文書処理とヒューマンインタフェース 21－1
（1988. 11. 7）

ポイント方式の平均打鍵数による評価手法について

川端信賢
長崎総合科学大学 工学部

本文では鍵盤によるポインティング方式の平均打鍵数による評価手法を示す．まず，ポインティング操作の対象となる領域あるいは文書を階層的にページ，行および桁に分割表現する．そして，ポインティング操作をこの文書上の出発点と目標点の点対集合上で生起する確率事象とみなす．一回のポインティング操作当りの平均打鍵数は文書上の各二点間のポインティング操作の生起確率と打鍵数の積和形で表される．文書上の点対集合をポインティング方式が等しいページ対集合に分割することにより，ある種の基本的なポインティング方式の評価のための計算量および記憶容量が，定義式でのO（$N^2 \cdot L^2 \cdot C^2$）からO（L^2+C^2）に低減できることを示す．ここで，N，L，Cはそれぞれ文書のページ数，行数／ページ，桁数／行を表す．

本文の手法の特徴と意義は次の点にあると考えられる．文書上の各二点間の打鍵数の近似式はポインティング方式から導出できる．また，ポインティング操作の生起確率分布がポインティング方式の相違に対して不変であるとみなすことにより，この確率分布を一度求めておけば，これを用いて各種のポインティング方式の平均打鍵数による評価が単純な計算によって行える．さらに，本手法は鍵盤によるポインティング方式の評価だけでなく，その設計や改善のためにも応用できると考えられる．

ON THE BASIC EVALUATION MODEL OF THE KEY-CONTROLLED POINTING SYSTEMS — THE AVERAGE KEYSTROKE COUNT —

Sinken KAWABATA
Faculty of Engineering,
Nagasaki Institute of Applied Science
536,Aba-cho,Nagasaki-shi,851-01 Japan

In this paper, we propose a basic evaluation model of the key-controlled cursor opertion systems, which we call the pointing architectures. First, the pointing area of the text is expressed by the Cartesian product $\mathbf{N} \times \mathbf{L} \times \mathbf{C}$,where $\mathbf{N}$ is the set of page numbers and $\mathbf{L}$ and $\mathbf{C}$ are the sets of line numbers and column numbers of each page, respectively. We regard the pointing operation, (starting point,terget point) , as the probabilistic event on the $(\mathbf{N} \times \mathbf{L} \times \mathbf{C})^2$ space. Then, we define the average keystroke count of the pointing architecture. This computation requires $O(N^2L^2C^2)$ time and space, where $N=|\mathbf{N}|$,$L=|\mathbf{L}|$ and $C=|\mathbf{C}|$. We partition the $\mathbf{N} \times \mathbf{N}$ into subsets , $(\mathbf{N} \times \mathbf{N})_a$'s, where any two page-piars in a same $(\mathbf{N} \times \mathbf{N})_a$ have the same pointing architecture. As a result, the computation complexity is reduced to $O(L^2+C^2)$ for some kinds of fundamental pointing architectures.

1．はじめに

コンピュータの急速な普及とハードウェアの進歩に伴い，以前には取り上げられることの少なかったユーザーインターフェースに関する研究が活発化している[1]~[4]．コンピュータの利用形態の中心がバッチ型から対話型に移り，また，対話型端末機は機械式のタイプライタ型から電子式の鍵盤・ディスプレイ型にかわった．この鍵盤・ディスプレイ型端末機がコンピュータのユーザーインターフェースの要である．対話型入力装置としては従来からの鍵盤（キーボード）のほか，将来の音声入力や手書き入力なども含めて色々研究されている[3][4][5][9]．現在，欧文はもちろんであるが，日本文入力でも鍵盤が最も多く使用されており，かつ最有力と考えられている[6][7][8]．

対話型入力および編集作業等においては，ディスプレイ画面上で文書の目標点へのカーソルの位置づけ操作，すなわち，ポインティング操作が重要となる．ポインティング装置にはマウス，タブレット，その他があり，それぞれのポインティング時間や精度の比較評価が行われている[2]．一般的にはポインティング装置はカーソル移動キーのようなキーボード制御よりも速い．しかし，タイプ入力と位置づけを組み合わせた作業や短距離においてはカーソルキーがマウスよりも速い[2]．したがって，ワードプロセッサが普及し，いわゆる作文タイプを行うユーザが増えるにつれて，カーソルキーによるポインティング方式はますます重要になってくる．

安達・小山は（鍵盤による）カーソル移動の認知モデルとポインティングエラーについて考察している[10][11]．川端は平均打鍵時間によるポインティング方式の評価法について考察している[12]．

本文では鍵盤によるポインティング方式研究の基礎として，ポインティング方式の平均打鍵数による比較評価法について考察する．ポインティング装置の主要な評価基準はポインティング時間であるが，鍵盤の場合はこれがカーソルキー等の打鍵回数に大きく依存する．この意味でポインティング操作の平均打鍵数は，鍵盤によるポインティング方式の最も基本的な評価基準といえる．

2．諸準備

2．1　用語の定義

コンピュータに入力された文書やコマンドの目標点へカーソルを位置付けることをポインティングまたは単にポイントという．本文でポイントの対象とする文書は（JISｺｰﾄﾞなどで）符号化された文字だけからなる文書である．いわゆる図形やイメージデータを含む文書は本文では扱わない．日本語文書は全角文字と半角文字が混在するが，本文では半角または全角の同一角の文字だけからなる文書を対象とする．以下，一連のカーソル移動操作によって，出発点から目標点へカーソルを移動させることをポイント操作という．同一桁（つまり，列）内でのカーソル操作を行方向操作という．一方，同一行内でのカーソル操作を桁方向操作という．

一回のカーソル移動の移動桁数および移動行数の和が１のカーソル操作をホップと呼び，和が２以上である操作をジャンプと呼ぶ．ジャンプの直前および直後の文書上でのカーソル位置をそれぞれ踏切点および着地点という．踏切点から着地点までの直角距離が一定のジャンプを定距離ジャンプという．着地点がある特定のページ，行または桁内の定点であるジャンプを定点ジャンプという．同一行の行頭や行末へのジャンプは桁方向定点ジャンプの例である．桁方向および行方向ジャンプ以外の同一ページ内のジャンプを斜めジャンプという．行末から次行の行頭へのジャンプ，あるいはその逆のジャンプは定距離斜めジャンプの例である．着地点が他ページになるジャンプをページジャンプという．他ページへの斜めジャンプおよび自ページへのページジャンプは，本文では定義しない．

ポイント方式ＯＰは点対集合上で定義されたカーソル操作の集合で定義する．ポイント方式は一般に各種のページ切替え操作，行方向操作，桁方向操作および斜めジャンプ操作を含む．

ページｎのｌ行ｃ桁の点ｚを$(n,z)=(n,l,c)$で表す．出発点$(n1,z1)$から目標点$(n2,z2)$への任意のカーソル操作に対して，点$(n1',z1)$から点$(n2',z2)$へもこれと等しいカーソル操作が存在し，かつ，この逆も成り立つとき，点$(n1,z1)$から$(n2,z2)$へのポイント方式と点$(n1',z1)$から$(n2',z2)$へのポイント方式は等しいという．ここで，カーソル操作が等しいとは，対応する各キー操作の使用キーおよびそのカーソル移動ベクトルがともに等しいことをいう．

次に，ページ上の任意の二点$z1,z2$に対して，点$(n1,z1)$から$(n2,z2)$へのポイント方式と点$(n1',z1)$から$(n2',z2)$へのポイント方式が等しいとき，ページ対$(n1,n2)$と$(n1',n2')$のポイント方式は等しいという．以上に定義した「ポイント方式が等しい」という関係は，明らかに反射律，対称律および推移律を満たすから同値関係である．

2．2　使用記号の説明

まず，使用記号および用語の説明を行う．文書は１ページから順番にページ番号を付けて扱う．一

般性を失うことなく，各ページのサイズ（最大行数，最大桁数）は等しいと仮定する．集合Aの直積集合 {(a,b) | a,b∈A} をA×Aで表す．本文ではポイント操作の集合を直積集合で表す．
L：文書の１ページ当りの最大行数．コマンド入力の場合はL=1と考える．
L：文書のページの行番号の集合．**L**＝ {1,2,…,L} ．
C：文書の１行当りの最大桁数．ワードプロセッサではCが選択的に指定可能になっている．
C：文書の行の桁番号の集合．**C**＝ {1,2,…,C} ．
Z：文書のページの点の集合．**Z**＝ {z | z=(l,c), l∈**L**, c∈**C**} ＝**L**×**C**．点z上に文字が配置される．本文では行の右端の点(l,C)を行末と呼び，行内の最終文字の点を行の文末と呼んで区別する[13]．
N：文書のページ数．
N：文書のページ番号の集合．**N**＝ {１，２，．．．，N} ．
（**N**×**Z**）×（**N**×**Z**）：本文ではポイント操作((n1,z1),(n2,z2))の集合を表す．(n1,z1),(n2,z2)∈（**N**×**Z**）はそれぞれ出発点および目標点．ポイント操作は（**N**×**Z**）×（**N**×**Z**）の全要素に対して定義する．
N×**N**：本文ではポイント操作の出発点(n1,z1)と目標点(n2,z2)のページ対(n1,n2)の集合を表す．
ポイント操作((n1,z1),(n2,z2))はn1＝n2のとき，ページ内ポイント操作という．n1≠n2のとき，ページ間ポイント操作という．ページ内およびページ間ポイント操作を合わせて，広義のページ間ポイント操作という．例１でとり上げるポイント方式では**N**×**N**は次の六つのページ対集合に分割される．
$(\mathbf{N}\times\mathbf{N})_{in}$：ページ内ポイント操作のページ対集合．
$(\mathbf{N}\times\mathbf{N})_{prev}$，$(\mathbf{N}\times\mathbf{N})_{next}$，$(\mathbf{N}\times\mathbf{N})_{top}$，$(\mathbf{N}\times\mathbf{N})_{top\&prev}$，$(\mathbf{N}\times\mathbf{N})_{diff}$：それぞれ前ページ，次ページ，先頭ページ，先頭かつ前ページ，その他のページへのページ間ポイント操作のページ対集合を表す．
以下で，p(　)およびs(　)はそれぞれ(　)に示したポイント操作の生起確率および平均打鍵数を表す．
s：Nページの文書での一回のポイント操作当りの平均打鍵数．
$(s)_{in}$：sのページ内ポイント操作成分．
p_{in}，s_{in}：それぞれページ内ポイント操作の生起確率および平均打鍵数．
記述の簡単化のために，αは各々のページ間ポイント操作を表す添字prev,next,top,top&prev,diffの総称とする．
$(s)_{\alpha}$：sの各々のページ間ポイント操作成分．
p_{α}，s_{α}：各々のページ間ポイント操作の生起確率および平均打鍵数．
ページ切替えとはカーソルを他のページへ移動させることである．ページ切替えの際のカーソルの進入点とは，ページ切替え直後のカーソル位置のことである．
$s_{\alpha\cap}$：s_{α}のページ切替え操作成分．一般に，ページ切替えはページジャンプ操作または行方向カーソル移動操作（の繰り返し）による．定義によりページ内ポイント操作ではページ切替えはないから，$\{s_{in\cap}\}=0$と定義する．
$s_{\alpha\updownarrow}$，$s_{\alpha\leftrightarrow}$，$s_{\alpha\nearrow}$：それぞれ$s_{\alpha}$の行方向，桁方向および斜め方向操作成分．
その他の $\{s((n1,z1),(n2,z2))_{\cap}\}$ 等についても同様に定義する．
(n2,z0)：ページn2へのページ切替えの際の進入点．数種類のページ切替え操作が可能な場合には，同一ページn2への進入点z0は複数個あり得る．(n2,z0)の代わりに単にz0とも書く．

３．　ポイント操作の平均打鍵数とその評価法

３．１　ポイント操作の平均打鍵数の定義式

Nページ（N≧１）からなる文書に対するポイント操作の平均打鍵数sは，定義により式（１）で示される．

$$s=\sum_{(n1,n2)\in(\mathbf{N}\times\mathbf{N})}\sum_{(z1,z2)\in(\mathbf{Z}\times\mathbf{Z})}\{p((n1,z1),(n2,z2))\cdot s((n1,z1),(n2,z2))\} \quad (1)$$

式（１）の打鍵数s((n1,z1),(n2,z2))は明らかにポイント方式に依存する．一方，ポイント操作の生起確率p((n1,z1),(n2,z2))は文書のポイント操作を必要とする箇所の統計的性質に主に依存すると考えられ，ポイント方式への依存度は小さいと考えられる．以下，本文ではp((n1,z1),(n2,z2))はポイント方式に依存しないと仮定して議論を行う．

３．２　平均打鍵数の二つの近似評価法

式（１）の生起確率p((n1,z1),(n2,z2))および打鍵数s((n1,z1),(n2,z2))の値は実際にはわからない．このため，近似を行う必要がある．近似法として，（ａ）有限回のポイント操作の生起頻度$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))および算術平均打鍵数$\bar{s}$((n1,z1),(n2,z2))による近似法と，（ｂ）近似関数p'((n1,z1),(n2,z2))およびs'((n1,z1),(n2,z2))による近似法がある．これらの近似法の組合せは表１に示す四つになる．

表１　式（１）のp((n1,z1),(n2,z2))およびs((n1,z1),(n2,z2))の近似法の組合せ

近似法	p((n1,z1),(n2,z2))	s((n1,z1),(n2,z2))	特徴
（イ）	$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))	$\bar{s}$((n1,z1),(n2,z2))	適用が困難
（ロ）	p'((n1,z1),(n2,z2))	$\bar{s}$((n1,z1),(n2,z2))	同上，無意味
（ハ）	$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))	s'((n1,z1),(n2,z2))	適用可能，$\bar{p}$( )の記憶が必要
（ニ）	p'((n1,z1),(n2,z2))	s'((n1,z1),(n2,z2))	適用が容易

これらの近似法の特徴は次のとおりである．近似法（イ）および（ロ）は対象とするすべてのポイント方式について$\bar{s}$((n1,z1),(n2,z2))の実測が必要であるが，これは現実には困難である．（ハ）および（ニ）の近似式s'((n1,z1),(n2,z2))としてはポイント操作((n1,z1),(n2,z2))の最小打鍵数を用いるのが適当である．最小打鍵数の評価式はポイント方式（マニュアル等に記載）から導くことができる．なお，前述のようにp((n1,z1),(n2,z2))は各ポイント方式に対して近似的に等しいと仮定すると，その近似値$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))あるいはp'((n1,z1),(n2,z2))はあるポイント方式に対して一度求めておけば，これを他のポイント方式の評価にも共通に使用することができる．（ニ）の近似法で近似関数p'((n1,z1),(n2,z2))を求めるためには，有限回のポイント操作での生起頻度$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))を参考にする必要がある．このため，本文ではまず，（ハ）の近似法について考察を進める．これを式（２）に示しておく．

$$s' = \sum_{(n1,n2)\in(N\times N)} \sum_{(z1,z2)\in(Z\times Z)} \{\bar{p}((n1,z1),(n2,z2))\cdot s'((n1,z1),(n2,z2))\} \qquad (2)$$

さて，式（２）の近似方法ではポイント操作の（Ｎ×Ｚ）^{2}領域での生起頻度$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))の計測と記憶を必要とする．しかし，実際の文書の（Ｎ×Ｚ）^{2} ＝（Ｎ×Ｌ×Ｃ）^{2} 領域での要素数が莫大なため，この近似法は式（２）のままでは計算量および$\bar{p}$((n1,z1),(n2,z2))の記憶が負担となり，好ましくない．そこで，生起頻度情報を可能な限り圧縮して，計算量および記憶量が少ない評価式を導く．

４．　計算複雑度が小さい平均打鍵数評価法

ある種の基本的なポイント方式の場合は計算複雑度がＯ（Ｌ^2＋Ｃ^2）である平均打鍵数の評価式が存在することを示す．評価のための計算量および記憶量を減らすために，式（１）の(n1,n2)∈（Ｎ×Ｎ）に関する総和を，まず互いにポイント方式が等しいページ対集合（Ｎ×Ｎ）$_a$の成分に分解する．同値類(Ｎ×Ｎ)$_a$に属する各ページ対の対応する点対は互いにポイント方式が等しいから，その点対のポイント操作の平均打鍵数はポイント方式から近似式を導くことができる．さらに，ポイント操作((n1,z1),(n2,z2))をページ切替え，行方向，桁方向の各操作および斜めジャンプの四成分に分けて考える．対象とするポイント方式は，ページ内ではホップ操作のほか，たかだか行方向および桁方向の定点ジャンプまたは定距離ジャンプだけを含み，ページ間ではこれに加えてページ切替え操作として，ページ頭など目標ページ内の定点へのページジャンプだけを含むものである．このようなポイント方式の簡単な例（４．１例１）を用いて評価式の求め方を示す．

４．１　ポイント操作のページ対集合の分割

ポイント操作集合の分割方法を示すために，例として次の簡単なポイント方式を用いる．

例１．簡単なポイント方式の例

ページ内ポイント方式はすべてのページ内で同じとし，これをOP_{in}で表す．（）内はカーソル操作の所要打鍵数を表す．

OP_{in}＝｛上下左右の各ホップ（１），行頭ジャンプ（２），行末ジャンプ（２）｝

ページ切替え方式は幾種類かのページジャンプだけからなるものとし，それらの着地点は文頭，前ページ，次ページおよび任意の他ページとする．ただし，各ページジャンプの着地点はページ頭とする．また，各ページジャンプ操作の平均打鍵数s（ページジャンプ）の間には次の大小関係があるとする．

s（前ページジャンプ）＝s（次ページジャンプ）
＝s（文頭ジャンプ）＜s（他ページジャンプ）

（例終り）

表２　ページジャンプ等((n1,z1),(n2,z2))の種類と
ページ対(n1,n2)が満たすべき関係（例１でＮ＝５の場合）
（ここで，各ページジャンプに対してはz2＝z0＝定点）

操作((n1,z1),(n2,z2))の種類	(n1,n2)の満たすべき関係	関係式の記号
ページ内カーソル操作	n1＝n2	I
前ページジャンプ	n1-n2＝1	P
次ページジャンプ	n1-n2＝-1	X
文頭ジャンプ	n1≠1,n2=1	T
他ページジャンプ	n1≠n2	D

表３　(n1,n2)の関係式の組合せとそれを満たす同値類（Ｎ×Ｎ）。
（I'は関係式Iのの否定を表す．他も同じ）

(n1,n2)の関係式の組合せ	対応する同値類	同値類の記号
IP'X'T'D'	{(1,1),(2,2),(3,3),(4,4),(5,5)}	$(N\times N)_{in}$
I'PX'T'D	{(3,2),(4,3),(5,4)}	$(N\times N)_{prev}$
I'P'XT'D	{(1,2),(2,3),(3,4),(4,5)}	$(N\times N)_{next}$
I'P'X'TD	{(3,1),(4,1),(5,1)}	$(N\times N)_{top}$
I'P'X'T'D	{(1,3),(1,4),(1,5),(2,4),(2,5),(3,5),(4,2),(5,2),(5,3)}	$(N\times N)_{diff}$
I'PX'TD	{(2,1)}	$(N\times N)_{top\&prev}$
その他の組合せ	空集合	

「ポイント方式が等しい」という同値関係でページ対集合N×Nを同値類に分割する．N×Nの各同値類にはそれぞれ固有の名前αをつけて（N×N）$_\alpha$と書く．名前αの集合を$\mathfrak{a}$とする．そうすると式（3）が成立つ．

$$N\times N = \bigoplus_{\alpha\in\mathfrak{a}} (N\times N)_\alpha \quad , \quad \oplus \text{は直和} \qquad (3)$$

N＝5の場合の例1のポイント方式に対する各同値類（N×N）$_\alpha$を求めてみる．各ページのページ内ポイント方式は等しいから，ページ間ポイント方式の等しいページ対集合（N×N）$_\alpha$を求めるには，ページ切替方式の等しいページ対を見つければよい．求め方を表2および表3に示す．

この例では$\mathfrak{a}$として式（4）で示す記号集合を用いた．

$$\mathfrak{a} = \{\mathrm{in}, \mathrm{prev}, \mathrm{next}, \mathrm{top}, \mathrm{top\&prev}, \mathrm{diff}\} \qquad (4)$$

４．２　ページ対集合の分割に基づく平均打鍵数の成分分解

平均打鍵数sをページ内および各々のページ間ポイント操作成分（s）$_\alpha$の和に分解すると，式（1）は式（5）となる．

$$s = \sum_{\alpha\in\mathfrak{a}} (s)_\alpha \qquad (5)$$

各成分（s）$_\alpha$はその成分の生起確率p_αと平均打鍵数s_αの積で表される．

$$(s)_\alpha = p_\alpha \cdot s_\alpha \qquad (6)$$

ここで，p_α，s_αは式（7）および式（8）で与えられる．

$$p_\alpha = \sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_\alpha} \quad \sum_{(z1,z2)\in(Z\times Z)} p((n1,z1),(n2,z2)) \qquad (7)$$

$$s_\alpha = \frac{1}{p_\alpha}\Big[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_\alpha} \quad \sum_{(z1,z2)\in(Z\times Z)}$$

$$\{p((n1,z1),(n2,z2)) \cdot s(n1,z1),(n2,z2))\}\Big] \qquad (8)$$

式（5），（6）は各々のページ対集合（N×N）$_\alpha$単位での平均打鍵数の大局的な評価に用いる．（N×N）$_\alpha$の平均打鍵数s_αは実際のポイント方式から，ページ切替え操作成分$s_{\alpha\cap}$，行方向操作成分$s_{\alpha\updownarrow}$，桁方向成分$s_{\alpha\leftrightarrow}$および斜めジャンプ成分$s_{\alpha\nearrow}$の四成分の和に分解する．

$$s_\alpha = \{s_{\alpha\cap}\} + \{s_{\alpha\updownarrow}\} + \{s_{\alpha\leftrightarrow}\} + \{s_{\alpha\nearrow}\} \qquad (9)$$

以下，ページ内およびページ間ポイント操作を二通りに分けて，各成分の評価式の求め方を示す．

４．３　ページ内ポイント操作成分の評価法

本節ではページ内ポイント操作成分の評価法を示す．ページ内ポイント操作は他のページ間ポイント操作に比べて最も頻繁に用いられる．まず，簡単のため，例1のページ内ポイント方式OP_{in}を対象にする．例1の場合，斜めジャンプは使えないから　$\{s_{in\nearrow}\}=0$である．

式（7）および式（8）のαの代りにｉｎとおき，Z＝L×Cおよび各Σの計算順序を変えて書き直すと，式（10）～（20）となる．

$$p_{in} = \sum_{(l1,l2)\in(L\times L)} p_{in}(l1,l2) = \sum_{(c1,c2)\in(C\times C)} p_{in}(c1,c2) \qquad (10)$$

$\{s_{in\cap}\} = \{s_{in\nearrow}\} = 0$だから，$s_{in}$は$\{s_{in}\updownarrow\}$と$\{s_{in}\leftrightarrow\}$の和に分解される．

$$s_{in} = \{s_{in}\updownarrow\} + \{s_{in}\leftrightarrow\} \qquad (11)$$

$$\{s_{in}\updownarrow\} = \frac{1}{p_{in}}\Big[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)in} \quad \sum_{((l1,c1)(l2,c2))\in(L\times C)\times(L\times C)}$$

$$\{p((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))\cdot s((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))\updownarrow\}\Big]$$

$$= \frac{1}{p_{in}}\Big[\sum_{(l1,l2)\in(L\times L)} \{p_{in}(l1,l2)\cdot s_{in}(l1,l2)\updownarrow\}\Big] \qquad (12)$$

ここで，

$$p_{in}(l1,l2)=\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)in} p((n1,l1),(n2,l2)) \qquad (13)$$

$$s_{in}(l1,l2)\updownarrow = \frac{1}{p_{in}(l1,l2)}\left[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)in}\{p((n1,l1),(n2,l2))\cdot s((n1,l1),(n2,l2))\updownarrow\}\right] \qquad (14)$$

さらに，

$$p((n1,l1),(n2,l2))=\sum_{(c1,c2)\in(C\times C)} p((n1,l1,c1),(n2,l2,c2)) \qquad (15)$$

$$s((n1,l1),(n2,l2))\updownarrow = \frac{1}{p((n1,l1),(n2,l2))}\left[\sum_{(c1,c2)\in(C\times C)}\{p((n1,l1,c1),(n2,l2,c2)) \cdot s((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))\updownarrow\}\right] \qquad (16)$$

同様に，

$$\{s_{in}\leftrightarrow\} = \frac{1}{p_{in}}\left[\sum_{(c1,c2)\in(C\times C)}\{p_{in}(c1,c2)\cdot sin(c1,c2)\leftrightarrow\}\right] \qquad (17)$$

$$p_{in}\ (c1,c2)=\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)in} p((n1,c1),(n2,c2)) \qquad (18)$$

$$p((n1,c1),(n2,c2))=\sum_{(l1,l2)\in(L\times L)} p((n1,l1,c1),(n2,l2,c2)) \qquad (19)$$

$$\{s_{in}(c1,c2)\leftrightarrow\} = \frac{1}{p_{in}\ (c1,c2)}\left[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)in}\{p((n1,c1),(n2,c2))\cdot sin((n1,c1),(n2,c2))\leftrightarrow\}\right] \qquad (20)$$

$\{s_{in}((n1,c1),(n2,c2))\leftrightarrow\}$ は式（１６）と同様に定義される．

各点対間の打鍵数s((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))を最小打鍵数によって近似する．そうすると，例１のポイント方式の場合，ページ内ポイント操作は行方向および桁方向のカーソル操作だけで行うから，ポイント操作((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))の打鍵数が最小となるのは，明らかに行方向および桁方向の打鍵数がそれぞれ最小値 $|l2-l1|$ および $\min\{|c2-c1|, c2+1, C-c2+2\}$ をとる場合である．ここで，$|l2-l1|$ および $|c2-c1|$ はホップ操作，$c2+1$ は行頭ジャンプとホップ操作，$C-c2+2$ は行末ジャンプとホップ操作を用いた場合のそれぞれの打鍵数である．したがって，式（１６）の $\{s((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))\updownarrow\}$ を $|l2-l1|$ で近似すると，式（１４）の $\{s_{in}(l1,l2)\updownarrow\}$ の近似式として式（２１）を得る．

$$\{s'_{in}(l1,l2)\updownarrow\} = |l2-l1| \qquad (21)$$

同様にして，式（２０）の $\{s_{in}(c1,c2)\leftrightarrow\}$ の近似式として式（２２）を得る．

$$\{s'_{in}(c1,c2)\leftrightarrow\} = \min\{|c2-c1|,\ c2+1,\ C-c2+2\} \qquad (22)$$

さらに，式（１１），（１２），（１７）のs_{in}，$s_{in}\updownarrow$，$s_{in}\leftrightarrow$の近似式は式（２３），（２４），（２５）となる．

$$s'_{in} = \{s'_{in}\curvearrowright\} + \{s'_{in}\updownarrow\} + \{s'_{in}\leftrightarrow\} + \{s'_{in}\nearrow\} \qquad (23)$$

$$\{s'_{in}\updownarrow\} = \frac{1}{\bar{p}_{in}}\left[\sum_{(l1,l2)\in(L\times L)}\{\bar{p}_{in}(l1,l2)\cdot s'_{in}(l1,l2)\updownarrow\}\right] \qquad (24)$$

$$\{s'_{in}\leftrightarrow\} = \frac{1}{\overline{p}_{in}}\left[\sum_{(c1,c2)\in(C\times C)}\{\overline{p}_{in}(c1,c2)\cdot s'_{in}(c1,c2)\leftrightarrow\}\right] \qquad (25)$$

以上より，例１のポイント方式のページ内ポイント操作の評価は六次元頻度分布$\overline{p}((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))$から情報圧縮した二次元頻度分布$\overline{p}_{in}(l1,l2)$および$\overline{p}_{in}(c_1,c_2)$を用いて，式（１０）および式（２１）～式（２５）に基づいて行うことができる．その時間複雑度および領域複雑度はともにＯ（L^2+C^2）である．

４．４　ページ間ポイント操作成分の評価法

本節ではページ間ポイント操作成分の評価法を示す．αを各々のページ間ポイント操作を表す添字の総称とする．ページ間ポイント操作の目標ページへの進入点（n_2，z_0）は次の三通りが主に用いられている．

（ａ）　z0＝定点．

（ｂ）　z0がページ切替え直前のカーソル位置に依存する．

（ｃ）　z0＝文末．

ページジャンプによる進入点は（ａ）の性質をもつ．ただし，文末へのジャンプを除く．行方行カーソル移動によるページ切替えの進入点は（ｂ）の性質をもつ．文末は文書処理中に絶えず変化する．

例１のポイント方式ではページ切替えはすべてz0=(1,1)（定点）へのページジャンプによってのみ行う．ページ対(n1,n2)∈（Ｎ×Ｎ）$_\alpha$間の実際のポイント操作において，出発点のページn1ではページジャンプ操作以外は不必要であるから，ページ間ポイント操作((n1,z1),(n2,z2))は｛ページジャンプ操作((n1,z1),(n2,z0))｝と｛ページn2でのポイント操作((n2,z0),(n2,z2))｝に分解できる．この場合，s_αのページ切替え操作成分｛$s_\alpha\cap$｝は当然，ページジャンプ操作によって決まる．

$$\{s_\alpha\cap\} = \frac{1}{P_\alpha}\left[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_\alpha}\ \sum_{(z1,z2)\in(Z\times Z)}\right.$$

$$\left.\{p((n1,z1),(n2,z2))\cdot s((n1,z1),(n2,z0))\}\right] \qquad (26)$$

式（２６）のs((n1,z1),(n2,z0))をページジャンプの最小打鍵数で近似すると，式（２６），（7）より｛$s_\alpha\cap$｝の近似式（２７）を得る．

$$\{s'_\alpha\cap\} = \min\{s(\text{ﾍﾟｰｼﾞｼﾞｬﾝﾌﾟ}((n1,z1),(n2,z0))\},$$

$$(n1,n2)\in(N\times N)_\alpha,\ z1,\ z0\in Z \qquad (27)$$

例１のポイント方式の各｛$s'_\alpha\cap$｝は式（２８）となる．

｛$s'_{in}\cap$｝＝０

｛$s'_{prev}\cap$｝＝ｍｉｎ｛ｓ（前ページジャンプ），ｓ（他ページジャンプ）｝
＝ｓ（前ページジャンプ）

｛$s'_{next}\cap$｝＝ｍｉｎ｛ｓ（次ページジャンプ），ｓ（他ページジャンプ）｝
＝ｓ（次ページジャンプ）

｛$s'_{top}\cap$｝＝ｍｉｎ｛ｓ（文頭ジャンプ），ｓ（他ページジャンプ）｝
＝ｓ（文頭ジャンプ）

｛$s'_{top\&prev}\cap$｝＝ｍｉｎ｛ｓ（文頭ジャンプ），ｓ（前ページジャンプ），ｓ（他ページジャンプ）｝
＝ｓ（文頭ジャンプ）

｛$s'_{diff}\cap$｝＝ｓ（他ページジャンプ）

（２８）

一方，s_αの行方向および桁方向操作成分｛$s_\alpha\updownarrow$｝および｛$s_\alpha\leftrightarrow$｝は前述のように，目標点のページn2でのポイント操作((n2,z0),(n2,z2))より求めればよい．斜めジャンプはないから｛$s_\alpha\nearrow$｝＝０である．z0=(1,1)=定点に注意すると式（２９）～式（３８）が導かれる．

$$\{S_a \updownarrow\} = \frac{1}{P_a}\left[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_a}\ \sum_{((l1,c1),(l2,c2))\in(L\times C)\times(L\times C)}\right.$$

$$\left.\{p((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))\cdot s((n2,l0,,c0),(n2,l2,c2))\updownarrow\}\right]$$

$$= \frac{1}{P_a}\left[\sum_{l2\in L}\{P_a(l2)\cdot S_a(l2)\updownarrow\}\right] \quad (29)$$

ここで，

$$P_a(l2) = \sum_{l1\in L} P_a(l1,l2) \quad (30)$$

$$\{S_a(l2)\updownarrow\} = \frac{1}{P_a(l2)}\left[\sum_{l1\in L}\{P_a(l1,l2)\cdot S_a(l0,l2)\updownarrow\right] \quad (31)$$

$$P_a(l1,l2) = \sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_a} p((n1,l1),(n2,l2)) \quad (32)$$

$$\{S_a(l0,l2)\updownarrow\}$$
$$= \frac{1}{P_a(l1,l2)}\left[\sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_a}\{p((n1,l1),(n2,l2))\cdot s((n2,l0),(n2,l2))\updownarrow\}\right] \quad (33)$$

$$\{s((n2,l0),(n2,l2))\updownarrow\}$$
$$= \frac{1}{P_a((n1,l2)(n2,l2))}\left[\sum_{(c1,c2)\in(C\times C)_a}\{p((n1,l1,c1),(n2,l2,c2))\right.$$

$$\left.\cdot\, s((n2,l0,c0),(n2,l2,c2))\updownarrow\}\right] \quad (34)$$

同様に，

$$\{S_a\leftrightarrow\} = \frac{1}{P_a}\left[\sum_{c2\in C}\{P_a(c2)\cdot S_a(c2)\leftrightarrow\}\right] \quad (35)$$

$$P_a(c2) = \sum_{c1\in C} P_a(c1,c2) \quad (36)$$

$$P_a(c1,c2) = \sum_{(n1,n2)\in(N\times N)_a} p((n1,c1),(n2,c2)) \quad (37)$$

$$\{S_a(c2)\leftrightarrow\} = \frac{1}{P_a(c2)}\left[\sum_{c1\in C}\{P_a(c1,c2)\cdot S_a(c0,c2)\leftrightarrow\right] \quad (38)$$

$\{S_a(c0,c2)\leftrightarrow\}$ および $\{s((n2,c0),(n2,c2))\leftrightarrow\}$ もそれぞれ式（３３）および式（３４）と同様に定義される．

例１の場合の $\{S_a(l2)\updownarrow\}$ および $\{S_a(c2)\leftrightarrow\}$ の最小打鍵数による近似式は式（３９），（４０）となる．

$$\{S_a'(l2)\updownarrow\} = |\,l2-l0\,| = l2-1,\ (l0=1) \quad (39)$$

$$\{S_a'(c2)\leftrightarrow\} = \min\{\,|\,c2-c0\,|,\ c2+1,\ C-c2+2\}$$

$$= \min\{c2-1, C-c2+2\},\ (c0=1) \quad (40)$$

例１のページ間ポイント方式の評価法について以上をまとめると，平均打鍵数の近似式として，式（２７）および式（４１）～（４４）を得る．

$$S_a' = \{S_a'\cap\} + \{S_a'\updownarrow\} + \{S_a'\leftrightarrow\} + \{S_a'\nearrow\} \quad (41)$$

$$\{s_a'\updownarrow\} = \frac{1}{\bar{\bar{P}}_k}\left[\sum_{l2 \in L}\{\bar{P}_k(l2)\cdot s_a'(l2)\updownarrow\}\right] \quad (42)$$

$$\{s_a'\leftrightarrow\} = \frac{1}{\bar{\bar{P}}_k}\left[\sum_{c2 \in C}\{\bar{P}_k(c2)\cdot s_a'(c2)\leftrightarrow\}\right] \quad (43)$$

$$\{s_a'\nearrow\!\!\!\swarrow\} = 0 \quad (44)$$

このように例１のポイント方式では，ページ間ポイント操作の評価はページ内ポイント操作の場合よりもさらに情報圧縮された一次元頻度分布$\bar{P}_k(l2)$および$\bar{P}_k(c2)$を用いて，式（２７）および式（４１）～（４４）に基づいて行う．その時間複雑度および領域複雑度はともにＯ（Ｌ＋Ｃ）である．したがって，ページ内およびページ間ポイント操作を合わせた全体の計算複雑度はＯ（L^2+C^2）である．なお，この章で対象としたポイント方式に定点斜めジャンプを追加した場合，評価式の計算複雑度はＯ（$L^2\cdot C^2$）になる．

５．むすび

カーソルキー等，鍵盤によるポインティング方式の平均打鍵数による評価手法を示した．ポインティング方式として，ページ内ではホップ操作のほか，たかだか行方向および桁方向の定点ジャンプまたは定距離ジャンプだけを含み，ページ間ではこれに加えて，ページ切り替え操作として，目標ページ内の定点へのページジャンプだけを含む場合について，その平均打鍵数の簡潔な評価式を導いた．この場合，評価のための時間複雑度および領域複雑度はともに定義式でのＯ（$N^2\cdot L^2\cdot C^2$）から実用レベルのＯ（L^2+C^2）に低減された．

本文では，ポインティング操作の生起確率を有限回のポインティング操作の生起頻度で近似している．今後，この生起頻度の計測およびこれを用いた各種ポインティング方式の評価を行う予定である．さらに，本文で対象にしなかったポイント方式の評価法も残された課題である．

参　考　文　献

（１）竹村，辻野，荒木，都倉：”ユーザインタフェース作成支援システムの設計と試作について”，情報処理学会論文誌，Vol.28,No.5,pp.506-515(1987-05).

（２）Shneiderman,B.著（東，井関監訳）：”ユーザーインターフェースの設計　”，日経マグロウヒル社（1987）．

（３）電子情報通信学会：”ヒューマンインターフェース特集”，電子情報通信学会論文誌Ｄ，Vol.J70-D,No.11(1987-11).

（４）情報処理学会：”計算機システムのヒューマンインターフェース　―モデル・評価・展望―シンポジウム論文集”，（昭63-4）．

（５）情報処理学会：”日本語文書の入力と編集シンポジウム論文集”，（昭60-11）．

（６）尾関：”第３２回全国大会にあたって―日本語入力方式について―”，情報処理,Vol.27,No.5,pp.493-497(1986-05).

（７）大岩，河合：”五年後のインタフェイスの主流はやはりキーボードであり，キーボード教育が今後の最重要課題である”，上記(4),pp.73-79.

（８）竜岡：”日本語ワードプロセッサーへの期待…ユーザの立場から見た各種入力方式…”，上記(5),pp.47-57.

（９）情報処理学会：”特集：日本文入力法”，情報処理，Vol.23,NO.6(1982-06).

（１０）安達・小山：”カーソル移動の認知モデルとポインティング・エラー”，情報処理学会第３６回全国大会論文集pp.919-920(1988).

（１１）安達・小山：”カーソル移動の認知モデルと移動速度の最適化”情報処理学会第３７回全国大会論文集，pp.711-712(1988).

（１２）川端：”鍵盤による対話入力ならびにポイント方式の評価法”，情報処理学会九州支部研究会資料63-11（昭63.3）．

（１３）㈱ジャストシステム：”日本語ワードプロセッサ一太郎リファレンス編”，㈱ジャストシステム(1985-10).