遅れ時間を伴う 3 次元運動への人間の追従性

堤 教彰*・嶋田 博行**・古荘 雅生**・宮 関*

Human Adaptation to Characteristic of Three Dimensional Motion with Time Lag

Noriaki TSUTSUMI*, Hiroyuki SHIMADA**, Masao FURUSHO**,
and Gong GUAN*

Abstract

As ships have larger mass and tend to suffer disturbance forces of wind, wave and so on. They are regarded as "time lag system" from the point of view of human operation. In order to investigate this field, we have organized the project team which included psychology, naval architecture, marine traffic engineering and human engineering.

We have already published the findings of the project in this journal several times as follows. A) The participants made more exact responses under short time lag than long time lag. B) The most difficult situation was the case that involved three conditions simultaneously (slow cursor speed, large time lag and bad brake efficiency). However, our findings leave questions. Then, we improved the apparatus and carried out experiments controlled stringently.

The findings revealed that the participants accuracy of response described the usual learning curve under all conditions. But, it was not stable under long time-lag (10000ms) with trials. These findings suggested that mental work load might be higher in time lag system than in the other situation.

Keywords: *Human Engineering, Cognitive Psychology, Time Lag System, ShipMotion, Learning Process*

キーワード: 人間工学, 認知心理学, 遅れ時間系, 船舶運動特性, 学習過程

* 学生会員 神戸大学大学院

(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 正会員 神戸大学海事科学部

(〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

1. はじめに

人間から見た船舶の運動特性の特異性を解明することは、船舶の操船におけるヒューマンファクターを考える上で、重要なテーマである。そこで、我々の研究チームは、人間から船舶運動特性を見たときに、この特性を遅れ時間系として捉え、遅れ時間系へ人間がどのように追従できるか、人間一般の特性として捉えるための基礎的実験を始めた。認知科学、船舶工学、統計学、船舶安全管理、人間工学の専門家からなる学際的研究チームを編成し継続的に研究を行ってきた^{[1]-[9]}。

遅れ時間を伴った制御の困難性の問題では、操船のみならず高炉などの制御において古くから問題となっており、自動制御や AI の活用についての研究が盛んに行われている。また、衝突事故においては人的エラーが問題となっており「見張り不十分」「操船不適切」といった「操船者の人的エラー」による海難事故は、事故全体の約 8 割を占めているといわれている^{[10][11]}。

本論文での考察の対象は、人間-機械の関係であり、さらに結果が人間の判断に大きく依存することであり、AI による自動制御といった機械-機械の関係には言及しない。

船舶が運動性能としての大きな遅れ時間特性を有することに着目し、人間がこのような遅れ時間特性にどのように適応していくのかについて、基礎的ではあるが定量的なデータ取得のためその学習プロセスを調べる要素的な実験を行い、その結果に基づき人間の持つ応答特性を測定した^{[1][2]}。

2. 実験

2.1. 目的

先行研究のいずれの実験においても、目標位置である静止するターゲットに対して、コンピュータディスプレイ上で運動するカーソルに対してブレーキをかけて目標位置でとめる場面を設定した^{[1][6]}。

なお、この場面は、実際に停船させる場面を想定しているのではなく、遅れ時間系を広く想定した場面として設定した。ここで、目標位置で停止させる、とはカーブをするときのタイミングで舵を切るか、あるいは速度を変えるか、といった運動の変化の一つとして捉えている。そのため、実際の操船場面においては、目標位置で停止させる場面に相当する。

先行研究では「遅れ時間」及び、「ブレーキ性能」という 2 つの要因と、カーソルの初期速度との関係

を検討した。条件を絞って実験するために順序効果(実験を行う際に最初に行うか、後になるかによって反応が異なる)、教示効果(実験を行う際、同一の教示を与えないと反応が異なる)、同調効果(被験者が同一の部屋にいてだけで、同じ反応を得られる効果)を除去した実験設定とした。

遅れ時間系および緩慢な動きへの人間の追従性に関して目標への停止位置の正確さと改善性の 2 点を指標として評価した結果、以下の 3 つの仮説を導き出した。

A) カーソルの初期速度が遅いほど、「目標への停止位置の正確さ及び練習による改善性」が悪いだろう。

B) カーソルの遅れ時間が長いほど、「目標への停止位置の正確さ及び練習による改善性」が悪いだろう。

C) カーソルの初期速度が遅く、かつカーソルの遅れ時間が長いほど、「目標への停止位置の正確さ及び練習による改善性」が悪いだろう。

仮説 A と仮説 B が複合したものが、仮説 C である。この仮説は、人間のおかれた課題や状況の困難度を反応時間および正確さ、および繰り返し反応の改善度で定義しようという認知心理学の方法を用いている。繰り返し反応による改善度とは、同じ課題や状況で同一の反応をさせると、不正確で時間を要していた反応が改善された場合、反応は改善されない場合に比べると容易ということになる。

たとえば、加算作業で考えると、成人の場合、2 桁の加算は容易であるが、小学校の低学年の場合、繰り返し練習を行うことで、改善が見られる。しかし、小学校に入る以前の子供にとっては、繰り返しの練習は効果がない。したがって、困難な課題ということになる。

課題が容易であるほど、反応時間は短くかつ正確である(成人の場合にとつての加算作業)。逆に反応時間が長く、正確さが低い場合、繰り返し反応を行わせて、改善が見られる場合は次に容易な課題となり(低学年の子供にとつての加算作業)、もっとも困難な課題は改善が見られない場合である(就学前の子供にとつての加算作業)。

なお、環境への追従性をつぎのように定義した。運動するターゲットの目標への正確なコントロールの一側面として、カーソルの正確な停止が行える状態を追従性が高い状態と定義し、停止したカーソルから目標までの距離(以下、単に反応距離と表現する)を従属変数と定義した。

追従性がよい状態は、初期状態において反応距離が短く、さらに反応距離が迅速に改善され、少ない練習で正確な反応距離にいたる状態である。

つまり、応答の当初から追従性が高く、さらに少ない練習で、正確な応答が得られる場合に、追従性が高いと定義した。

これらの仮説は、継続的に行ってきた研究により、確かめられたが、すべてが解決したわけではなかった。

先行研究での個々の条件を詳しく調べると、カーソルの初期速度が遅い条件のうち、遅れ時間の小さい条件、つまり遅れ時間が 600ms の条件では通常の学習曲線が描けていないという問題が残された。

その原因として a) 実験装置の問題と、b) 被験者の戦略の 2 つが考えられる。戦略は、最近の実験心理学で問題となっているが、被験者は最適つまり最短でもっとも簡単に解決できる（つまり早く実験を終了させて帰りたいという）方法で解決しようとするのが原因と考えられる。

a) 実験装置上の問題として、以下の 3 つの問題がある。

- ① 刺激提示画面が遅いカーソル速度に対応できていない。
- ② 遅れ時間を大きくすると、カーソルが直線運動をとった場合、停止位置が画面の外に出てしまうという問題があった。
- ③ カーソルが直線運動をするために、刺激の停止位置を画面の枠組みから推測する手がかりを与えてしまった。

という問題があった。

これらの問題を解決するためには、刺激画面を 2 次元提示から 3 次元提示にすることで問題の解決を図った。

b) 戦略の問題は、以下のようにまとめられる。遅れ時間の長い場合と、ない場合の 2 つの条件を混在させて実験したため、カーソル速度が遅いときには、刺激を繰り返し提示していくと、平均化したところに収斂しようという戦略で、被験者が反応してしまうと考えられる。

そこで、この問題を解決するためには、条件統制をさらに厳密にし、被験者内で遅れ時間を 1 つの条件に固定した実験を行うことで問題の解決を図った。

以上の問題を踏まえ、本研究では先行研究で用いた実験提示システムを 2 次元平面から 3 次元空間に再構築した。

これにより、より長い遅れ時間と遅いカーソルの初期速度に対応した。以上をまとめると、今回の実験は、実験装置の改良と実験手続きの変更に集約される。

2.2. 実験装置

実験装置は PC (Dell OptiPlex GX60)、ディスプレイ (FUJITSU 19 インチ CRT FMVDP98X2) とキーボードである。

実験プログラムは先行研究で用いたものから全面的に見直した。3 次元提示を行えるように、プログラムは ONION software の Hot Soup Processor ver3.0 で作成した。また、3 次元表示に用いたモデルは Blender Foundation の Blender で作成した。

刺激画面では、これまでのカーソル移動の平面運動から画面奥に向かう直線運動に変更した。ボタン押下後、遅れ時間の後、減速し停止する。

刺激画面を Fig 1 に示す。実際の実験画面ではターゲットやオブジェクトという文字は表示されない。

Fig.1 Stimulus

移動するオブジェクト (先行研究でのカーソルに相当し、ディスプレイ上で約 10mm) の初期の提示位置はディスプレイ中央から約 20mm 下方に固定されており、ターゲットは白色の円形で示されていた。また、進行方向に向かって、一定間隔でランダムな個数の目印があった。オブジェクト、ターゲット、目印に関して横から見た位置関係を Fig2 に示す。

Fig.2 Position

オブジェクトの初期位置は遅れ時間と減速時間を考慮に入れた上で、開始から 10000ms 以上 60000ms 未満で反応できるように調整した。また、オブジェクトの移動速度は先行研究での遅い速度に相当する。

オブジェクトがターゲットを超えた場合の刺激画面を Fig3 に示す。カメラはターゲット上方で停止し、オブジェクトを画面中央に捉えるように角度を変え

ていく。また、同時にオブジェクトに向かって矢印を表示した。

Fig.3 Object over target

実験手続きの変更は、先行研究と同様に同一の遅れ時間で群内を統一して提示し、群ごとに遅れ時間を変えて提示した。

2.3. 実験条件

先行研究では、カーソル速度、遅れ時間、減速性能が実験条件であった。本研究では、カーソル速度や減速性能によらず、遅れ時間のみを検討するために、実験条件として遅れ時間のみを採用した。

ここで、遅れ時間条件を 0ms, 5000ms, 10000ms にしたのは、大きな遅れ時間を再現する前に、遅れ時間そのものが人間にとってどのような意味があるのかを知る必要があったためである。平面運動での数秒単位の遅れ時間が、人間にとって追従することそのものに困難性が見られることは先行研究で見出したため、3次元化した本研究でも同じ条件とした。

2.4. 実験概要

今回の実験は遅れ時間を被験者間要因に割り当てた。大学生 12 名をランダムに 3 群に分け、遅れ時間 0ms のグループ、遅れ時間 5000ms のグループ、遅れ時間 10000ms のグループとした。練習試行を 3 回行い、本試行は 30 回行った。それぞれのグループに提示されたカーソルの初期速度、ブレーキ性能は同じであった。

実験手続きは、被験者は個別に暗室で実験を受けた。部屋には被験者と実験者が共に入り、暗幕によって被験者と実験者を隔離した。練習試行を行った後、本試行を行った。

3. 結果

結果のグラフを示す。遅れ時間が 0ms のグラフを Fig.4, 5000ms のグラフを Fig.5, 10000ms のグラフを Fig.6 に示す。グラフの縦軸は停止時のカーソルとターゲットとの距離、横軸は試行回数である。

Fig.4 Time Course of Accuracy under Time Lag 0ms (Vertical Axis: Distance between Cursor and Target (m)) (Horizontal Axis: Sections)

Fig.5 Time Course of Accuracy under Time Lag 5000ms (Vertical Axis: Distance between Cursor and Target (m)) (Horizontal Axis: Sections)

Fig.6 Time Course of Accuracy under Time Lag 10000ms (Vertical Axis: Distance between Cursor and Target (m)) (Horizontal Axis: Sections)

次に分散分析結果表を Table1 に示す。試行回数の主効果は有意 ($F(9, 90) = 7.16$, $\text{Mean-Sq} = 356.2$, $p < .001$), 遅れ時間の主効果も有意であった ($F(2, 90) = 3.69$, $\text{Mean-sq} = 183.4$, $p = .001$).

Fig.7 Time Course of Accuracy (Vertical Axis: Distance between Cursor and Target (m)) (Horizontal Axis: Sections)

Table.1 The table of ANOVA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr (>F)	
Section	9	3206	356.2	7.16	9.193e-08	***
delay	2	366	183.4	3.69	0.028	*
Section x delay	18	1059	58.9	1.18	0.292	
Residuals	90	4480	49.8			

全条件のまとめたグラフを Fig.7 に示す。

全体的に試行を重ねるにつれ、収斂していく傾向があった。特に、遅れ時間が 0ms の条件では最初から正確性が高く、比較的簡単な課題であったことが分かった。しかし、遅れ時間が 10000ms の条件では試行を重ねても安定した反応ができなかった。

このことから、遅れ時間がわずか 10000ms になるだけで、人間にとっては、その状況を学習するのが困難であることを示している。実際の船舶は、さらに大きな遅れ時間が存在するので、さらに大きな遅れ時間について検討する必要がある。

4. まとめ

船舶は、比較的大きな質量を持ち、風・波などの外乱力を受け、これは人間から見たとき”遅れ時間系”とみなすことができる。そこで本研究では、認知科学、船舶工学、海上交通工学、人間工学の専門家からなるプロジェクトチームを編成し検討した。

これまでの研究で A)被験者の反応は、遅れ時間が大きい条件よりも小さい条件のほうが正確になる B)もっとも困難な条件は 3 つの条件 (カーソル速度が遅く、遅れ時間が大きく、ブレーキの利きが悪い) が含まれる場合、ということが分かった。しかしながら、被験者の反応が通常の学習曲線を描けていないという問題が残っていた。その問題は、実験装置

を改良し、条件を厳密にした実験を行うことで解決した。

そこで、今回の実験では、これまでの装置を一新し、2次元平面提示から3次元空間を用いた提示に変更した。ここでも正確さを指標として、反応を反復させることにより、正確さがいかに得られたのかを捉えた。正確に反応できる状態になると、それに必要な知覚判断の処理は必要なくなる。このようなプロセスは認知心理学では、自動的処理として知られている現象である。今回の場合、自動的処理が得られると、複数の処理を同時に行うことができるという点で、心的負荷が低減される。今回の結果は、遅れ時間がある環境では他の環境に比べて心的作業負荷が大きくなるであろうということを示唆した。

また、基本的な人間機械系に関する基本特性の解明が目標であり、教育、装置設計、シミュレータなどへの応用研究の基礎研究とするための実験であった。

今後は、より大きな遅れ時間が存在する環境においてデータを蓄積するとともに、そのような困難な学習状況において、効率的な学習を行うために有用なインターフェースや教育場面での応用の可能性を検討する。

参考文献

- (1) 米勇健, 堤教彰, 嶋田博行, 井上欣三, 小林栄一, 古荘雅生, 海江田洋平: 遅れ時間を伴う平面運動への人間の追従性 日本航海学会論文集 114 号, pp.103-108, 2005
- (2) 嶋田博行, 小林英一, 磯貝恭史, 井上欣三, 細井直人, 堤教彰, 古荘雅生: 船舶運動特性(遅れ時間系)への人間の追従性に関する基礎研究 日本航海学会論文集 110 号, pp.93-99, 2004
- (3) 嶋田博行: 操船場面における人間の認知特性に関する基礎的研究-I. 一遅延フィードバック下での遅延反応の学習 日本航海学会論文集 104 号, pp.31-36, 2001
- (4) 嶋田博行: 心理学からみたヒューマンエラー 日本船長協会第 75 回船長教養講座, pp.1-37, 1997
- (5) 嶋田博行: 操船者の認知特性に関する基礎研究 II. 一ヒューマンエラーの実験的検討, pp.313-318, 1995
- (6) 嶋田博行: ヒューマンエラーと管理-人間の注意機能研究の重要性 Navigation, 149 号, pp.75-82, 2001.
- (7) 嶋田博行, 細井直人, 古荘雅生, 磯貝恭史, 小林英一: 船舶運動特性(遅れ時間系)の学習過程 日本航海学会論文集 109 号, pp.45-51, 2003.
- (8) 竹本孝弘, 坂本義治, 嶋田博行, 古荘雅生: 衝突海難事故における人的エラーの分類について 日本航海学会論文集 106 号, pp.39-46, 2002.
- (9) 小林英一, 浅井 滋: 低速域の操船運動を表す数学モデルに関する一検討, 関西造船協会誌, 第 193 号 pp.27-37, 1984.
- (10) 竹本孝弘, 坂本義治, 嶋田博行, 古荘雅生: 衝突海難事故における人的エラーの数量化 日本航海学会論文集 113 号, pp. 85-91, 2005
- (11) ヒューマンエラーによる海難をなくせ 海と安全 Vol.40, No.531 pp. 1-57 2006

質疑応答

行平真也(九州大学大学院)

被験者の身体能力などは考慮されたのでしょうか?

また, 遅れ時間が増大するとターゲットに至らないことが予想されたとありますが, 実際に 10 秒より長い時間で実験されたのでしょうか? 実験の結果があれば, それはどのようなになっているのでしょうか?

堤教彰:

被験者の身体能力に関しては, 人間一般についての遅れ時間への追従性を対象にしているため, 今回の実験では考慮に入れておりません. 今後, そのような要因を考慮に入れた検討を行うことも重要であると考えています.

10 秒を超える遅れ時間については, さらに 30 秒・60 秒の条件で実験を行いました. しかし, 1 試行の実験時間が長くなり, 実験自体が暗室でディスプレイを前にして行うという性質上, 被験者への負担が非常に大きく, 検定を行うために必要なデータを収集することが難しく, 十分なデータ量といえないため, 今回の発表ではそれらの条件は除いております.

参考までに, 実際に実験を行った数名のデータでは, ターゲットを大幅に超える, あるいはターゲットに全く至らないことが多く, 30 試行程度では収斂する様子は見られませんでした.