論文

感圧特性を有するカーソルキーによるポインティング動作*

辺 見 一 男**・井 上 和 夫**

A Characteristic of Pointing Behavior with a Linear Cursor Key*

Kazuo HEMMI** and Kazuo INOUE**

A linear cursor key whose cursor speed on a CRT display is proportional to the force applied on the key top is presented in this paper. Three results were obtained as follows. Firstly, the positioning time by the linear cursor key can be made shorter than the time by the standard cursor key in the difficult positioning task with smaller size of the targets and longer distance to the targets. Secondly, positioning behavior consists of the approach behavior and the settlement behavior. In the approach behavior, subjects move the cursor to the edge of the targets as fast as possible. In the settlement behavior, subjects tap the cursor key repeatedly until the cursor moves in the targets. Each keystroke is performed without feedback control, because the duration of its behavior is shorter than the reaction time of the subjects. Finally, faster cursor speed is suitable for the approach behavior. On the other hand, slower cursor speed is suitable for the settlement behavior.

1. ま え が き

現在広く用いられているマン・コンピュータ・インターフェイスの手法としてビットマップディスプレイ上にアイコンやプルダウンメニューを表示し、これをポインティングデバイスと呼ばれるマウス、ジョイスティック、タッチパネルなどを用いて選択する方法がある。この方法では視覚的なイメージで処理内容を表現することができるので、コマンドや文法を正確に覚えることなく、ある程度の操作が可能となり、さらにインタラクティブな環境を提供しやすいため初心者にとって非常に扱い易いシステムを構築することができる。このため、従来広く用いられてきたシステムにアイコン選択方式を取り入れようとする研究も行なわれている¹。

このようなシステムでは画面の表示方法とこれを選択するのに用いるポインティングデバイスの組み合わせによってシステム全体の性質が大きく変化するため、数多くの研究が行なわれている。

Cardらはマウス、ジョイスティック、ステップキー、

テキストキーについて比較を行ない、ポジショニングタイム、エラーレートともマウスが最も優れていることを示した²。竹村らはマウス、タッチパネル、カーソルキーを用いてポイント手法を変化させて実験を行ない、カーソルキーでもメニュー選択方式であればほかのデバイスと同程度にポインティングできることを示した³。また、彼らはグラフィクス座標系におけるポインティングについても述べている⁴。Ewingらは文章中のキーワードを選択するのにマウスとカーソルキーを使い、キー入力によってカーソルがキーワードからキーワードへとジャンプするようなシステムを構成し、このような操作環境ではカーソルキーの方が優れていることを示した⁵。

これらの研究によればポインティングデバイスとしてはマウスの特性が優れ、現在用いられているカーソルキーはメニュー選択などの特別な場合を除いて、ほかのデバイスよりかなり劣っているといわれている。しかしながら、コンピュータの操作は依然としてキーボードからの入力が主体であるので、ポインティングデバイス単体の特性を改善することはもちろん必要であるが、キー操作との協調性が特に重要となる。カーソルキーによるポインティング動作はキー入力と同じ感覚で行なえるため、キー入力からポインティング動作へ、ポインティング動作からキー入力へと連続した流れで行なえる。さらに、カーソルキーはキーボード内に設けられているため、マ

* 原稿受付 1988. 11. 21.

** 立命館大学 理工学部 Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University; Kita-machi, Tojiin, Kita-ku, Kyoto 603, JAPAN.

Key Words : man machine system, human interface, human factor, pointing device, cursor key.

ウスのように余分な操作領域を必要としない。したがって、キー入力とポインティングが交互に起こるエディタのようなアプリケーションではカーソルキーが特に有効になると考えられる。このようにカーソルキーを用いる利点は多いにもかかわらず、ポインティング作業にカーソルキーを積極的に活用しようとする研究や、ポインティング作業に適したカーソルキーを提案しようとする研究はほとんど行なわれていない⁶。本論文では、カーソルキーの特性改善手法としてキートップにかける力によってCRT上のカーソル速度を制御できるカーソルキー（感圧カーソルと呼ぶ）を提案し、この特性を種々に変化させて実験を行ない、通常用いられているカーソルキーに比べてポインティング操作に有効であることを示す。また、本カーソルキーを操作するときの人間の操作特性についても述べる。

2. 感圧カーソル

アイコンやテキストのポインティング作業にカーソルキーを用いる利点は多い。しかしながら、現在用いられているOn-off特性だけではグラフィクス座標系での選択動作に適さないことは明らかである。そこで、カーソルキーに感圧機構をもたせ、キーを押し下げる力によってカーソルの移動速度を制御できる装置を製作し、これを用いてポインティング実験を行なった。感圧カーソルのキー配置はFig. 1に示すように一般的な十字配列とした。力の検出はキートップにかかる力でスライドを移動させ、抵抗体の電圧を分圧することにより行なう。キーストロークは5mm、力の検出範囲は10gw-100gwである。感圧カーソルから出力される信号のサンプリングは4方向のキーを1単位として行なう。したがって、二つのキーを同時に押した場合、画面上のカーソルは斜め方向に移動する。このとき、カーソルの移動はグラフィクス座標のピクセル単位で行なわれるため、移動方向による操作性に差は現われない。キーを最大まで押し込んだ時のカーソルの移動速度は4種類 $V_i = 35 \cdot i \text{ mm/s}$

Fig. 1 Key arrangement

($i = 1, 2, 3, 4$)とした。ポインティング特性はカーソルキー自身の特性によって大きく変化するため、カーソルキーの特性を次に示す2種類に設定した。

- (1) $V = 0 \quad (F \leq 10 \text{ gw})$

$$V = (F - 10) \cdot \frac{V_i}{90} \quad (10 \text{ gw} < F \leq 100 \text{ gw})$$

- (2) $V = 0 \quad (F \leq 50 \text{ gw})$

$$V = V_i \quad (50 \text{ gw} < F \leq 100 \text{ gw})$$

ここで

V : カーソル速度 (mm/s)

F : キーに加える力 (gw)

(1)を線形カーソル, (2)をOn-offカーソルと呼ぶ。On-offカーソルは従来用いられている通常のカーソルキーを想定してある。Fig. 2に今回設定したカーソル特性を示す。 V_i の設定に当たっては、パーソナルコンピュータ上で広く用いられているテキストエディタのオートリピート時のカーソル移動速度 (70 mm/s) を参考にした。

Fig. 2 Relationship between force and speed

3. 実験装置および実験方法

実験装置の構成をFig. 3に示す。感圧カーソル装置はキーに加えられた力を電圧値として出力する。上下左右4方向のキーの電圧データを12bit A/Dコンバータを用いてデジタル値に変換し、サンプリング周期45Hzでパーソナルコンピュータ内に取り込む。

実際のポインティング作業ではアイコンを選択する場合、文字を選択する場合、グラフィクス座標の1点を選択する場合、など様々な場面が考えられる。したがって、実験の条件を次のように設定した。ターゲット配置はFig. 4に示す3種類。ターゲットサイズ S は4種類 (3,

6, 9, 12 mm ; 6mm は文字, 12 mm はアイコンを想定). ターゲット距離 D は 4 種類 (2, 4, 6, 8cm). カーソルキーを最大まで押し込んだときのカーソルの移動速度 V_i は前述の 4 種類とした. また, カーソルがターゲット内に 1 秒間静止していればポインティング動作は終了したものと自動的に判定する. 実験条件の設定を Table 1 に示す.

実験は方向, 距離, サイズを順次変化させて 48 回行ない, 次に V_i を変化させて被験者 1 名につき, 合計 192 回行なった. 被験者は男子大学生 4 名とし, あらかじめ予備実験を行ない, 実験装置の使用に十分習熟した後, 本実験を行なった.

Fig. 3 Diagram of experimental system

Fig. 4 Target arrangement

Table 1 Parameters for experiment

D (cm)	S (mm)	V_i (mm/sec)
2.0	3	35
4.0	6	70
6.0	9	105
8.0	12	140

D = distance to targets ;
 S = target size ;
 V_i = maximum speed of cursor movement on CRT.

4. 実験結果および考察

4.1 線形カーソルと On-off カーソル

ポジショニングタイム (PT と呼ぶ) はキーを押してから, カーソルがターゲット内に停止するまでの時間で定義する. また, 線形カーソルの有効性の評価は (1) 式に示す PI によって行なう.

各ターゲットサイズに対して PT が最小となる V_i と, そのときの PI を Table 2 に示す. ここで, PI は 4 名の被験者の平均値を示してある (以後, 特に断らない限り実験結果は 4 名の被験者の平均値を示す).

$$PI = \frac{PT_o - PT_l}{PT_o} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ただし

PT_l : 線形カーソルの PT

PT_o : On-off カーソルの PT

ターゲットサイズが小さくなるにつれて PI は増加し, 線形カーソルが有効となっている. また, S が 6 mm と 9 mm の時, 線形カーソルでは $V = 105$ mm/s で PT が最小となるのに対して, On-off カーソルでは $V = 70$ mm/s にとどまっている.

Table 2 V_i and PI for the target size

type S (mm)	linear V_i (mm/s) PT (sec)	on-off V_i (mm/s) PT (sec)	PI (%)
3	35 1.551	35 1.881	18
6	105 0.933	70 1.035	10
9	105 0.738	70 0.778	5
12	70 0.639	70 0.639	0

Table 3 V_i and PI for the distance to target

type D (mm)	linear V_i (mm/s) PT (sec)	on-off V_i (mm/s) PT (sec)	PI (%)
20	35 0.572	35 0.576	1
40	35 0.904	35 1.019	11
60	70 1.054	70 1.202	12
80	105 1.216	70 1.595	24

各ターゲット距離に対してPTが最小となる時の V_i とPIをTable 3に示す。ここで、 D の増加にともなうPIも増加し、線形カーソルが最大で24%有効となっている。

これらの結果により、線形カーソルの方が V を大きく設定でき、また、ターゲットサイズが小さく、ターゲットまでの距離が長いなど、ポインティング条件が困難となるにしたがって線形カーソルが有効になるといえる。

4.2 線形カーソルによる動作特性

4.2.1 ポジショニングタイム

Fig. 5に線形カーソルによる実験結果の一例を示す。一般に人間のポインティング動作はターゲットの近傍まで急速に接近する動作とターゲットへカーソルを移動させるための動作の二つに分かれるといわれている⁷。本実験では最短時間でポインティング作業を行なうよう指示を与えたので、キーをいっぱいまで押し込み、高速でターゲット近傍まで接近する動作(区間A-B)と、キーを断続的に押し込みながらターゲット内に移動させる動作(区間B-C)の二つからなると考えられる。区間A-Bでの動作を接近動作、区間B-Cでの動作を確定動作と呼ぶ。各被験者とも、接近動作では、キーをいっぱいまで押し込むことにより、カーソルの移動を行なっているため、感圧特性は利用していない。一方、確定動作では、微調整を行なうにあたって、感圧特性を有効に利用する操作を行なっていた。このことは「線形カーソルの方が微調整が行ないやすい」との被験者の感想から

Fig. 5 Experimental result

Fig. 6 Positioning time

も確認できる。

PTと V の関係をFig. 6に示す。通常、 V が大きいほど、ターゲット近傍に接近する時間は短くなるので、PTは小さくなると思われるが、 V によらずほぼ一定値となっていることがわかる。Fig. 6の結果を接近動作時間(T_a と呼ぶ)と確定動作時間(T_s と呼ぶ)とに分解したものをFig. 7に示す。 T_a は V に逆比例して減少し、 T_s は V に比例して大きくなっており、 $T_a + T_s$ 、すなわちPTはほぼ一定の値となっている。このことにより、これ以上 V を大きくしてもポインティング特性は改善されないといえる。また、接近動作では V は大きい方が、確定動作では V は小さい方が操作しやすいことも示している。

Fig. 7 Approach time and settlement time

4.2.2 接近動作

接近動作ではカーソルを V_i で移動させて、ターゲット内に停止させる操作を行なっている。このとき、人間は高速で移動するカーソルをターゲット内に停止させるため、ある一定の予測情報を用いた予測制御を行なっていると考えられる。このときに用いる予測値として、次の4種類を仮定する。

D_c : 接近動作終了時、カーソル停止位置からターゲット中心までの距離

D_e : 接近動作終了時、カーソル停止位置からターゲット辺縁までの距離

$T_c: D_c/V_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$

$T_e: D_e/V_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$

ここで仮定した四つの予測情報を V_i の関数と考えた時、 V_i によらず一定の値をとるものを人間が用いている予測情報とみなす。予測情報の検出は、 D_c 、 D_e 、 T_c 、 T_e をそれぞれ V_i の関数と考え、最小2乗法を用いて求めた回帰直線の傾きを比較し、これが0に近いものを(V_i によらず一定となるものを)選ぶことにより行なう。ただし、各データは平均0、分散1となるようにあらかじめ正規化を行なっている。最小2乗法により求めた回帰直線の傾きをTable 4に示す。 T_e の傾きは他のパラメー

タの傾きに比べて大幅に小さい値となっており、これを人間が用いる予測情報と考えることができる。したがって、接近動作においては、高速でカーソルを移動させながらカーソルがターゲットの辺縁に到達するまでの時間を予測し、これが、人間が経験的に獲得しているある一定値になったときに、動作を終了していると考えることができる。

Table 4 Results of the least square method

	D_c	D_e	T_c	T_e
Inclination	0.03	0.30	-0.25	-0.06

4.2.3 確定動作

Fig. 5 に示したように、確定動作では被験者はキーを断続的に On-off しながらターゲット内にカーソルを移動させている。このとき、各キー入力における平均キー入力時間 T_{on} と V の関係を Fig. 8 に示す。同図より、各 V_i について、 T_{on} は 125 m sec から 150 m sec であることがわかる。人が CRT 画面上の情報をもとに、キー入力するときの単純反応時間は Card らによれば 240 m sec 必要であるという⁸。 T_{on} はこれに比べ、非常に小さな値となっている。このため、被験者は画面上を高速で移動するカーソル位置を認識しながらキー操作を行なっているとは考えられない。したがって、確定動作におけるキー入力動作はカーソルの位置情報を用いて連続的にフィードバック制御を行なっているのではなくて、カーソルが停止した地点から最短距離にあるターゲット辺縁まで移動させるのに必要な時間を予測し、この予測情報をもとにオープンループ制御でキー入力動作を行なっていると考えることができる。

Fig. 8 Key on time in settlement behavior

5. むすび

感圧カーソルを製作し、そのポインティング特性を変化させて実験を行なった。その結果、ポインティング条件が困難になるほど感圧特性は積極的に利用され、感圧

カーソルが有効となることが確認できた。また、人間はカーソルキーを操作するとき、カーソルに最も近いターゲットの辺縁を目標に高速で接近し、その後、オープンループ制御でキーを断続的に入力しながらカーソルをターゲット内に移動させていることが明らかとなった。このとき、接近動作ではカーソル速度が速い方が、確定動作ではカーソル速度は遅い方が有効であることが示された。

今回、キートップにかかる力とカーソル速度は線形となるように設定したが、接近動作と確定動作では最適なカーソル速度は大きく異なっている。したがって、カーソルキーの特性も線形であるよりはむしろ、これら二つの動作に適した値に大きく切り替わる方がより良好な結果が得られるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) D. T. Gittins, R. L. Winder & H. E. Bez : An Icon-Driven End-User Interface to UNIX ; Int. J. Man-Machine Studies, 21, pp. 451~461 (1984)
- 2) S. K. Card, W. K. English & B. J. Burr : Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys and Text Keys for Text Selection on a CRT ; Ergonomics, 21 巻, 8 号, pp. 601~613 (1987)
- 3) 竹村, 辻野, 荒木, 都倉 : ポイント手法の評価について ; 電子通信情報学会論文誌 (D), J70-D 巻, 7 号, pp. 1265~1274 (1987)
- 4) 竹村, 他 ; ソフトウェア手法によるポイント効率の改善について ; 電子通信情報学会論文誌 (D), J70-D 巻, 12 号, pp. 2402~2409 (1987)
- 5) J. Ewing, S. Mehrabanzad, S. Sheck, D. Ostroff & B. Shneiderman : An Experimental Comparison of a Mouse and Arrow-Jump Keys for an Interactive Encyclopedia ; Int. J. Man-Machine Studies, 24 巻, pp. 29~45 (1986)
- 6) 辺見, 井上 : 感圧特性を有するカーソルキーの試作とそのポインティング動作特性 ; 第 31 回自動制御連合講演会, pp. 417~418 (1988)
- 7) 柴田, 黒川 : 水平面を作業域とする位置決め運動における関節間の協調と制御様式 ; 電子通信情報学会技報 MBE 86-78, pp. 1~8 (1986)
- 8) S. K. Card, T. P. Moran & A. Newell : The Psychology of Human-Computer Interaction ; Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale New Jersey (1983)