

ユーザの手運動軌道の分析による操作具配置の評価法

中田 亨^{*1 *2}

A method to Analyze Usability of Equipment Arrangement based on Trajectory Informatics

Toru Nakata^{*1 *2}

Abstract – A method to analyze trajectories of human motions is proposed. Human-interfaces which have complicated three-dimensional structure, such as instrument-panels of cars, should be concise and helpful for users' searching buttons and levers. The proposed simulation employs a virtual user and a cockpit model and estimates groping behavior of the user. In order to make the simulation realistic, the virtual user model is designed to control of his arm movement with plausible inaccuracy which is measured from real humans' behavior.

Keywords: Trajectory analysis, user behavior, spatial information, cockpit, usability.

1. 序論：ユーザ動作軌道データの分析の意義

ユーザインタフェース、人間機械系、モバイル機器の研究において、人間の動作データを計測する実験事例が増えている。例えば次のようなデータが計測される。

- 人体の部位の位置：手、指、マウスポインタ
- 人間の動線：建物内の住人、商店内の顧客、自動車の位置

軌道データは、人間の思考、経路の移動容易性、そして作業フェーズを反映している。どこで考え、何を目印にし、どこで用事を済ませたかの情報が含まれる。

このような情報を分析できれば、入力装置や建築物の設計に有用である。ユーザが手がかりにする目印、作業や休憩の場所、生じる身体動作軌道などが推定できる。

分析手法は、動物行動学[1,2,3,4,5]で開発されてきている。渡り鳥・伝書鳩・アリなどの動物は、自分の移動を広いスケールでも制御する能力を有している。この能力の機構を明らかにする分析手法が提案されている。

本論文では、入力装置のユーザビリティの評価のために、動物行動学を援用し、人間の動作軌道分析を行い、を行う手法を提案する。

2. 軌道における誘導情報量の計算法

2.1 軌道の定義と分析範囲

軌道とは、ある時間範囲内における物体の位置の集合である曲線を意味する。この曲線は、長時間露光したカメラで移動物体を撮影することで計測できる。これをルミノグラフと呼ぶ。時間のデータを無視してよい題材なら、ルミノグラフの形状の分析で充分である。

しかし、一般には時間情報も採用した方が深い分析ができる。軌道に時間の情報を付け加えると、 $r(t)$ という時

系列の位置ベクトルデータになる。

時系列位置データは、ルミノグラフとは異なり、停滞や移動の緩急が知りえる。これは動作者の思考や作業内容を反映することが多い。

通常の題材では、人間の時系列位置データだけで、人間の行動の内容と成否をある程度表現できる。つまり、特定の位置に人や人の部位が移動することが、行動の目的となっている題材は多い。本論文では、この範囲を扱う。

なお特殊な題材では、位置だけでなく速度の違いが行動の内容や成否を変化させることがある。この場合は多目的制御問題となり、数学的に複雑になる。

2.2 人間行動の軌道の全域構造と局所構造

人間の行動から描かれる軌道には、大域的構造と局所的構造がある。図1に示すように、毎回の軌道は同一ではないが、大局的に見ると、通り道と分岐点からなるグラフ構造の存在が暗示される。

通り道は、グラフ理論では辺(edge)と呼ばれる。特に通行量が多い辺を幹線(highway, turnpike)と呼ぶ。幹線が発生する理由は次の2つである。

1. 物理的理由：コスト。他の経路で移動するより、迂回してでも幹線を使う方がコストが低い時。
2. 認知的理由：情報の不等分布。行動の決定に必要な情報が幹線の付近にだけ多く提供されている時。

2.3 大域構造の判定

時系列位置情報の生データから辺と分岐点（グラフ理論では頂点(vertex, node)という)を判定する作業は、若干の恣意性を要する。なぜなら、頂点の数は主観的に決めなければならないからである。情報量基準を用いて、客観的な頂点の数を定める方法もあるが、題材に照らした、分析の妥当性を保障するものではない。

頂点の候補となる位置は、移動体の存在確率の極大点

*1: 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター

*2: CREST, 科学技術振興機構.

*1: Digital Human Research Center, AIST.

*2: CREST, JST.

である。

今時系列位置情報データが、 $\vec{r}[n]$ で与えられるとして、

存在確率は、

$$P(\vec{v}) = \sum_n f(|\vec{r}[n] - \vec{v}|) \quad (1)$$

で定義される。関数 f は単調減少関数であればよい。この確率 P に極大を与える位置 v が、特に移動体の到来や停留が多い位置であり、頂点の候補と言える。

特に $f(x) = 1/x$ とすることが調和平均法として推奨される。これは完全にランダムな酔歩運動をする移動体の存在確率の理論値を意味する。ただしこのままでは $x=0$ 付近にて値が過大になるので、

$$f(x) = \min(1/x, Const) \quad (2)$$

という値制限をかけて用いる[2]。

こうして得られた頂点候補の中から、主観的に妥当と思われる候補を採用する。

次に、辺の設定である。生データでの軌道は必ずしも厳密に頂点から頂点を結ぶものになっていない。頂点付近から、別の頂点の付近までの軌道となっている。

頂点に到着したと判定するには、閾値を持って行う。移動体の位置が、任意の頂点に対して閾値以下に近づいた場合は、その最接近点を以って、移動体はその頂点に到着したと解釈する。

以上の処理を行い、時系列位置データが、頂点と辺から構成されるグラフ構造に変換される。

2.4 経路選択の情報量・思考量

軌道データから生成した有向グラフには、次の3種類の頂点が存在する(図2)。

1. 分岐点: 後述する情報量が増加する点。
2. 用事点: 情報量が頭打ちになる点。
3. 合流点: 情報量が減少する点。

頂点の情報量を説明する。ある頂点 X への到来において、頂点 i から到来した割合を $p_{i \rightarrow X}$ とすると、到来元の多様性は次の値で表される。

$$H_{to}(X) = -\sum_i p_{i \rightarrow X} \log_2 p_{i \rightarrow X} \quad (3)$$

また出発先の多様性も同様に定義される。

$$H_{from}(X) = -\sum_i p_{X \rightarrow i} \log_2 p_{X \rightarrow i} \quad (4)$$

一見、分岐点や合流点に見えて、実は辺が交差しているだけで流れの混合がない頂点もありえる。その場合は、次の H_{cross} の量が大きくなる。

$$H_{Cross}(X) = -\sum_i \sum_j p_{i \rightarrow X} p_{X \rightarrow j} \log_2 p_{i \rightarrow X} p_{X \rightarrow j} \quad (5)$$

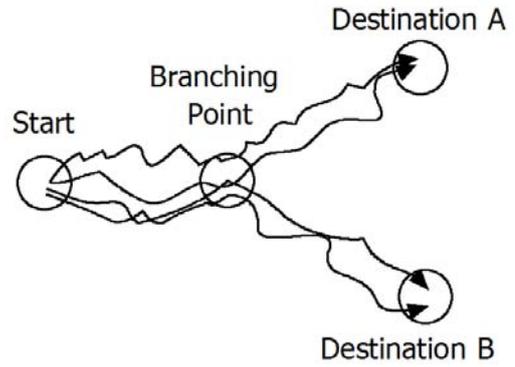


図1 グラフ理論的な軌道の模式図

Fig. 1. Graph representation of trajectories

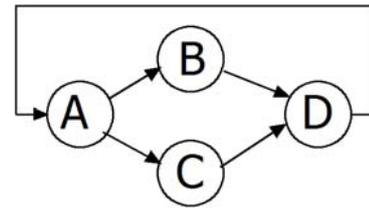


図2 分岐点(A)・用事点(B, C)・合流点(D)

Fig.2. Diverging point, business point, and joining point.

ただし、 $p_{i \rightarrow X \rightarrow j}$ は頂点 X に関する出入りについて、頂点 i から来て頂点 j へ行く移動の割合。

したがって、頂点 X にて経路の選択を行うことで増加する情報量は下記の値として計算される。

$$Info(X) = H_{from}(X) + H_{in}(X) - H_{Cross}(X) \quad (6)$$

今回は頂点 X の前後1履歴のみを考慮している。より高次の n 履歴を用いて分析の方が、長期記憶が影響する行動の分析には適切である。だが、その計算を有意にするためのデータの量はかなり大きくなり、実施不可能になることが多い。

【分岐点の意味】

分岐点において、動作者はこれからの経路を選択する。分岐点はハブ空港の出発ロビーに似ている。一般に、分岐点では、案内板などがあって、今後の経路計画に対して有用である情報が提供される。その情報量は上記の情報量である。情報理論では、選択に要する思考量は、分岐点で提供される情報量と同量であると解釈する。

課業(タスク)との関係で言えば、分岐点の通過は課業の段階が開始期であることを意味する。特定の課業を達成するための準備として、自身を特定の位置へ誘導している段階である。

【用事点の意味】

用事点では、経路選択についての思考がなく、分岐も合流もしない。航空会社の路線図で言えば、ちょうど観光地の空港のような存在である。ハブ空港のように路線の切り替えには用を成さない。

用事点はそこに到着すること自体に価値があることが多い。経路制御には役に立たない空港にわざわざ訪れるのは、到着事態に経路とは別の価値があるからである。

ユーザビリティの題材の分析においては、ユーザは用事点に何か用事があるから移動したと解釈する。

【合流点の意味】

用事点を過ぎると、情報量は減少し始める。これらの頂点において、済んだ用事の過去を無視して、経路計画を行う。これが合流である。

情報量が下げ止まった頂点は、ホームポジションであると言える。移動体はホームポジションへ、経路履歴によらず、合流を繰り返して向かう性向がある。

2.5 辺の中での移動における誘導の強度

辺 (=頂点と頂点の間) の移動において、移動体は誘導のための努力を行っている。

誘導は、何かを辿ったり、目印を参照したり、あるいは自身の感覚だけを頼りにする (dead reckoning) ことで、なされる。

ふらふらせずに移動させる制御能力を誘導と呼ぶことにする。ふらふらしない移動とは、加速度が一定である移動とする。加速度の一定性が誘導強度を意味する。

なお、Rayleigh 統計検査法[3]では、単に軌道の直線性を持って誘導の強度としている。これは移動に惰性がなければ妥当である。しかし、惰性による直線移動を誘導と認めない場合には、適切ではない。

誘導の強度を適切に表す量は情報量である。Wilson[4]はアリの道通りの誘導強度を情報量として計算する方法を提案している。ただしこの方法は簡便のために厳密性を犠牲にしている。そこで本論文ではより厳密な誘導情報量の計算法を提案する。

ある辺に属する時系列位置データは、図3のように与えられる。この辺に含まれる位置データ全てについて、それらの2階時間差文をとり加速度ベクトルの分布を得る。この時、加速度ベクトルの標準偏差の小ささで、加速度の一定性を評価する。

辺の移動における加速度ベクトルの標準偏差を σ_{edge} とするとき、誘導情報量は下記の値として与えられる。

$$NaviInfo = \log_2 \left(\frac{\sigma_{total}}{\sigma_{edge}} \right) \quad (7)$$

ここで、 σ_{total} はデータ全体範囲での加速度ベクトルの標準偏差である。

$NaviInfo$ が大きい辺は辿りやすい道であると言える。

数式の成立理由を説明する。

まず加速度ベクトルが正規分布に従うと仮定することの妥当性を述べ、次に正規分布の情報量の公式を使って誘導の強度を評価する方法を示す。

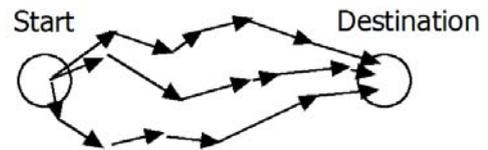


図3 直線区間内の移動のばらつき

Fig.3. Variety of movement on an edge

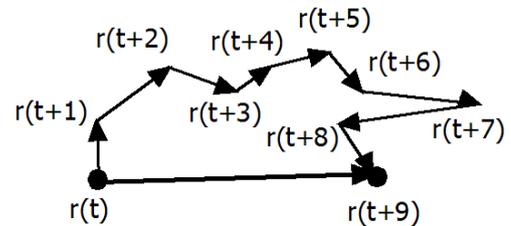


図4 軌跡と中心極限定理効果

Fig.4. Trajectory and central limit theorem effect.

中心極限定理としてよく知られているように、確率変数の累積値は、元の確率分布が不変ならば、累積を長く取れば、正規分布に従うと見なせる。

時系列位置データは、図4にしめすように、微小な速度ベクトルの累積で成り立っている。よって、サンプリング時間を充分長く空ければ、正規分布に従う確率変数になるはずである。

また、正規分布同士の差の分布もまた正規分布になる。よって、位置の差分である速度や加速度も正規分布になると見なせる。

したがって、加速度ベクトルの分布は正規分布に従うと近似できる。実際には、人間の行動は数学を超えて複雑であるので、正規分布ではない。だが、近似としては上記の理由である程度妥当であるし、計算の実施容易性も備えている。

次に、情報量の計算式(7)を説明する。正規分布の確率変数が帯びる情報量は、その標準偏差の対数として公式化されている[4]。

この公式を軌道データに適用する。ふらふらした移動に制御努力を行って、比較的まっすぐな移動にしたとする。その制御努力に要した情報量は、制御実施前の標準偏差の対数から、制御実施後の標準偏差の対数を引いた値である。例えば標準偏差 6[cm]のふらつきが 3[cm]に抑制されたなら、その制御は $\log(6/3)=\log 2=1$ [bit]の情報を生み出したことになる。

制御実施前のふらつきの標準偏差は、実験手順として計測しにくいので、全実験データにおける加速度の標準偏差で代用する。

3. 自動車の運転席周辺機器の操作での分析実験

実際に、人間の挙動を提案手法で分析してみた。

3.1 実験装置

自動車の運転席(トヨタ Vits)のモックアップを用意し

た(図5)。インパネのセンターコラムにカーエアコン、運転席左方にカーナビ装置、左下脇にセレクタレバーを配置した。

モックアップの上方天井には、超音波タグ式位置計測装置(Intersence社 IS-600)を設置した。被験者の左手首に超音波発信機を装着することで、そのXYZ座標を、計測周期247Hz、分解能1mmで計測する。非連続的な計測誤差が生じるため、装置内臓のカルマンフィルタを適用してデータの平滑化を行っている。

3.2 手順

実験のシナリオでは、運転手は前方を注視しながら、盲目操作でカーエアコン、カーナビ、セレクタレバーに左手で触ろうとする場面を再現する。

接触を試みるターゲットは図6のように6個設定した。セレクタレバー以外のターゲットの部分には、触感だけでターゲットと判別できるように、直径5cmの木の半球を貼付した。

初めに被験者は運転席に着座し、ターゲットをそれぞれ視認し、また手を伸ばして接触し、ターゲットの番号、位置、触感を記憶する。

次に、被験者は目隠しをし、両手でステアリングホイールを握り、右手は実験を通じてホイールを握り続けるように指示される。

準備が終わると、人工音声で4秒おきに読み上げる1から6の数字に応じたターゲットを、視覚を用いずに左手で接触するように指示される。

実験時間は120秒であり、30回の接触タスクを課すことになる。ターゲットの呼び順はランダムであり、各ターゲットとも平等に5回ずつ呼び出される。

3.3 軌道データの分析

1名の被験者の実験結果に対して、提案手法を用いてみる。

被験者の左手首の軌跡は図7のように得られた。各ターゲットと、ステアリングホイールとの往復が繰り返されている。

まず、軌跡をグラフ化し、大域的構造を明らかにする。

左手首の存在確率を、調和平均法で計算すると図8のようになった。存在確率の極大点は図9の3箇所があった。

この3点だけではグラフの構造が単純すぎるので、頂点の追加を行った。追加する頂点は次のように定めた。軌道上の点にすいて、すでに採用された頂点との距離の最小値を算出する。その値が最大であり、軌道上の全点との値の平均値から標準偏差の2.2倍以上大きい点を、新しい頂点として採用した。こうして、頂点数27個のグラフを得た(図10)。



図5 実験用運転席モックアップ
Fig.5. Experimental Car Cockpit Mockup



図6 接触すべきターゲット
Fig.6 Targets to reach.

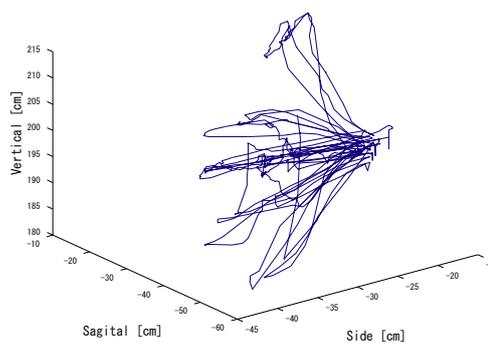


図7 手首の軌跡
Fig.7. Trajectory of a subject's wrist

各グラフの頂点にて増減する、経路選択に関する情報量を算出した(図11)。増減量は-0.1~0.2[bit]であった。

実際のインパネでの、情報量が増加する頂点(分岐点)と、減少する頂点(合流点)の位置を確かめると、図12のようになった。

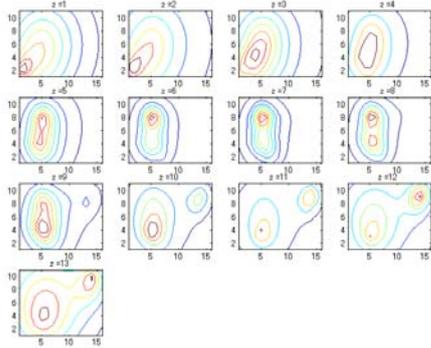


図8 手首の存在確率分布
Fig.8. Existence Probability of the wrist

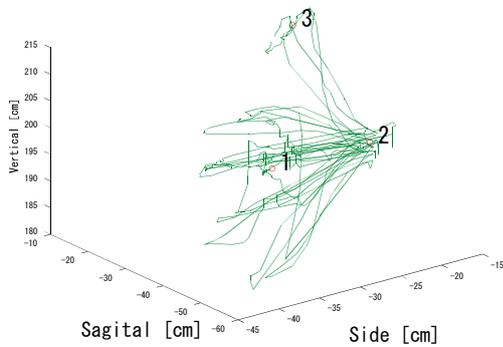


図9 存在確率の極大点
Fig.9. Local Maxima of existence probability

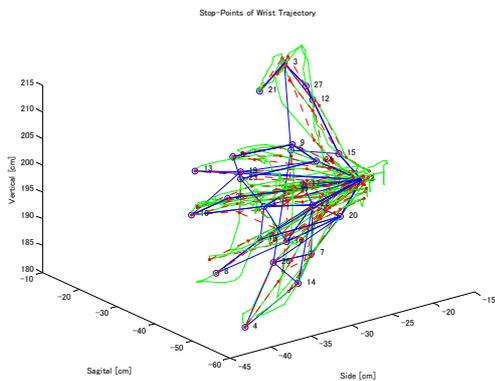


図10 グラフ化した手首軌道
Fig. 10. Graph generated from the wrist trajectory.

分岐点は、行動の出発点であるステアリングハンドルに近い位置に分布する傾向がある。これは行動の初期段階で経路選択の思考を行っていることに対しては、妥当な結果である。

逆に、合流点は、ホームポジションから遠い、カーナビ装置表面などに多く発見された。これはカーナビ接触作業が終了したので、いままでの経路選択を忘れ、ホームポジションへ帰還する状況を表している。

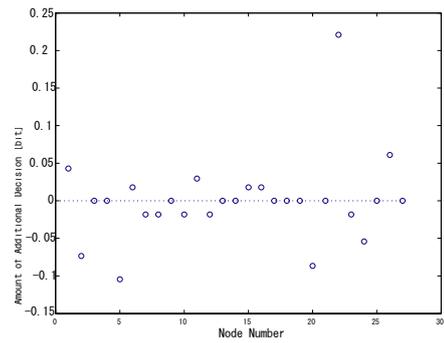


図11 頂点の合流分岐情報量
Fig.11. Routing Information provided on Nodes.



図12 分岐点 (+印) と合流点 (★印)

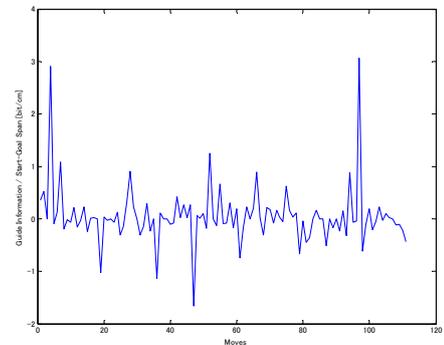


図13 辺内移動の誘導情報量 [bit/cm]
Fig.13. Navigation information within each edge [bit/cm].

Fig.12. Branching Points (+) and Junctions (star).

次に、辺の中での手首の誘導を分析する。誘導量を辺の始点から終点までの直線距離で割り正規化した結果を図13に示す。この結果を軌道に対応付けると、図14で青線で示した移動は誘導情報量が正(=ふらふらしていない)であり、赤線で示したものは負である。

実際の装置での対応を見てみる。図15は誘導の強い移動の上位3本を、図16は誘導の弱い下位3本の移動を、装置の写真に対応付けたものである。ステアリングから出発する作業開始時は比較的誘導が強く、逆に作業を終えてステアリングに帰還するときは誘導が弱くなることが分かる。これは作業をこなそうとする意義込み

と、作業を終えた安心との、心理変化によるものであると考えられる。

4. 分析結果の利用法と結論

人体の移動データから、人間の作業フェーズや移動の容易性を分析する手法を提案した。具体的には、自動車運転席の周辺にある、セレクトレバーやカーラジオの配置がユーザビリティに与える影響を、軌道を分析することで評価した。

この分析結果はインタフェースの改良に役立てられる。経路選択の情報量が大きい頂点は、そこでユーザが経路選択を考える点であり、よく使うランドマークといえる。このような頂点は、手の届きやすい位置にあった方が疲れない。誘導の弱い移動は、ボタンの探しにくさや押し間違えを意味する。このような移動を避けるように、ボタンの配置を改良するべきである。

また本手法を使えば、人間の移動特性を数量モデル化できる。分析データのまねをする仮想ユーザモデルを使えば、操作性評価実験をシミュレーションにて実施できる(図 17)。

参考文献

- [1] Able, P.A.: "Mechanisms of orientation, navigation, and homing," in Gauthreaux, S.A. (ed.): *Animal Migration, Orientation, and Navigation*, Academic Press, (1980).
- [2] Dixon, K.R. & Chapman, J. A.: "Harmonic mean measure of animal activity areas," *Ecology*, vol.6 No.15, pp.1040-1044, (1980).
- [3] Lehner, P.N.: "Handbook of ethological methods 2nd ed.," Cambridge University Press, (1996)
- [4] Wilson, E.O.: "Chemical communication among workers of the fire ant *solenopsis saevissima* (Fr. Smith) 2. An information analysis of the odour trail," *Animal Behaviour*, Vol.10, pp.148-164, (1962).
- [5] 粕谷: 「行動生態学入門」, 東海大学出版会, (1990).

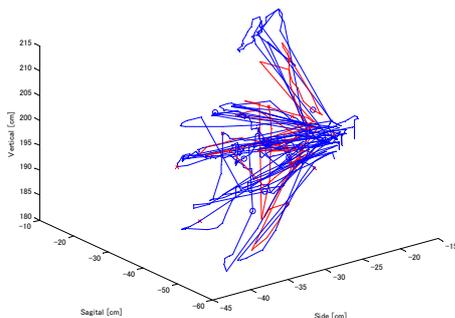


図 14 誘導が正の軌道 (青) と負の軌道 (赤)

Fig.14. Guided moves (blue) and uncertain moves (red).



図 15 直進性の高い軌道区間の上位 3 本

Fig.15. Most guided trajectory segments



図 16 直進性の乏しい軌道区間の上位 3 本

Fig.16. Least guided trajectory segments

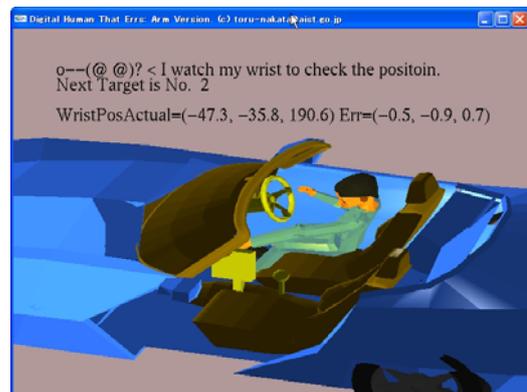


図 17 誘導能力特徴を反映した仮想ユーザ

Fig.17. Virtual driver simulation using the real human's navigation characteristics.