人の知覚特性にもとづいたマスター-スレーブのスケーリング則と必要条件[†]

山 川 聡 子*・藤 本 英 雄*

A Scaling Method and Necessary Conditions of Master-slave Systems Based on Human Abilities of Perception[†]

Satoko YAMAKAWA* and Hideo FUJIMOTO*

In many cases, the scaling method and its scaling ratio in a master-slave system are selected only according to the mechanical or physical characteristics of the system. However, if the human abilities are ignored in scaling methods, the range of the displayed information may be unsuitable for the perception abilities of operators and they may miss important information. In this paper, a scaling method is proposed based on human abilities of perception such as differential limen and magnitude estimation. We derive the necessary conditions for the scaling method so that operators can perceive the changes of stimuli generated at the slave side and can feel the same change rate of stimuli as the rate of practical stimuli observed at the slave side. These necessary conditions are derived under the assumptions that Weber's law and Stevens's law, which are famous laws in the field of psychology, are satisfied. The abilities of perceiving force at fingertips are measured and the measurement results confirm these assumptions. The proposed scaling method is examined by using the measurement data.

Key Words: master-slave system, scaling method, human ability of perception, magnitude estimation, necessary conditions

1. はじめに

人は多くの作業をするときに映像や音、それに作業反力などの刺激を知覚してフィードバック制御を行なう。マスター-スレーブシステムを用いて作業を行なう場合も同様である。マスター-スレーブシステムを用いると、装置の特性である時間遅れや減衰などによって、スレーブ側で生じた情報とマスター側で操作者に提示する刺激に差が生じる。一方で、積極的に力や映像の大きさを変えて操作者へ提示することで、作業支援を行なうことが考えられる。たとえば、微細作業ではスレーブ側で発生する作業反力は知覚できないほど小さいので、人が知覚できる大きさに拡大してマスター側で提示する。このような拡大または縮小をスケーリングという。スケーリングの方法についてはいくつかの手法・評価法が研究されている^{1)~5)}。

スケーリングにおいて、提示量を決定するスケーリング比を選ぶことは重要である。スケーリング比とは、スレーブ側で測定された情報に対するマスター側での提示刺激の比である。たとえば、マスター装置とスレーブ装置のサイズや固有振

動数にもとづいてスケーリング比を選ぶ方法がある^{3)~5)}。しかし、マスター-スレーブシステムのような人間機械系において、装置の特性のみに依存してスケーリング比を選ぶのは好ましくない。機械システムとしての機能は十分でも、マスター側で提示した刺激を操作者が知覚できないかもしれない。そのため、人の知覚特性を考慮してスケーリング比を選ぶことが望ましい。

人が知覚できるようにスケーリング比を決定するためには、あらかじめ人の知覚特性を調べる必要がある。心理学分野をはじめ、多くの知覚特性の測定が行なわれている^{6)~10)}。筆者らも力の大きさの変化に注目し、力覚特性の一つである弁別閾測定を行なっている¹¹⁾。力の弁別閾とは知覚可能な最小の力の変化量である。一般に弁別閾は刺激の大きさの関数になるといわれており¹²⁾、筆者らも同様の結果を確認している。この弁別閾の測定結果にもとづいて、力の変化が知覚可能となるためのスケーリング係数の条件を導いた¹³⁾。

本稿では、さらに操作者がその変化をどう感じているかという「感覚量」に注目する。提示される刺激が変化した場合、人が感じる変化が実際の刺激変化と一致しているとは限らない。変化を実際よりも小さく感じることで、操作者が必要以上の操作力を加えたり、逆に大きく感じることで操作が不十分になったりするかもしれない。人が感じる「感覚量」と実際の刺激変化との関係を表わす近似式は、Fechner や

[†] 第8回ロボティクスシンポジウムで発表 (2003・3)

* 名古屋工業大学 名古屋市昭和区御器所町

* Nagoya Institute of Technology

(Received June 16, 2003)

(Revised October 23, 2003)

Stevens などによって導かれている¹²⁾。本稿では、「スレーブ側で発生した刺激変化が知覚できる」ことに加え、「マスタ側で操作者が感じる感覚量の変化率を調整する」ためのスケーリング則を提案し、スケーリングの必要条件を導出する。

まず、第2章では準備としてマスター-スレーブシステムにおける知覚特性の位置づけを述べる。その後、人の知覚特性を表わす閾値と感覚量を説明する。つぎに、第3章では、感覚量が Stevens の法則に従うという仮定の下で、操作者が感じる感覚量の変化を調整するスケーリング則を提案する。これはスレーブで発生した刺激の非線形なスケーリング則となる。提案したスケーリング則を用いた場合に、変化が知覚できるためのスケーリングの必要条件を導出する。この条件は、弁別閾にもとづいて導出される。第4章では指先での力覚特性の測定結果を述べる。弾性係数を刺激として感覚量の測定を行なった結果を述べる。Stevens の法則が成り立っており、実際の刺激に対して感覚量が非線形に変化することを確認する。第5章でこの測定結果にもとづいて、第3章で示したスケーリング則と必要条件を計算し、考察を行なう。

2. マスター-スレーブシステムにおける人の知覚特性

2.1 知覚特性の位置づけ

マスター-スレーブシステムの利点として、遠隔地や危険な場所にあつて直接操作できない対象物を操作可能にすることがあげられる。この点に対しては、マスタ装置とスレーブ装置が一对一で正確に時間遅れなく動くことが一つの理想となる。そのためには、まずシステムが壊れることなく安定に動くことが前提となる。安定性については、たとえば、受動性にもとづいてバイラテラル制御を用いたマスター-スレーブシステムの安定性が解析されている^{14),15)}。一方、通信の時間遅れを変動とみなし、H_∞制御によって補償しているコントローラ設計も報告されている¹⁶⁾。

システムの安定性が確保されると、操作や作業の内容に応じて即応性や追従性といったパフォーマンスの向上が図られる。マスター-スレーブ装置や操作対象が持つダイナミクスを考慮し、人の操作指令信号に対してスレーブ装置が正確に遅れなく追従するように制御系が調整される。システムの周波数特性の解析やシミュレーション、実験による考察がなされている¹⁵⁾。

一方、積極的に操作力やセンサ情報の大きさを拡大・縮小するスケーリングを行なう場合がある。スケーリングを行なうことで、そのままの大きさでは人が扱えないような巨大クレーンの操作や微細作業が可能になる。さらに、作業負担の軽減や操作性の向上が期待できる。たとえば、スレーブ側で発生した微小な力をマスタ側で拡大して提示することで、スケーリング前は知覚できなかった力を知覚できるようになり、操作しやすくなる。このような操作性の向上には、人の運動能力・力学的特性や知覚特性にもとづいたシステム設計が必要となる。たとえば、運動特性に関しては人の機構的な

Fig. 1 The design requirements and the ingredients of master slave systems

制約にもとづき、マニピュレータ操作において操作力を発生させやすい範囲や姿勢が研究されている¹⁷⁾。

以上の要素を Fig. 1 に表わす。階層が下になるほど基本的な条件であると考えられる。たとえば、操作性の向上には、即応性や安定性といった機械システムとしての特性が満たされていることが前提となるであろう。

これらの要素間の関係として、パフォーマンスと安定性のトレードオフが研究されている¹⁸⁾。また、あるコントローラを用いた場合は、スケーリング係数をどう選んでも安定性が保証されるという結果が得られている¹⁵⁾。しかし、別の制御方式を用いた場合では、スケーリングによって安定化できるゲインの範囲が減少することがわかっている¹⁹⁾。また、スケーリングが即応性などの性能にどう影響するかはまだ十分研究されているとはいえない。

力のスケーリング法としては、コンスタントスケーリング、インピーダンススケーリングなどの手法が提案されている²⁾。しかし、これまでスケーリング係数は、装置のサイズや固有振動数などに依存して決定されており^{4),5)}、人の知覚特性はほとんど考慮されていない。そこで、本稿では知覚特性を考慮してスケーリング問題を取り扱う。

人の知覚には、①刺激が存在しているかどうか、②刺激が変化したかどうか、③刺激がどの程度の大きさだと感じるか、がある。それぞれに対応して、絶対閾、弁別閾、および感覚量が定義されている。これらの知覚特性については心理学測定分野で古くから研究が行なわれており、いくつかの法則が得られている²⁰⁾。そこで、これらの一般的な法則にもとづいて、人の知覚特性を考慮した場合のマスター-スレーブシステムのスケーリング則を提案する。さらに、知覚特性から導かれる必要条件を明らかにする。そのために、まず、知覚特性に関する法則を説明する。

2.2 弁別閾と感覚量

人の知覚特性として、本研究では閾値と感覚量に注目する。閾値には、力の存在がわかる最も小さな値(絶対閾)と、知覚できる最も小さな変化量(弁別閾)がある。弁別閾は一般に基準となる標準刺激の増加関数であることが知られている。特に、弁別閾が標準刺激に比例して増加するという Weber の法則が知られている¹²⁾。

$$K_w = \frac{D(P)}{P} \quad (1)$$

ここで、 K_w は定数、 P は標準刺激、 $D(P)$ は標準刺激が P

のときの弁別閾である。たとえば、触振動感覚では $K_w = 0.4$ という測定結果が報告されている²¹⁾。

刺激変化を感じたとき、人が感じた値が実際に加えられた刺激量と一致するとは限らない。人が感じた値を感覚量と呼ぶ。感覚量の法則には大きく分けて2つの法則が知られている。まず、Weberの法則にもとづいて解析的に導出したFechnerの法則である。Fechnerの法則では、感覚量 R は刺激 P のべき関数として近似される。

$$R = a \log P + b, \quad a, b \text{ 定数} \quad (2)$$

これに対して、より実験的な大距離決定法から導かれたべき関数を用いた法則がある。特に経験的な近似則としてStevensのべき法則が提唱されている²³⁾。

$$R = K_s P^n \quad (3)$$

ここで、 K_s , n は定数であり、 n は刺激や操作の内容によって異なる。たとえば、音の強さでは $n=0.6$ 、掌での静止圧では $n=1.1$ 、握力については $n=1.7$ などの測定データが示されている^{20), 22)}。

注1) Fechnerの法則は近似が妥当な範囲が狭いことが指摘されている²⁰⁾。たとえば、Stevensの法則(3)で $n < 1$ の関係は、Fechnerの法則に従って対数関数を用いてもある程度は近似できる。しかし、 $n > 1$ の関係は対数関数では表わすことができない。□

次章では、適用範囲が比較的広いStevensの法則にもとづき、感覚量が(3)式で近似されるとして議論を進める。

3. 知覚特性とスケール条件

以下では、説明のために知覚特性の一つである力覚に注目し、力覚スケール条件と条件を導出する。なお、本章で示す結果は、WeberやStevensの法則が成立するほかの知覚特性に対しても同様に成り立つ。

本稿では、スレーブ側の反力測定やマスタ側での力提示に時間遅れや計算誤差がない理想状態でのスケール条件を求める。すなわち、マスタ側の提示力 f_m が、スレーブ側の力 f_s を用いてつぎの式で得られる場合を取り扱う。

$$f_m = l(f_s) f_s \quad (4)$$

ここで、 $l(f_s) \geq 0$ はスケール比であり、 f_s の関数である。

3.1 知覚可能にするための条件

まず、閾値に注目し、操作者が提示された力や力の変化を知覚できるための必要条件を求める。

絶対閾：絶対閾を $D(0)$ とする。スレーブ側で反力 $\Delta f_s > 0$ が生じているとき、マスタ側の提示力を Δf_m とする。マスタ側で操作者が反力の存在を知覚するためには、この Δf_m の大きさが操作者の絶対閾以上であることが必要である。このことは、(4)式より、

$$|\Delta f_m| = l(\Delta f_s) |\Delta f_s| \geq D(0) \quad (5)$$

と表わされる。すなわち、スケール比の必要条件として、

$$l(\Delta f_s) \geq \frac{D(0)}{|\Delta f_s|} \quad (6)$$

が得られる。

弁別閾：Weberの法則にもとづいて、マスタ側の力 f_m に対する弁別閾 $D(f_m)$ がつぎのように直線近似できる範囲を取り扱う。

$$D(f_m) = a_0 + a_1 f_m \quad (7)$$

ただし、弁別閾は基準となる力 f_m の非減少関数とし、 $a_0 > 0$, $a_1 \geq 0$ とする。

スレーブ側の作業反力が f_s から $f_s + \Delta f_s$ に変化したとき、対応するマスタ側での提示力をそれぞれ f_m , $f_m + \Delta f_m$ とする。弁別閾が(7)式で与えられているとき、マスタ側で力変化を知覚するための条件はつぎのとおりである。

$$|(f_m + \Delta f_m) - f_m| \geq a_0 + a_1 f_m \quad (8)$$

これに、(4)式を代入すると f_s の条件となる。

$$|l(f_s + \Delta f_s)(f_s + \Delta f_s) - l(f_s)f_s| \geq a_0 + a_1 l(f_s)f_s \quad (9)$$

(7)式が $f_m = 0$ でも成り立つならば、 $D(0) = a_0$ となり、絶対閾に関する条件(5)は(9)式に含まれる。

特にコンスタントスケールリング、 $l(f_s) = l = \text{const.}$ の場合はつぎの結果が得られる¹³⁾。

《スケールリングの必要条件》 弁別閾が(7)式で与えられているとする。このとき、スレーブ側の力 f_s に対して変化量 Δf_s が、

$$(|\Delta f_s| - a_1 f_s) > 0 \quad (10)$$

を満たすことが、コンスタントスケールリングによって力の変化を知覚可能にするための必要条件である。□

《スケールリング比の条件》 スレーブ側の力の変化量 Δf_s が(10)式を満たすとする。このとき、コンスタントスケールリングによって変化を知覚可能にするためのスケールリング比 l の条件は、

$$l \geq \frac{a_0}{|\Delta f_s| - a_1 f_s} \quad (11)$$

である。□

注2) (11)式の右辺は $|\Delta f_s|$ の減少関数である。したがって、 $|\Delta f_s| = |\Delta f_{s \min}|$ に対して(11)式を満たす l を用いれば、変化量 $|\Delta f_s| \geq |\Delta f_{s \min}|$ を知覚可能にできる。

3.2 感覚量を合わせるスケールリング

コンスタントスケールリング法では、スレーブ側での反力を一定の比率で拡大・縮小して操作者に提示する。しかし、このとき、人が実際に一定の比率で感じているとは限らない。たとえば、(3)式において、 $n > 1$ の場合、提示された刺激が大きいくほど、実際の変化率に比べて、感覚量の変化はとて大きくなる。すなわち、実際の提示力が2倍になっても、人は2倍以上に大きくなったと感じる。逆に $n < 1$ では、提示力の変化率よりも小さな変化率だと感じ、操作者は必要以上に操作力を増加させてしまうかもしれない。そこで、人の感覚量の特性にもとづいたスケールリングを行ない、人が感じる感覚量を調整するようにマスタ側で力提示をすることを考える。以下では、スレーブ側での反力の変化率と、操作者の

感覚量の変化率を一致させるスケーリング則を導く。これにより、スレーブ側での発生力が倍になったら、マスタ側で操作者は力が倍になったと感じることができる。

スレーブ側での基準の力を $\bar{f}_s$ とし、このときの提示力を $\bar{f}_m$ とする。人の感覚量が Stevens のべき法則に従うとすると、感覚量 $\bar{R}$ は、

$$\begin{aligned}\bar{R} &= K_S \bar{f}_m^n \\ &= K_S (l(\bar{f}_s) \bar{f}_s)^n\end{aligned}\quad (12)$$

である。スレーブ側の力が f_s に変化したときの感覚量 R は、

$$R = K_S (l(f_s) f_s)^n \quad (13)$$

である。スレーブ側での発生力の変化率と、操作者の感覚量の変化率が等しくなるとは、

$$\frac{R}{\bar{R}} = \frac{f_s}{\bar{f}_s}, \quad \left(\Leftrightarrow \frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} = \frac{f_s - \bar{f}_s}{\bar{f}_s} \right) \quad (14)$$

を満たすことである。(12)～(14)式より、スケーリング係数 $l(f_s)$ は、基準力 $\bar{f}_s$ と $l(\bar{f}_s)$ を用いてつぎのように得られる。

$$\begin{aligned}\frac{K_S (l(f_s) f_s)^n}{K_S (l(\bar{f}_s) \bar{f}_s)^n} &= \frac{f_s}{\bar{f}_s} \\ l(f_s) &= l(\bar{f}_s) \left(\frac{f_s}{\bar{f}_s} \right)^{\frac{1}{n}-1}\end{aligned}\quad (15)$$

$\bar{f}_s$ と $l(\bar{f}_s)$ は定数であるので、(4)式と(15)式から以下のスケーリング則が得られる。

《感覚量を合わせるスケーリング則》 感覚量が Stevens のべき法則(3)を満たすとする。このとき、操作者の感覚量の変化率を、スレーブ側での発生力の変化率に一致させるスケーリング則は、

$$f_m = L f_s^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

である。 L は定数である。

注3) 係数 L は $f_s=1$ の場合に対する f_m の比であり、提示力の絶対的な大きさを左右する。

注4) (16)式のスケーリング則を用いるとき、(4)式で定義した f_m と f_s の間のスケーリング比 $l(f_s)$ は f_s の非線形関数、 $l(f_s) = L f_s^{\frac{1}{n}-1}$ となる。

注5) 特に、 $n=1$ の場合、(16)式はコンスタントスケーリングとなる。このときのスケーリング比は L である。

3.3 弁別閾と感覚量に関する条件の関係

$n=1$ の場合、(16)式はコンスタントスケーリングとなる。したがって、スケーリングの必要条件(10)を満たすとき、(11)式を満たす係数を選べば、変化量 Δf_s を知覚できて、感覚量の変化率も実際の力の変化率と等しくできる。

一方、 $n \neq 1$ の場合では、スケーリング比 $l(f_s)$ は、 f_s の値によって大きさが変わる。そこで、 $l(f_s)$ と弁別閾の関係に注意して、スケーリング則(16)を用いて変化量 Δf_s が知覚できるための必要条件を求める。

変化量を知覚できる条件(8)に、感覚量を合わせるスケーリング則(16)を代入する。

$$|L(f_s + \Delta f_s)^{\frac{1}{n}} - L f_s^{\frac{1}{n}}| \geq a_0 + a_1 L f_s^{\frac{1}{n}}$$

$$L f_s^{\frac{1}{n}} \left(\left| \left(\frac{f_s + \Delta f_s}{f_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right| - a_1 \right) \geq a_0 \quad (17)$$

ただし、スケーリングによって力の大小関係が反転しないように $L > 0$ としている。 $f_s > 0$, $a_0 > 0$ に注意すると、(17)式から、つぎの必要条件を得る。

《感覚量を合わせるスケーリングの必要条件》 弁別閾が(7)式で与えられているとする。このとき、スレーブ側の力 f_s に対して変化量 Δf_s が、

$$\left| \left(\frac{f_s + \Delta f_s}{f_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right| - a_1 > 0 \quad (18)$$

を満たすことが、スケーリング則(16)によって力の変化を知覚可能にするための必要条件である。

(18)式を満たすときのみ、(17)式を満たす L が存在する。このとき、係数 L の条件はつぎのように得られる。

《スケーリング係数 L の条件》 スレーブ側の力の変化量 Δf_s が(18)式を満たすとする。このとき、スケーリング則(16)によって変化を知覚可能にするためのスケーリング係数 L の条件は、

$$L \geq \frac{a_0}{\left(\left| \left(\frac{f_s + \Delta f_s}{f_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right| - a_1 \right) f_s^{\frac{1}{n}}} \quad (19)$$

である。

$n=1$ の場合は、(18)式は(10)式と等しい。一方、(19)式に $n=1$ を代入すれば、コンスタントスケーリングの場合の条件(11)が得られる。

注6) (19)式の右辺は Δf_s の絶対値に対して単調減少する。したがって、注2)同様、知覚させたい最小の変化量 $|\Delta f_s|$ に対して(19)式を満たす L を用いればよい。

スレーブ側での力が $f_{\min} \leq f_s \leq f_{\max}$ の範囲で変化する場合に、変化量 Δf_s を知覚可能にすることを考える。このとき、(19)式についてつぎの性質が得られる。

注7) $n > 1$ の場合、(19)式の右辺は f_s に対して単調増加である。一方、 $n < 1$ では f_s に関して下に凸の関数である。したがって、 f_s が最大または最小値であるときに右辺は最大値をとる。 $f_s = f_{\min}$, $f_{\max}$ に対して(19)式を満たす L を用いれば、 $f_{\min} \leq f_s \leq f_{\max}$ に対して Δf_s を知覚可能にできる。

次章以降では、指先における力覚特性の測定結果を用いて、以上で求めた条件を検討する。

4. 人の感覚特性の測定

4.1 弁別閾

文献11)に示す装置と方法で、指先に弾性力を提示し、弾性係数の変化に対する弁別閾測定を行なった結果を示す。

測定は、人差指と親指の2指間に一次元の力を提示できる自作の力提示装置(Fig. 2)を用いて行なった。この装置はコンピュータによる電圧制御を行なった電気モータを用いて指フォルダに開閉力を提示するものである。最大出力は5 [N]、分解能は0.05 [N]である。フォルダ間の最大開きは105 [mm]である。今回の測定では、指フォルダ間の間隔が

Fig. 2 Finger tip holders of force display equipment

Fig. 3 Measurement data of differential limen for elastic modulus

50 [mm] 以内の範囲において、力提示を行なった。

このシステムによって、人差指と親指で物をつまんだ状態をシミュレートして力を提示する。被験者は人差指と親指をそれぞれの指ホルダに差し込んで、指を開閉する。提示する力の向きは指ホルダが開く方向である。すなわち、被験者は指を縮めるときに反発力を感じる。

弁別閾は完全上下法を用いて測定した。完全上下法とは、極限法に分類される感覚測定法の一種で、弁別閾の測定によく用いられる方法である。この方法では、一定の大きさの標準刺激と、ある刻み幅で徐々に増加する比較刺激を交互に被験者に提示する。そして、標準刺激と比較刺激の大きさの違いがわかるかどうかを尋ねることで弁別閾を測定する¹²⁾。

本測定における刺激とは弾性係数の大きさである。 i 番目の測定点の標準刺激 k_i をつぎのように与えた。

$$k_i = 20 + 10 \times i \text{ [N/m]}, i = \{1, \dots, 6\} \quad (20)$$

Table 1 Approximated parameters a_0 and a_1 of linear function (21) for elastic modulus

subjects	a_0	a_1	standard deviation s_f	correlation coefficient r
a	0.55	0.17	0.91	0.97
b	1.8	0.14	0.89	0.96
c	0.61	0.18	1.1	0.96
d	2.8	0.13	0.65	0.97
e	8.3	0.089	1.1	0.85
f	6.3	0.10	0.93	0.92
g	6.6	0.077	1.3	0.79
average	3.9	0.13	0.98	0.92
standard deviation s	3.2	0.039	—	—

比較刺激は、各 k_i に対して $k_i - 20$ から $k_i + 20$ まで、刻み幅 2.0 [N/m] ずつ増やしなが提示した。

弾性係数についての平均弁別閾の測定結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、直観的に弁別閾は標準刺激の増加関数であると考えられる。そこで、標準刺激 k と弾性係数に対する弁別閾 D の関係を (7) 式のように、

$$D(k) = a_0 + a_1 k \quad (21)$$

で直線近似する。各被検者ごとに得られたパラメータ a_0 , a_1 を Table 1 に示す。相関係数 r は最も値が小さかった被検者 g でも 0.79 である。この結果は弁別閾が標準刺激の増加関数であることを肯定している。Table 1 の下段に 7 人の被検者の平均値と標準偏差を示す。個人差は主に切片である a_0 に強く表われているといえる。7 人の平均値を計算した弁別閾の近似式は以下のとおりである。

$$D(k) = 3.9 + 0.13k \text{ [N/m]} \quad (22)$$

4.2 感覚量

感覚量を Stevens が提唱する比例評価にもとづいて測定した。この方法は主観的感覚強度を測定する方法である。大きさが既知である n 個の刺激を用意して、被験者にランダムな順序で 1 つずつ提示する。そして、被験者に、1 つ目を基準として 2 つ目以降に感覚上の比例関係に従って自由に数値をつけさせる²³⁾。

弁別閾の測定と同じく、刺激は弾性係数とした。今回の測定では弾性係数が異なる丸線コイルバネ 6 個を用いた。これらのバネの自然長は 35 mm、バネ径は 10 mm であり、弾性係数はそれぞれ、0.2 [kN/m], 0.3 [kN/m], 0.5 [kN/m], 1.0 [kN/m], 2.0 [kN/m], 3.0 [kN/m] である。被験者には弾性係数の値を知らせずに、弾性定数が異なる 2 つのバネを人差指と親指でつまんで指を開閉してもらう。そして、被験者自身が感じた弾性係数の比(バネの硬さ)に数字をつけて答えてもらう。6 人の 20 代前半の男性被験者に対して測定を行なった。測定の結果、実際の刺激と感覚量は線形の関係ではなかった。(3) 式は、

$$\log(R) = n \log(P) + \log(K_s) \quad (23)$$

と書き直すことができる。そこで、両対数グラフに測定結果

Fig. 4 Magnitude estimation of elastic modulus

Table 2 Measurement data of magnitude estimation of elastic modulus

subjects	n	standard deviation s_f	correlation coefficient r
A	1.4	0.047	1.0
B	1.3	0.12	0.98
C	1.4	0.053	1.0
D	0.9	0.10	0.98
E	0.8	0.083	0.98
F	0.9	0.099	0.98

をプロットする (Fig. 4). Fig. 4におけるグラフの傾きがべき定数 n となる. 比率を答えてもらう測定であるので, 絶対的な値に意味はない. したがって, Fig. 4では最大刺激 3.0 [kN/m] の場合が1となるように定数倍し, 感覚量の比率のスケールを合わせた.

Fig. 4において, $\log(R)$ と $\log(P)$ の相関係数を求めた. 被験者ごとにみると Table 2 に示すように相関係数は 0.98 以上であり, 直線近似をしても妥当だと考えられる. すなわち, 本測定の範囲において, Stevens の法則が成り立っていることが確認できた. ただし, 係数 n の値には個人差があり, 結果として平均が $n=1.4$ と $n=0.9$ の2グループに分かれた. 感覚量は弁別閾に比べて, 個人差が大きい結果といえる. したがって, 実際の操作を行なうグループの構成員および提示力の範囲に合わせて, より限定された測定を行なう必要があるだろう.

5. 考 察

5.1 測定結果にもとづいたスケーリング則と条件

前章で示した弾性係数に対する知覚特性の測定結果は, 第3章で用いた仮定(3), (7)を満たしている. そこで, 測定結果を用いて, 提案したスケーリング則とスケーリングの必要条件を考察する.

たとえば, マスタ-スレーブを用いた手術を考えた場合, 血管や皮膚などの部位によって弾性係数や粘性係数が異なる.

そこで, ここでは弾性係数が異なる弾性体対象物があるときに, その違いを知覚させることを考える.

スレーブ側での力と位置を, マスタ側でそれぞれ, l_f 倍, l_x 倍して提示するとする.

$$f_m = l_f f_s \quad (24)$$

$$x_m = l_x x_s \quad (25)$$

x_m , x_s はそれぞれマスタとスレーブ側での位置である. マスタ, スレーブ側での弾性力の弾性係数をそれぞれ k_s , k_m とすると,

$$f_s = k_s x_s \quad (26)$$

$$f_m = k_m x_m \quad (27)$$

である. (24)式に(25)~(27)式を代入すると,

$$k_m = \frac{l_f}{l_x} k_s$$

となる. すなわち,

$$l(k_s) = l_f / l_x \quad (28)$$

というスケーリング比で, 見かけ上, 弾性係数がスケーリングされたことになる.

注8) 一定力を提示するのとは異なり, 位置や時間に依存して変化する力の弁別閾を測定することは困難である. 弾性体に対しては, 弾性係数に対する弁別閾を計測して $l(k_s)$ を求め, (28)式を満たす l_f , l_x を決定することは一つの手段であろう.

ここで, つぎの例を考える.

《例》 スレーブ側での弾性係数が $20 \text{ [N/m]} < k_s < 30 \text{ [N/m]}$ の範囲で変化量 $|\Delta k_s| \geq 6.0 \text{ [N/m]}$ が生じたときに, これをマスタ側で知覚させるスケーリングの条件と係数を求めよ.

□

測定結果である $n=1.4$, 0.9 の場合について係数 L の条件を求める. k_m の弁別閾は(22)式を用いる. $|\Delta k_s| \geq 6.0 \text{ [N/m]}$ を弁別可能にするためのスケーリング係数 L の範囲を Fig. 5 に示す. たとえば, $n=1.4$ のとき, (19)式の右辺は, $\Delta k_s = -6 \text{ [N/m]}$ の場合よりも $\Delta k_s = +6 \text{ [N/m]}$ の場合に大きい. したがって, (19)式に $\Delta k_s = +6 \text{ [N/m]}$ を用いた場合が L の下限値を表わす関数となる. それぞれ, Fig. 5 に示した曲線の上部分が L の範囲である. 斜線部が $n=1.4$ の場合に条件を満たす L の範囲であり, $k_s = 30 \text{ [N/m]}$ のとき, $L_{\min} = 37.8$ である. 一方, $n=0.9$ $\Delta k_s = -6 \text{ [N/m]}$ においては $L_{\min} = 0.99$ である. 係数の条件(19)を満たす L の範囲は n が大きいほど狭くなっている.

$n=1.4$ の場合の曲線は, 漸近線 $k_s = 32.15$ を持つ. この漸近線は条件(18)に対応し, $k_s > 32.15$ において変化量 $|\Delta k_s| = 6.0 \text{ [N/m]}$ を知覚可能にする係数 L が存在しないことを示している. この必要条件(18)を満たす k_s の最大値は n が大きいほど小さく, 変化量 $|\Delta k_s| = 6.0 \text{ [N/m]}$ を知覚させるににくい.

このスケーリング則を用いた場合のスケーリングされた k_m を Fig. 6 に示す. Fig. 6 では, n が 0.9 , 1.0 , 1.4 において, スレーブ側の刺激 k_s が 30 [N/m] のときに等しく

Fig. 5 Permitted values of scaling coefficient L for perceiving $\Delta k_s = 6.0$ [N/m]

Fig. 6 Non-linearity of the scaling ratio of proposed method (16)

Table 3 Standard stimulus k_m and its change Δk_m which are scaled up by using the proposed method with $L=38.0$

k_s [N/m]	$k_m = LK_s^{\frac{1}{n}}$ [N/m]	Δk_m [N/m]
24	367.8	63.6
30	431.4	0
36	491.4	60.0

$L(30)=14.4$ になるように係数 L を選んだ。スケーリング則 (16) を用いると、 $n=1.4$ では k_s が大きいほどスケーリング比が小さくなる。このため、 $n=1.4$ では、刺激を拡大した場合、刺激の差はコンスタントスケーリングの場合よりも小さくなる。その結果、変化量を知覚させにくくなり、係数 L の下限値が大きくなると考えられる。

最後に確認のため、 $n=1.4$ のときに $L=38.0$ と選び、 $k_s=30$ [N/m] から ± 6.0 [N/m] 変化した場合に、スケーリング後の k_m を計算した (Table 3)。(22)式が成り立つとすると、 $k_s=30$ [N/m] のときの弁別閾は、

$$D(k_m) = 3.9 + 0.13 \times (38 \times 30^{\frac{1}{1.4}})$$

$$= 60.0 \text{ [N/m]} \quad (29)$$

である。Table 3 より、スケーリング後の変化量 Δk_m は 60.0 [N/m] 以上であるので、弁別閾が (22) 式で表わされる場合、知覚可能である。

5.2 ばらつきに関する考察

Fig. 3, Fig. 4 からわかるように、心理測定の結果には個人差や状況によるばらつきがある。そのため、実際にはこれらのばらつきを考慮して、スケーリング則の調整を行なうことが必要となる。たとえば、弁別閾については、システムを用いるグループの中で最も大きな弁別閾に対してスケーリング条件を求めることが考えられる¹³⁾。一方、感覚量についてはグループの平均値をとることが一つの方法として考えられる。

また、測定結果は測定範囲や測定条件によっても異なることが考えられる。したがって、実際の作業で想定される基準刺激の範囲や状況に合わせて測定を行なう必要があると考えられる。

6. おわりに

本稿では、マスター-スレーブシステムにおける知覚特性を考慮したスケーリングを取り扱った。知覚特性を考慮することは、特に微細作業などの人の感覚が重要になる作業において操作性を向上させる効果があると考えられる。

人の知覚特性として弁別閾と感覚量に注目した。感覚量が Stevens のべき法則に従う場合に、マスタ側で操作者が感じる感覚量の変化率を調整するスケーリング則を提案した。さらに、弁別閾が Weber の法則を満たす場合に、提案したスケーリング則を用いて、スレーブ側で発生した刺激の変化を知覚可能にするための必要条件を導いた。

指先における力の弁別閾測定を行なった結果、弁別閾と感覚量がそれぞれ、Weber の法則と Stevens の法則に従っていることを確かめた。そこで、これらの測定結果を用いて、提案したスケーリング則についての考察を行なった。

謝辞 本研究の一部は科学研究費(課題番号 15760170, 13450102)、および堀情報科学振興財団の研究助成のもとで行なわれた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M. Goldfarb: Dimension Analysis and Selective Distortion in Scaled Bilateral Telemanipulation, *Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 1609/1614 (1998)
- 2) 渡嘉敷, P. AKELLA, 谷江: マクロ-マイクロテレオペレーションにおけるスケーリング則の評価, 日本機械学会論文集, C-63-605, 141/149 (1997)
- 3) Y. Yokokohji, N. Hosotani and T. Yoshikawa: Analysis of maneuverability and stability of Micro-teleoperation systems, *Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 237/243 (1994)
- 4) N. Kobayashi: A Scaled teleoperation-time scaling problem, *Advanced Robotics* 8-2, 173/183 (1994)
- 5) J. E. Colgate: Power and impedance scaling in bilateral manipulation, *Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 2292/2297 (1991)

- 6) G. C. Burdea: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons, INC. (1996)
- 7) R. A. Grupen, T. C. Henderson and I. D. McCammon: A Survey of General Purpose Manipulation, *Inter. Jour. of Robotics Research*, 8-1, 38/62 (1989)
- 8) L. A. Jones and I. W. Hunter: A Perceptual Analysis of Viscosity, *Experimental Brain Research*, 94, 343/351 (1993)
- 9) H. Z. Tan, N. I. Duriach, G. L. Beauregard and M. A. Srinivasan: Manual discrimination of compliance using active pinch grasp, *Perception and Psychophysics*, 57-4, 495/510 (1995)
- 10) G. L. Beauregard and M. A. Srinivasan and N. I. Duriach: The Manual resolution of Viscosity and Mass, *Proc of the ASME Dynamic and control division*, 57-2, 657/662 (1995)
- 11) 藤本, 山川, 真鍋: 指先における一定力と弾性力に対する弁別閾測定, ヒューマンインターフェース学会論文集, 2-4, 341/346 (2000)
- 12) 市川伸一: 心理測定法への招待, サイエンス社 (1991)
- 13) 藤本, 山川, 真鍋: マスタースレーブにおける弁別閾を考慮した力のスケーリング, 日本ロボット学会誌, 19-3, 118/123 (2000)
- 14) R. J. Anderson and M. W. Spong: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Trans. on Automat. And Contr.*, 34-5, 494/501 (1989)
- 15) 横小路, 吉川: 理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブマニピュレータのバイラテラル制御, 計測自動制御学会論文集, 27-1, 56/63 (1991)
- 16) 藤本, 佐野, 田中, 花井: バイラテラル制御系の分割設計と通信遅れによる不安定性の補償, 日本機械学会論文集, C-64-621, 1772/1779 (1998)
- 17) 横小路, 吉川: オペレータのダイナミクスを考慮した遠隔操縦用マスタアームの可操作性, 計測自動制御学会論文集, 26-7, 818/825 (1990)
- 18) B. Hannaford: Stability and Performance Tradeoffs in Bi-lateral Telemanipulation, *Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation*, 1764/1767 (1989)
- 19) 宮崎, 萩原: バイラテラル・マスタ・スレーブマニピュレータの並列制御方式, 日本ロボット学会誌, 7-5, 446/452 (1989)
- 20) 田中良久: 心理学的測定法第二版, 東京大学出版会 (1977)
- 21) 中島義明編: 現代心理学[理論]事典, 朝倉書店 (2001)
- 22) 大山, 今井, 和気編: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房 (1994)
- 23) S. S. Stevens and E. H. Galanter: Ratio Scales and Category Scales for a Dozen Perceptual Continua, *Journal of Experimental Psychology*, 54-6, 377-411 (1957)

[著者紹介]

山川 聡子 (正会員)

1997年名古屋工業大学大学院博士後期課程修了。同年名古屋工業大学機械工学科助手。ディジタル制御・切替制御の研究, および力覚スケーリングの研究に従事。IEEE, 日本機械学会の会員。(博士(工学))

藤本 英雄 (正会員)

1970年名古屋大学工学部機械工学科卒業, 現在, 名古屋工業大学大学院教授, ものづくりテクノセンター長(併任)。生産システム, ロボットなどの知能化, パーチャルリアリティ・感性の工学などに興味を持つ。2000年 Japan-USA Flexible Automation Symposium 最優秀論文賞, 第6回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞, 計測自動制御学会 SI 部門貢献賞, 日本機械学会 2002 ROBOMECH 表彰, 生産システム部門部門賞 (2002年功績賞) を各々受賞。ASME 1998 Japan-USA Flexible Automation Symposium プログラム委員長, JSME 2002 および Int. Scheduling Symposium 組織委員長。計測自動制御学会常務理事部門協議会議長。日本機械学会評議員など。現在, 日本機械学会フェロー, スケジュール学会会長。(工学博士)
<http://www.mech.nitech.ac.jp/~fujimoto/fujimoto-lab.html>