覚よれ得た情報からブレーキの強弱を決めているが、強く踏めば早く止まり、弱く踏めばゆっくり止まるという感覚が身についているだけである。感覚をどのように作るかは、個人によってさまざまで一定していない。しかし、いずれにしろ、近似的に物事をとらえていることに違いはない。

いま、 $x-z$ 座標系において、原点を通る関数 $h(x)$ を考える時、 $x=0$ の近傍では線形近似できるので、

$$z = h(x) = ax \tag{9}$$

ここで a は定数と認識される。しかし、 $|x|$ がある程度大きい場合、ずれが明確になることがある。この場合、前述した尺度を変えることで対応させようとするが、それでも修正が必要となる時、ずれは次式に従ってとらえられる。

$$z' = z - \lambda b(x - x_0) \tag{10}$$

ただし、 b は定数； λ は修正を必要とする場合は 1 をとり、その他の時は 0 をとるものとする。

このように、人間はごく一般に上記の三つの手法を用いているが、独立したものとしてではなく相互に関係づけている。情報を獲得し整理する上で必要に応じて利用し、理解を助けているものと考えられる。これらのうち、線形性、局所性は情報の収集において、またスカラ性は得た情報の利用において、主に使われている。

2.4 知識の蓄積

自己の経験を通して得る知識は、「切りくずが少し長くなったら、送りを少し増加させてやればよい。」といった言語表現となり、具体的な数値をとらないのが一般的である。

「少し」とか「大きい」などのことばは、「何が大きい」あるいは「大きい何々」のように情報を与える主体「何々」によって違っているはずである。このあいまいさを含む表現を使うために、自己の内的感覚とファジィ言語を利用する。

感覚の形成をどのようなものとするかは、その経験

の積重ねに要求されている内容や、どういう経験をしたかという経験自体によって異ってくる。したがって、感覚の形成方法に決まったものがある訳ではなく、ある程度妥当なものなら適用可能といえる。むしろ、「何」という状況、背景があるかということが重要となる。

3. 的当てシミュレーション

切削加工において、熟練者は多くの経験をする事によって、あいまいな判断でも正しい操作を行えるようになっている。しかし、あいまいな判断を用いてはいるが切削状態には多種多様な影響因子がからみあっているため、判断は複雑な処理によって行われると考えられる。そこで、人間の判断方法を知るために次に示す簡単なシミュレーションを用いる。

的当てシミュレーションでは、Fig. 2 に示すように、ディスプレイ上にランダムに標的が出現する。被験者はその標的に向って弾を発射することになる。被験者と標的の現れる壁との関係を Fig. 3 に示す。被験者は初め正面を向いており、標的が LEFT, CENTER, RIGHT のどの範囲に出現したかだけ教えられる。そこで、適当に θ_1 を決め弾を発射すると、着弾点が Fig. 2 の赤い線分で表示される。被験者は赤い線分と標的の

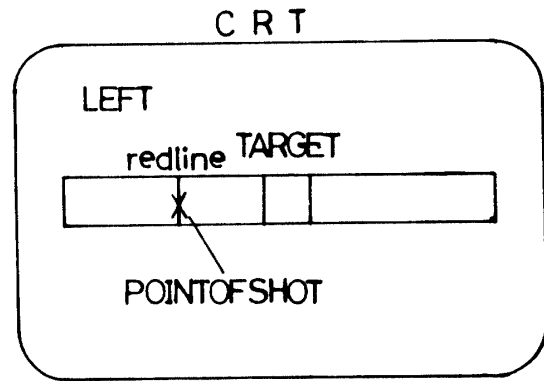


Fig. 2 Information for Human Player.

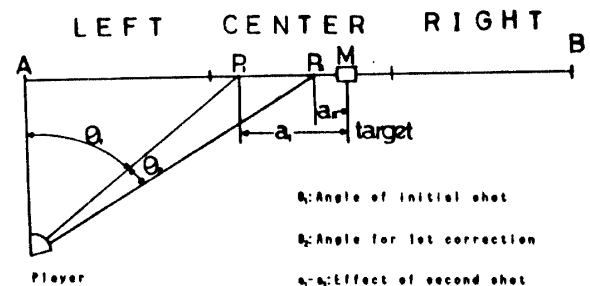


Fig. 3 Simulation of regulation in cutting process.

距離を見て、 θ_0 を決め修正をすることになる。なお、標的に弾が当たると ATARI と表示し、元にもどるものとした。

上述の、実際に人間が被験者となって行うシュミレーションに対し、コンピュータに人の代わりをさせて、シュミレーションをさせるシステムについて次に述べる。

システムの第一弾の決定法は、今までに使った値の平均を用い、修正量の決定については、システムの距離についての「大・中・小」の感覚を用いるものとした。これまでの経験において平均的な距離を“中”，それより遠いものを“大”，近いものを“小”としている。

標的と第一弾との角度差は、壁上での標的的位置を x_0 ，第一弾の着弾点を x_1 ，角度を φ とすると、

$$d = \varphi(x_0) - \varphi(x_1) \tag{11}$$

で与えられる。“中”の感覚である平均的な差という感覚は、過去 m 回における差 d の平均 a を取り、 a の数列を作ることによって表わされる。すなわち、

$$a(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m+1}^k d(i) \tag{12}$$

として、次の数列 S_k^a を得る。

$$S_k^a = (a(1), a(2), \dots, a(k), \dots)$$

ただし、 i は過去 k 回行った試行のうち第 i 番目の試行であることを示し、 $a(k)$ は最近の m 回における $d(i)$ ， $i = k - m + 1, \dots, k$ の平均である。実際のシステムでは、現在から15回前までの a を用いて感覚をつくっている。また、“大”，“小”の感覚についても、 a を大きい順や小さい順に並べることによって数列をつくり、その値の幅を「大・中・小」の尺度として、それによって感覚を与えようとした。

4. 人間とシステムの解析

4.1 人間がシュミレーションを行う場合の解析

人間がシュミレーションをする場合、どういう思考過程で行うのだろうか。ずれが生じている時、感覚をたよりに修正すると考えられる。すなわち、未経験状態の被験者（のち初心者と呼ぶ）は、このシュミレーションにおいて視覚から得られる情報だけで、判断を下していると思われる。よって初心者は以下のようにして修正をされると考えられる。

- (1) 第一回目の修正角 的までの距離を各人の勘で判断し、適当な数値を決める。
 - (2) 二回目以後の修正角 第一回目の修正角と着弾点の動きを情報として、次の修正角を決める。
- さて、このシュミレーションをするのに必要なのは、

距離と修正角の関係をつかむことであるが、初心者はこれをどう捉えているだろうか。そこで、初期入力角による着弾点からのまでの距離（のち的からの距離と呼ぶ）と第一修正角との関係について考えてみる。これを示すのが Fig. 4 であり、図において的からの距離と修正角度が直線的になっている。この結果から、初心者は視覚でとらえた距離感覚と同じ比率で修正角を決めていることがわかる。次に Fig. 5 は熟練者のものであるが、的からの距離が大きくなるに従って線形性が保たれなくなる。これは、被験者が経験によって、線形な判断に疑問をもち少し曲っているという感覚を身につけたからだと考えられる。よって実際の距離と修正量の関係に近いものとなっている。

そこで、曲っている状態に二つの線分による折れ線近似を適用する。その方法として、2 から11までのそれぞれの点において折れ曲がる可能性を考え、最小二

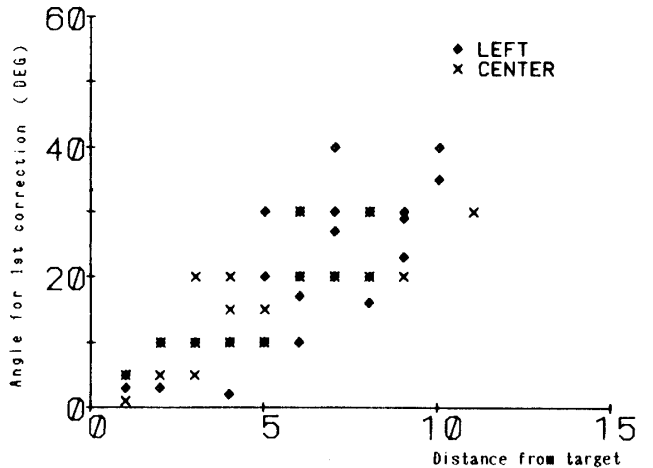


Fig. 4 Result of simulation (beginner).

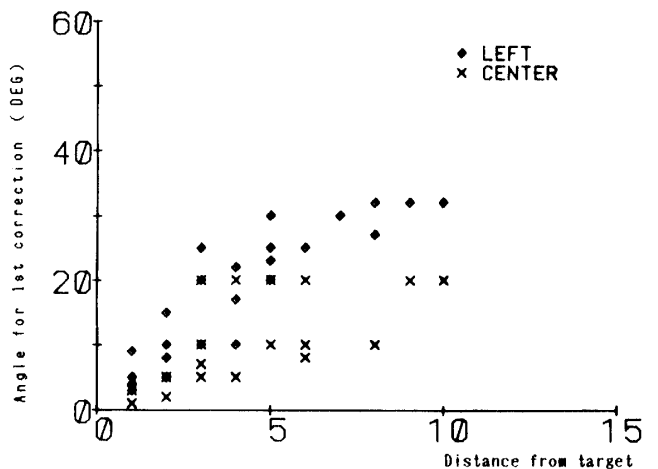


Fig. 5 Result of simulation (expert).

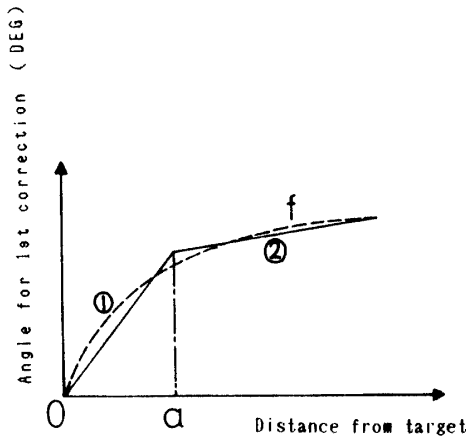


Fig. 6 Schematic of piecewise-linear approximation for dominant nonlinearity.

乗法により、最適な折線を決定する。曲っている状態を Fig. 6 の曲線 f とすると、次式で求められる。

①の範囲すなわち $a \geq x > 0$ なる x での分散値 S_1^2 は、

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)$$

を使って、

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{S_{xy}}{S_x} x_i \right)^2 \quad (13)$$

となる。②の範囲すなわち $a < x$ なる x での分散値 S_2^2 は、

$$S_x = \sum_{i=1}^m x_i^2 - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^m x_i y_i - \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m x_i \right) \left(\sum_{i=1}^m y_i \right); y_a = \bar{y} - \frac{S_{xy}}{S_x} \bar{x}$$

を使って、

$$S_2^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(y_i - \frac{S_{xy}}{S_x} x_i - y_a \right)^2 \quad (14)$$

ただし、 $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i$

以上において、n は①の範囲の点の数、m は②の範囲の点の数である。 $S_1^2 + S_2^2$ が最小となるとき、点 a で曲がる 2 つの直線が最も良く f を表していることになる。

Fig. 5 において、この方法によって a を求めると的からの距離が 8 のとき最小となるから、熟練者は、ずれが 8 までは線形に判断して修正し、ずれがそれ以上の時は異なる判断基準を用いて修正しているといえる。

次に Fig. 4 を LEFT と CENTER における点に分け、直線で近似したものが Fig. 7 となる。同様に、Fig. 5 を二つの直線で近似したものが Fig. 8 となる。これらにより、初心者は LEFT と CENTER という的の位

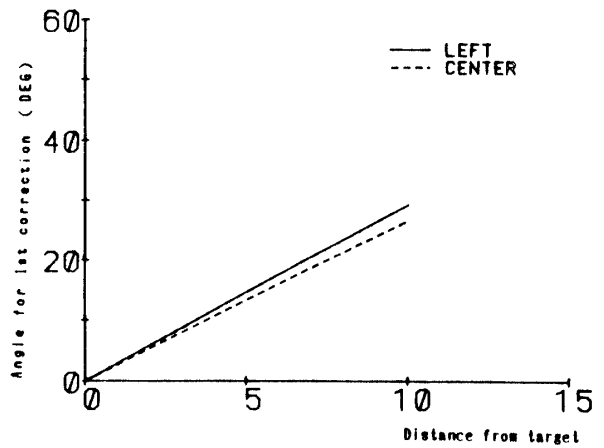


Fig. 7 Least-square approximations of relations between distance from target and angle for 1st correction (beginner).

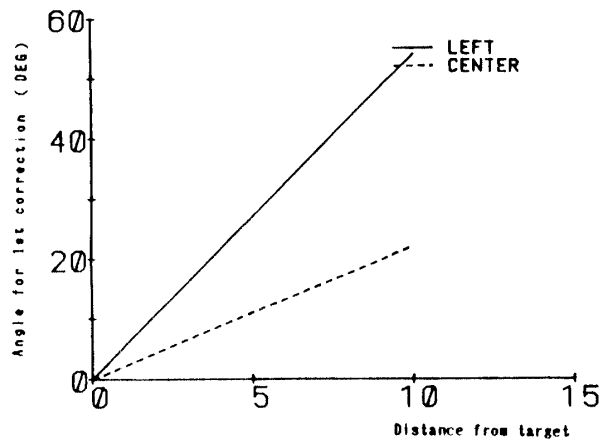


Fig. 8 Least-square approximations of relations between distance from target and angle for 1st correction (expert).

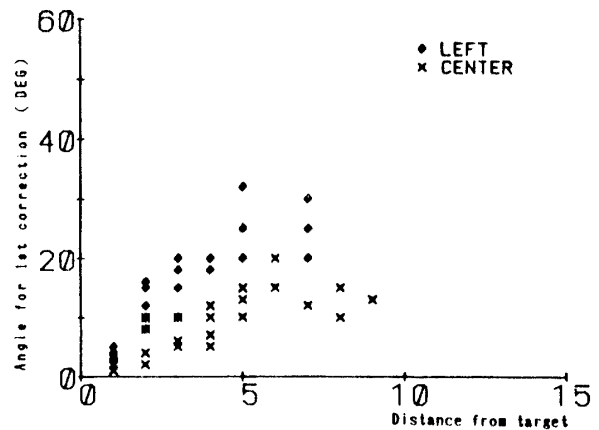


Fig. 9 Result of simulation (beginner).

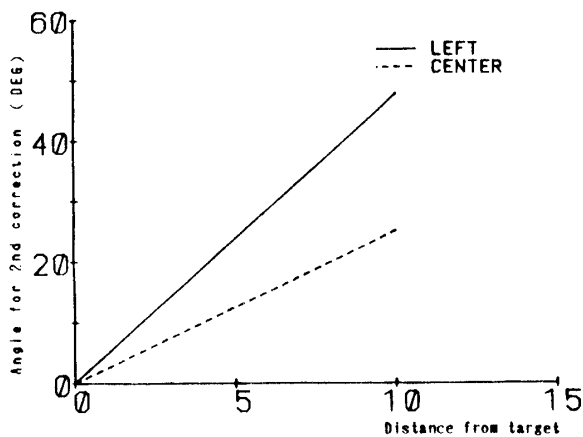


Fig. 10 Least-square approximations of relations between distance from target and angle for 2nd correction (beginner).

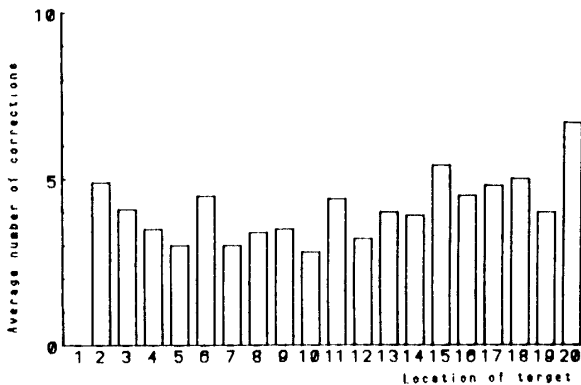


Fig. 11 Average number of corrections (beginner).

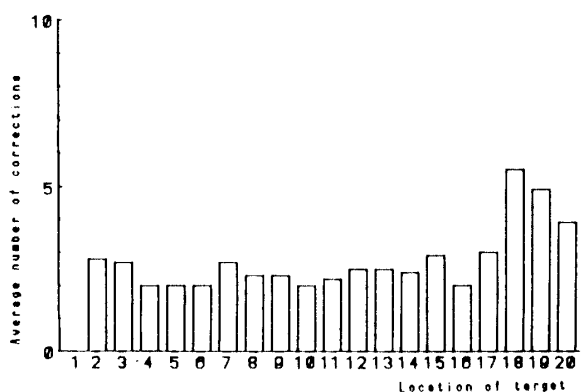


Fig. 12 Average number of corrections (expert).

置を区別していないのに対し、熟練者ははっきりと区別して、感覚を変えて修正角を入力していることがわかる。これらの結果からみても熟練者は初心者と違った知識を得ていると考えられる。

さて、初心者について、第二修正角と的からの距離の関係を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。初心者の知識と熟練者のそれとは、上述のような相違があるにもかかわらず、第二修正角については LEFT と CENTER の区別が熟練者に近づいている。これは、第一修正角によりその的に対する感覚が形成され、それによって第二修正角を入力しているからである。

さらに、的の出る位置に対する修正回数を、初心者と熟練者について比較したものが Fig. 11 と Fig. 12 である。熟練者の修正回数が少ないのは確かであるが、両者に共通して的の位置による当たりにくさがあるように思われる。つまり、的の位置が 2 や 3 とか 18 から 20 にかけてなどは修正回数が多くなっていることから、当たりにくく考えられる。

以上のことより、初心者は熟練者に比べて修正回数が多くなるものの、その的の位置での修正角を帰納的に求める事ができる。熟練者になると、感覚だけではなく、的のある位置を理解し、知識を使い分ける事ができると言える。

4.2 コンピュータシステムの場合の解析

コンピュータによる的当てシステムは、人間が行う場合よりかなり正確な数値を扱うことができる。このシステムには、初期入力角の形成、的までの距離の判断、その修正に必要な感覚が全て備わっている。

従って、このシステムでは、第一修正角から LEFT と CENTER を区別して修正を行い、結果的に熟練者の修正方法と似たものとなる。これを示すのが Fig. 13 で、熟練者の結果に近いものとなっている。

さて、的の位置における当たるまでの平均修正回数をとったものが Fig. 14 である。初心者の場合と比べると、修正に必要な回数が少なく、熟練者と同レベルといえる。また、LEFT と CENTER の範囲における中央付近において、平均修正回数が少なくなっている。これは、初期入力角がその付近に収束する事と関係している。

したがって、コンピュータシステムにおいて、初期入力角着弾点に近い位置は当たり易いが、遠くなると当たりにくくなるといえる。

また、Fig. 14 において的が 17~20 の位置では、的に当たらないことがある。システムの問題点として、修正回数が多い所があるだけでなく、修正不能となるこ

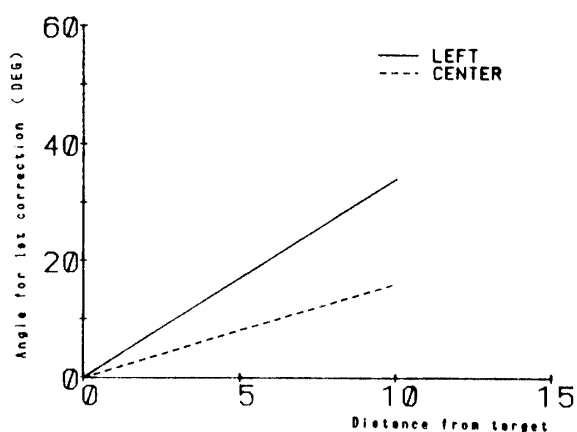


Fig. 13 Least-square approximations of relations between distance from the target and the angle for 1st correction (computer).

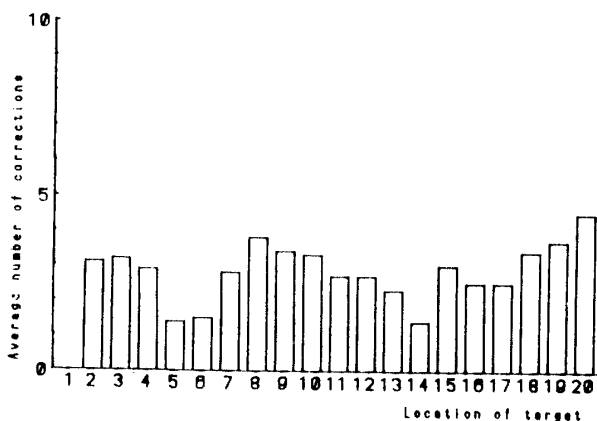


Fig. 14 Average number of corrections (computer).

とがある事があげられる。

5. 知識の管理と運用

5.1 階層構造

非線形な対象を取り扱う場合、前節で述べたコンピュータシステムにおいても、認識、感覚の形成、それに伴う知識の運用について、必ずしも適当と思われない行動をとる事がある。コンピュータに記憶している知識「IF (A) THEN (B)」に当てはまらない事態が起こった時、何らかの混乱が起こっているの、別の知識を使う手段を持っていないと修正不能に陥ってしまう。

的当てシミュレーションをコンピュータシステムに行なわせる場合、標的と初期入力角による着弾点が近いほど当たり易いと言えたから、初期値を変えると

う方策も考えられる。しかし、この値2節で述べたような手法を用いて導くためには、知識が状況によって整理されている必要がある。

今、的との距離が“SHO”であることを CONTEXT (SHO) と表現すると、一般に CONTEXT を特定することよなつて(例えば CONTEXT=LEFT)始めて、感覚としての“SHO”を決める事ができる。感覚が形成されれば、それによって使う知識が限定されるから、CONTEXT によって知識が決まると考えてよい。したがって条件文を用いて表現すると次式のようになる。

IF (CONTEXT) THEN (知識) (15)

しかし、以上に述べた CONTEXT によって形成される感覚はあいまいなものなので、知識もある程度の範囲を持つことになる。こういったあいまいさは、コンピュータに管理を行なわせる時に混乱を招く原因となりうる。従つて、経験によって感覚を形成していくシステムでは、CONTEXT を組み合わせて範囲を限定してやらなければならない。CONTEXT を、知識を含む集合と考えると、例えば次のような事が考えられる。

象を運ぼうとする時、「象は重いから大変だ」と考えるならば、「象の重さ」という要素は「重い」という抽象的な感覚に含まれるが、「重い物」=「象の重さ」ではない。「重さ」を「動物の体重」という CONTEXT で制限して初めて、「象の重さ」が確定される。以上のように考えていくと、最終的な CONTEXT に要素を含ませ、幾つかの CONTEXT によって状況を限定すれば、管理が容易になる。

知識の構造について、上述の CONTEXT と同様にするには、階層構造を用いるのが適当と思われる。この場合も、実際のデータが記憶されるのは最下層だけで、その他の層の名は管理上の名前として扱う。このような階層状の知識をつくりあげるためには、MS-DOS を利用すると具合が良い。人間の持っている知識を階層状と考えて、種々の知識を位置づけてみると Fig. 15 のようになる。

この階層構造において、最下層をファイル名、その他をディレクトリ名とするが、CONTEXT によってさらに細かく知識を分ける場合は、現在のファイル名をディレクトリとして、その下に階層状のファイルをつくるものとする。

このような知識ファイルが存在する時、すべての知識は、利用手引によって効率的に管理することができる。

作業を続けていると、既存のファイルに当てはまらない新しい知識を得ることも考えられる。そういう時には、その知識を記憶しておくための新しいファイル

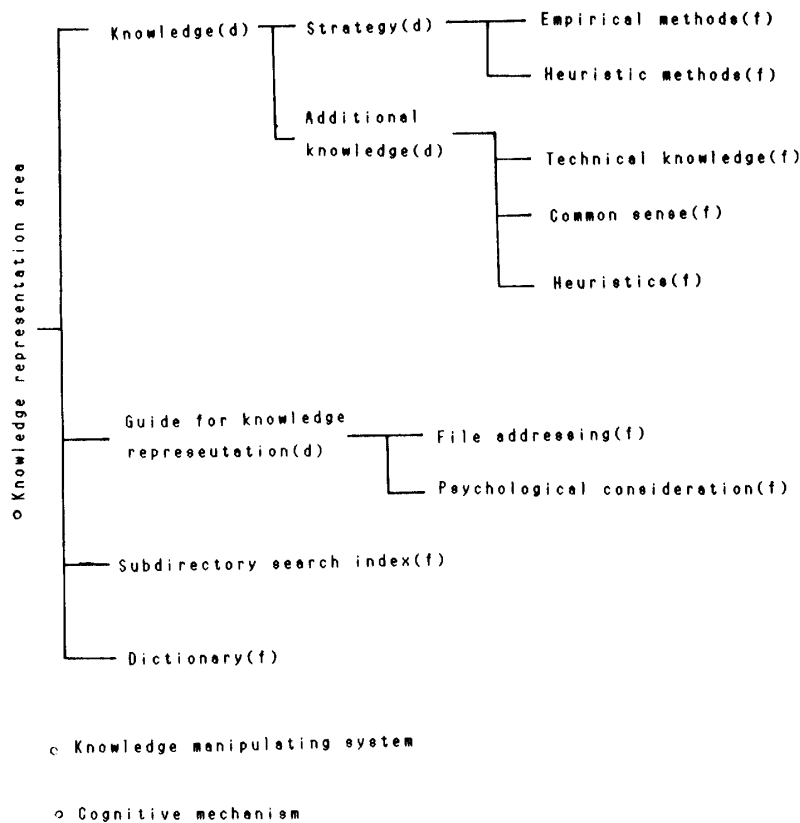


Fig. 15 Hierarchical knowledge structure.

をつくってやらなければならないが、知識を階層化してあると、既存のファイルの中にうまく組み入れることができる。またMS-DOSには、ファイルとかディレクトリを新規につくるコマンドが用意されているので、その意味でMS-DOSがうまく適用できる。

5.2 システムにおける知識構造

的当てシュミレーションをするコンピュータシステムが使う知識を、前に述べた階層構造にしたものがFig. 15のディスクBの部分になる。実際に利用する知識は、現在のシステムにおいて経験的知識だけなので、図における知識Aというディレクトリ名がこれに当たる。データの保存されているファイルは、最下層でCONTEXTによりまとめられている。従って、CONTEXTが決まれば、使う知識をディレクトリ単位で指定することができる。逆に、そのディレクトリに含まれるファイルは共通性がある、互いに利用できるものもあると考えられる。

このような考えをもとに、システムに必要な知識をディレクトリ単位で結合した例がFig. 15のディスクAに示してある。システムとしては、今までと同じ感覚で知識ファイルを利用できるだけでなく、方策さえ決

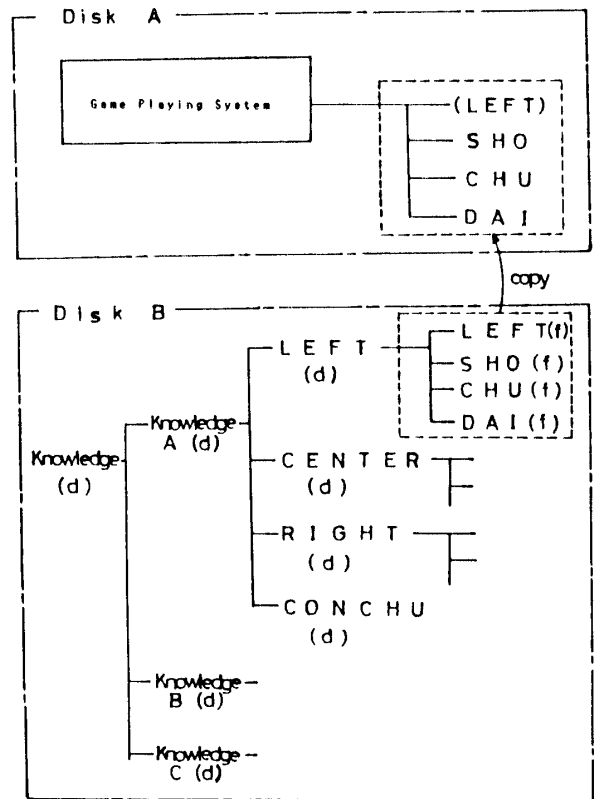


Fig. 16 Knowledge in the context specified.

めておけば、厳密に当てはまらないファイルの情報も利用できるよになっている。

6. 結 言

切削加工の作業を的当てシミュレーションに置き換えて、人間とコンピュータシステムの動作を検討することで、人間の特性と既存のシステムの問題点が明らかになった。そして、システムが正確な数値計算を行っているにもかかわらず、修正不能となるのは知識を管理する機能がないからだと結論付けた。

そこで、人間の持っている知識を階層状に位置づけ、システムで使う知識との関連付けを行った。

そして、階層状の知識の管理法をシステムに加えることで、知識の運用の拡大を図った。

従って、これらの新しいシステムは、より少ない知識で複雑な対象をコントロールできるようになったと言える。

参 考 文 献

- 1) 友貞賢二：切削加工における状態監視について，修士論文
- 2) 酒井義郎：人間—機械系における人間的要素について，第一回インテリジェントFAシンポジウム講演論文集
- 3) 酒井義郎・友貞賢二：切削加工における状態監視システムについて，日本機械学会論文集第485号C編

(昭和63年4月15日受理)