

乗用車の助手席への乗り込み動作分布の可視化と代表動作の合成

川地克明 *1*2 青木慶 *1*2 持丸正明 *1*2 河内真紀子 *1*2

*1 独立行政法人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

E-mail: {k.kawachi|aoki-kei|m-mochimaru|m-kouchi}@aist.go.jp

乗用車の座席位置や扉の形状が乗降者の動作に与える影響を予測することを目的とし、異なる扉と座席配置に対する乗り込み動作を計測し、これらを互いの動作類似度によって2次元平面上に配置することで設計者がありうる乗り込み動作の分布を閲覧することを可能にした。また、計測された動作データ群に基づいて分布図上での動作グループを代表する動作を対話的な操作で合成・提示する手法を開発した。

Visualization and Classification of Motion Strategies for Ingress

KATSUAKI KAWACHI *1*2

KEI AOKI *1*2

MASAAKI MOCHIMARU *1*2

MAKIKO KOUCHI *1*2

*1 Digital Human Research Center, AIST (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

*2 CREST, JST (Japan Science and Technology Agency)

E-mail: {k.kawachi|aoki-kei|m-mochimaru|m-kouchi}@aist.go.jp

This paper proposes a method for visualizing and classifying the variation of ingress motions for passenger vehicles with different layouts of front doors and driver's seats. The motion distribution map is based on the similarity of ingress motions, which is helpful for browsing the variation of possible ingress motions. The representative ingress motion is synthesized with interactive speed on the distribution map based on the captured motions.

1 序論

本研究の目的は、自動車の乗り込み動作においてユーザがどのような動作を取りうるのかを計算機上で予測することにある。自動車を乗り降りする時の身体の運動は、ユーザの身体寸法や身体能力に加え、自動車のシートの大きさやその配置、乗降口の広さと形状などに影響される。また、身体的な運動の負荷だけではなく、見た目の広さや明るさなどの視覚的な要素、動作の安定性、動作に対する慣れ、見た目の格好良さなども乗降動作戦略を決定する要因となりうる。このとき、運動の戦略を決定する要因は、乗降を通じて必要な運動のエネルギーを最小化するという単純な評価関数だけではモデル化できない。

そこで本研究では、設計者が運動のばらつきを知るために特定の座席の設計値に対してどのような動作戦略の分布がありうるのかを提示する手法を開発する。動作戦略の分布範囲は、あらかじめさまざまな乗り込み動作を実際に測定し、この動作群を動作の類似度によって2次元平面上に配置した動作分布図上での領域によって表す。また、分布領域を代表

する運動を測定された動作データの補間によって合成し、設計者に提示する。

2 乗り込み動作の測定

本研究では、乗用車の外に立った人間が助手席に着座するまでの動作を解析の対象とする。また、動作に関する制約として、体の支えとして手を車体等に触れることがなく、両手を空中に保ったまま着座することと、着座動作途中での足の踏み変え回数を最小限にすることの2つの条件を与える。

運動データを取得するための乗り込み動作測定は光学式モーションキャプチャ装置によって行う。また、座席の各所と、乗降口を代表する枠の角にも反射マーカを取りつける。図(1)に乗り込み動作の測定の様子を示す。



図 1: 乗降動作の測定

3 乗り込み動作の分布

測定した乗り込み動作は人間の全身運動を表しており、各体節の位置姿勢の時系列データからなる。本研究ではありうる動作のばらつきを知るために、運動データを相互の類似度によって2次元平面上に配置することで動作の分布図を生成する。ある動作データ q_i が2次元動作分布図上の点 r_i へと配置される場合、互いに類似した動作 q_s と q_t の組を二次元平面上で接近した点の組 r_s と r_t に対応づける。

3.1 動作の比較

乗り込み中のある時点 t における被験者の姿勢を体節の位置姿勢から成る姿勢ベクトル $h(t)$ によって表す。このとき、運動全体を表すベクトル q は乗り込み開始から終了までのすべての姿勢 $h(t)$ を含む。

乗り込み運動の持続時間は個々の乗り込み動作によって異なるため、運動ベクトル q の次元も動作毎に変化する。このような互いに次元の異なる運動ベクトルの対 $\langle q_s, q_t \rangle$ の類似度を計算するために、本研究では乗り込み動作中で運動の特徴を表す瞬間(キーフレーム)を定義する。キーフレーム k の数はすべての動作において共通とし、動作 q_i 中のキーフレーム姿勢群から正規化された次元を持つ運動特徴ベクトル u_i を生成する。

本研究で測定を行った自動車の乗り込み動作に対しては、キーフレーム群を以下の8つの事象が発生する瞬間として定義した。

- 足が地面から離れる瞬間(図2(1), (6))
- 足首がドア平面を通過する瞬間(図2(2), (7))
- 股関節がドア平面を通過する瞬間(図2(4), (5))
- 足が床板上に着地する瞬間(図2(3), (8))

なお、「ドア平面」とはキーフレームの瞬間を定義するための仮定の平面であり、ドアの敷居部分に対して平行で、地面に対して垂直な平面である(図3)。また、各動作データに対するキーフレーム瞬間の指定は手作業によって行っている。

3.2 運動特徴ベクトル

自由度を正規化した運動特徴ベクトル u_i は、乗り込み動作 i のキーフレームにおける姿勢群から計算する。キーフレーム k での姿勢に対応する特徴量ベクトルを姿勢特徴ベクトルと呼び、これを $p_{ik} = (p_1^{ik}, p_2^{ik}, \dots, p_m^{ik})^T$ によって表す。運動特徴ベクトル u_i は全キーフレームの姿勢特徴ベクトル p_{ik} の全要素を並べた $k \times m$ 次元のベクトル

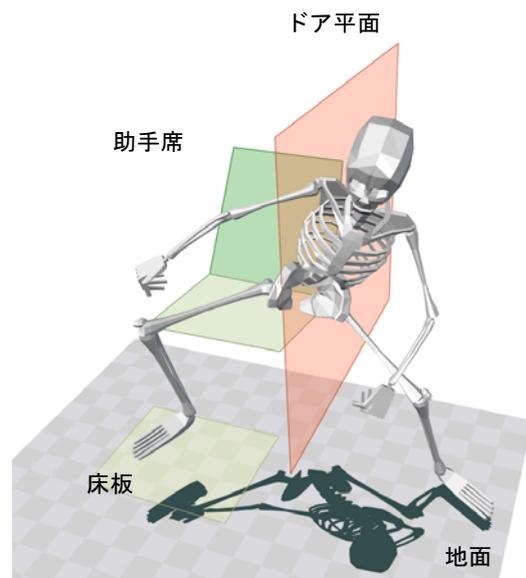


図 3: ドア平面

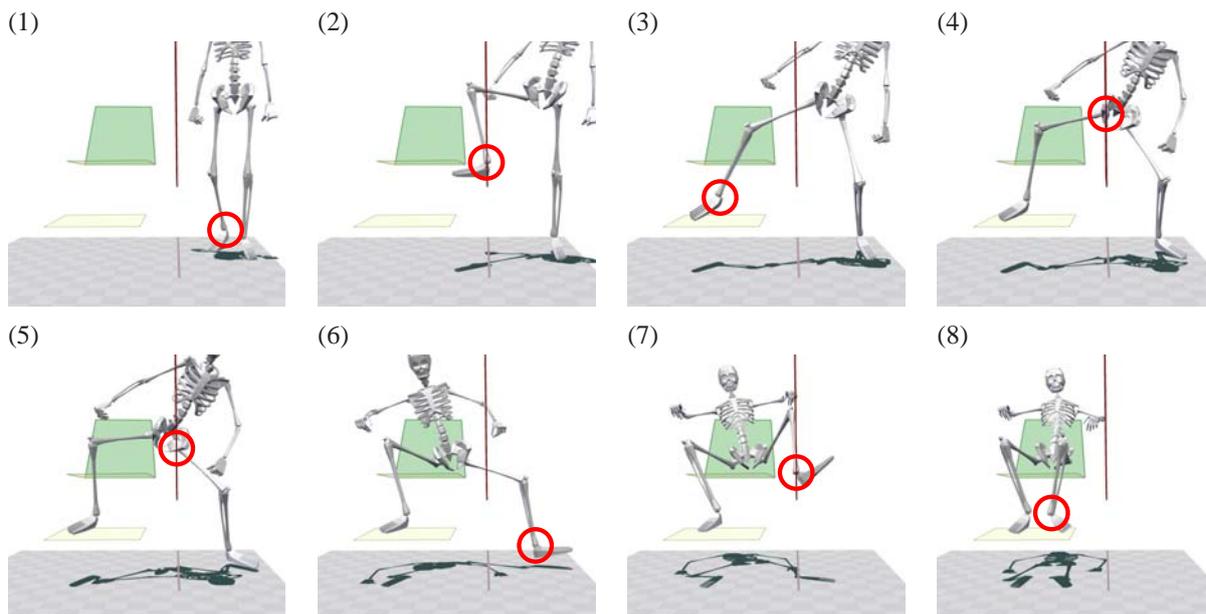


図 2: 運動特徴ベクトルを計算するためのキーフレーム群の定義

$\mathbf{u}_i = (p_1^{i1}, \dots, p_m^{i1}, p_1^{i2}, \dots, p_m^{i2}, p_1^{ik}, \dots, p_m^{ik})^T$ として構成する。

姿勢特徴ベクトル \mathbf{p}_{ik} は対応するキーフレームの瞬間の姿勢から計算される。本研究では自動車への乗り込み動作に対して、体幹の傾きと向き (単位ベクトルに正規化)、腰関節の伸展度・首の伸展度・股関節から両足先への方向ベクトル (単位ベクトルに正規化)、両足の開脚度、膝関節の伸展度を用い、一姿勢あたり 18 次元の姿勢特徴ベクトルを構成した。結果として、運動特徴ベクトル \mathbf{u}_i は 8 つのキーフレームにおける姿勢特徴ベクトル \mathbf{p}_{ik} ($1 \leq k \leq 8$) から構成され、144 次元のベクトルとなる。2 つの運動 s, t の類所度 d は、こうして定義される運動特徴ベクトル $\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_t$ の差分の大きさによって $d = \|\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_t\|$ と定義する。

3.3 動作分布図

運動測定データから得られた運動特徴ベクトル群 \mathbf{u}_i を 2 次元平面の動作分布図として配置するために、本研究では GPLVM (Gaussian Process Latent Variable Models[1]) を利用する。この手法を用いることにより、運動特徴ベクトルの対 $\langle \mathbf{u}_s, \mathbf{u}_t \rangle$ の類似度が高い場合には 2 次元平面上で近い位置にある点 $\langle \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_t \rangle$ として配置され、互いに似ていない運動特徴ベクトルの対は遠い配置とすることができる。

GPLVM による配置は主成分分析 (PCA, Principal Component Analysis) を一般化したものであり、 \mathbf{u}_i と

\mathbf{r}_i との間に非線型な対応づけを行う。この手法を利用することにより、多次元ベクトルを主成分分析によって 2 次元平面へと射影した場合に第 1・第 2 主成分方向に対して直行する成分についても、その差を反映した平面上への配置を行うことが可能になる。

本研究では 1 名の被験者が 4 種類の異なる乗用車に乗り込む合計 8 種類の動作を用いて動作分布図の作成を行った。動作の測定を行う際には、扉の大きさと座席の取り付け高さを変更できるモックアップ装置を使用した。乗用車の扉は長方形の枠組みによって代表させている。扉の上部 (ルーフレール) の高さ と座席の鉛直方向の位置は実在する車種に基づいており、その値を表 1 に示す。扉の幅と座席の形状はどの車種においても共通とした。被験者には各車種について 2 つの動作戦略を用いて乗り込みを行わせる。一つは (A) 頭を先に差し入れる乗り方、もう一つは (B) 腰を先に差し入れる乗り方である。

表 1: 扉と座席の配置

車種	d	s
car 1 スモールワゴン	927	0
car 2 ワゴン	1061	+69
car 3 スポーツ	827	-36
car 4 セダン	927	-36

d : 扉のルーフレールの高さ (mm)

s : 座席の鉛直方向オフセット (mm)

4 動作の分類と代表動作の合成

動作分布図上では、測定された動作は互いの類似度によって2次元平面上に配置される。このとき、動作の戦略が似た運動データ群同士は、分布図上でいくつかのグループを構成する。本研究で測定した自動車の乗り込み動作から生成した動作分布図(図4)においては、腰から先に乗り込む動作群と、頭から先に乗り込む動作群のグループが構成されることがわかる。

GPLVMによって生成した動作分布図上では、分布図上の任意の点 \mathbf{r} に関して分布図上に配置された乗り込み運動に対する重み付けが行われる。この重みを利用して乗り込み動作を補間し、点 \mathbf{r} に対応する乗り込み動作を合成する。このような動作の合成により、ユーザが分布図上で任意の点を指定して対応する乗り込み動作を閲覧し、動作戦略のグループの中心や辺縁にある動作がどのようなものになるかを予測するといった操作を可能にする。

4.1 キーフレーム姿勢の合成

分布図上の点 \mathbf{r} に関して、GPLVMによって乗り込み動作 \mathbf{q}_i に与えられる重みを s_i とする。 \mathbf{r} に対応する乗り込み動作 $\mathbf{q}(\mathbf{r})$ を合成するために、本研究の手法ではまずキーフレーム k での姿勢 $\mathbf{h}(\mathbf{r}, k)$ を合成し、次にキーフレーム間を測定された動作によって補間する。

キーフレーム k での姿勢 $\mathbf{h}(\mathbf{r}, k)$ は、測定された動作中のキーフレーム姿勢を係数 s_i によって重み付けすることによって計算する。

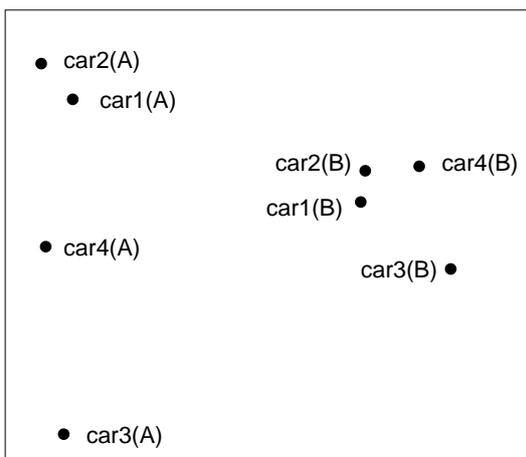


図4: 8動作(4車種・2動作戦略)に関する乗り込み動作分布図

$$\mathbf{h}(\mathbf{r}, k) = \sum_i s_i \mathbf{h}_{ik} \quad (\text{ただし } \sum_i s_i = 1)$$

本研究では姿勢を世界座標系中の関節点の位置によって表現する。したがって、合成されたキーフレーム姿勢 $\mathbf{h}(\mathbf{r}, k)$ も関節点位置の集合であるが、関節点位置を点の座標の単純な加重和によって計算しているため関節点間のリンク長が一定に保たれない。

そこで本研究では、人体アニメーションを変形して幾何的拘束を満足させる手法[2]を利用してリンク長に拘束を与える。このとき、関節点位置の線形和によって得られる姿勢 $\mathbf{h}(\mathbf{r}, k)$ を入力とし、リンク長を一定に保つ拘束条件を満足するように関節点位置を調節する。また、キーフレーム姿勢における幾何的な拘束条件を考慮し、地面や床板に接触している関節点はその位置を変化させないように優先的に位置を拘束する。

また、各キーフレーム k が運動の中で位置する時間 $t(\mathbf{r}, k)$ も同様の重み付によって合成する:

$$t(\mathbf{r}, k) = \sum_i s_i t_{ik} \quad (\text{ただし } \sum_i s_i = 1)$$

ここで、 s_i によって重み付されて加算される時間 t_{ik} は、動作が始まった瞬間を $t=0$ とし、終わった瞬間を $t=1$ として正規化された時間とする。

4.2 動作の合成

分布図上の重み付けと幾何的な拘束条件から合成された姿勢 $\mathbf{h}(\mathbf{r}, k)$ を、同様に重み付によって合成された瞬間 $t(\mathbf{r}, k)$ に配置する。キーフレーム間の運動は、測定された運動を両端の姿勢に一致するように変形してはめこむことによって補間し、乗り込み動作全体を合成する。

本研究では、アニメーション変形手法[2]における直行座標系内での点の離散的な位置による軌道 $\mathbf{M}^x = \{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_n\}$ によって関節点の運動を表現する。この軌道 \mathbf{M}^x を、キーフレーム姿勢での位置 \mathbf{x}_1 および \mathbf{x}_n 、直前の軌道との速度の一致のための点の位置 \mathbf{x}_0 を拘束することにより、軌道 $\mathbf{M}^y = \{\mathbf{y}_0, \mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_{n-1}, \mathbf{y}_n\}$ へと変形する(図5)。点 \mathbf{x}_0 および \mathbf{x}_0 は、軌道の始点での速度 \mathbf{v}_0 を \mathbf{w}_0 へと拘束するために離散的軌道表現へと置き換えられた点である。変形された軌道 \mathbf{M}^y は重み s_i を用いて重み付けし、リンク長と接触に関する幾何的拘束条件を課して一連の運動を合成する。

この手法は高速に運動を変形することができるため、ユーザが分布図上で指定した点に関して即座に

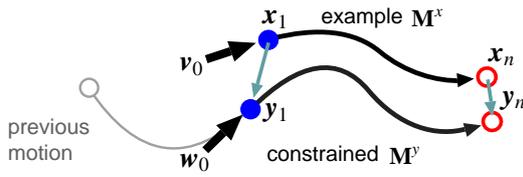


図 5: 関節点軌道の幾何的拘束条件による変形

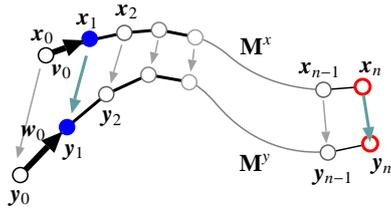


図 6: 関節点軌道の離散的表現による変形

これに対応する運動全体を合成する対話的な操作が可能になる。

4.3 キーフレームの時間順序

測定された乗り込み運動 i のキーフレーム k ($k = 1, 2, 3, \dots$) の位置する瞬間 t_{ik} は必ずしもキーフレームのインデックスと同じ順序に並んでいるとは限らず、ある運動 j では

$$t_{j1} < t_{j2} < t_{j3}$$

となり、別の運動 l では

$$t_{l1} < t_{l3} < t_{l2}$$

といったようにキーフレームの時間順序が入れ替わる場合がある。分布図上で運動を合成する際には、合成されたキーフレームの瞬間 $t(r, k)$ と同じ並び順を持つ運動 i だけを抽出して重み付けし、キーフレーム間の運動を補間する。

4.4 動作合成の結果

本研究で測定した2つの動作戦略に関して、その動作グループの中心付近での点を指定し、それぞれ (A) 頭を先に差し入れる乗り方 および (B) 腰を先に差し入れる乗り方の代表動作として合成した。合成された動きを (図 7) に示す。

5 結論と展望

本研究では、乗り込み動作を測定した運動データを動作の類似度によって2次元平面上の分布図上として配置することにより、座席の配置や大きさによるありうる動作の分布を可視化した。このとき、GPLVMを用いてモーションの類似度を計算するためのキーフレームの決定方法と運動特徴ベクトルの計算方法を定めた。また、人体アニメーションの変形手法を応用し、分布図上での位置に対応する乗り込み動作全体を生成した。

本論文の手法では、あるキーフレーム内の姿勢(関節角度)から得られる特徴ベクトル(18次元)を、8つのキーフレームに対して計算して運動特徴ベクトルとしており、乗り込み動作内の時間的な要素(フレーム間の時間差分を用いた特徴ベクトル)は含まれていない。特徴ベクトルの要素には特にどの物理量を与えるかという制約はないため、速度や加速度といった時間軸に関連する要素を追加することは可能であり、今後手法の拡張を行いたい。

本研究では乗り込み動作における足の踏み変えは必要最小限の回数行われることを仮定しており、この仮定の下では上で定義したキーフレームの瞬間をどの乗り込み動作データに対しても決定できる。しかし、より大型の乗用車やバス、トラックなどでの乗り込み動作を扱うためには、踏み変え動作の歩数が異なる動作をモデル化するためのキーフレーム群を新しく定義する必要があると考えられる。

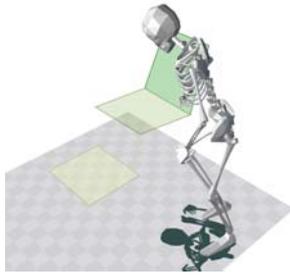
謝辞

本研究はデジタルヒューマン技術協議会およびCREST, JST (科学技術振興機構) の研究プロジェクトの一貫として行われた。

参考文献

- [1] Neil D. Lawrence. Gaussian process models for visualisation of high dimensional data. In L. Saul S. Thrun and B. Schölkopf, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*. MIT Press, Cambridge, MA, 2004.
- [2] Katsuaki Kawachi, Takeo Kanade, and Hiromasa Suzuki. A lightweight algorithm for real-time motion synthesis. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 49–56, November 2004.

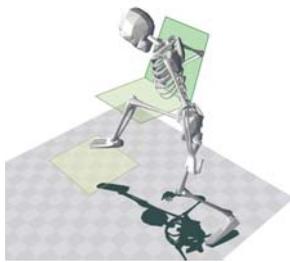
(A1)



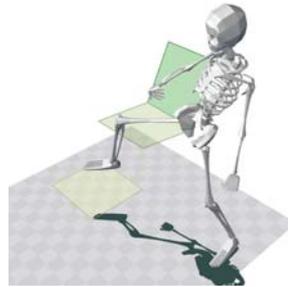
(B1)



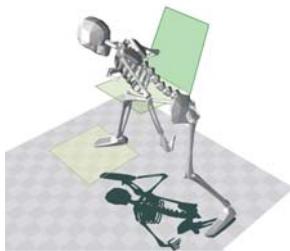
(A2)



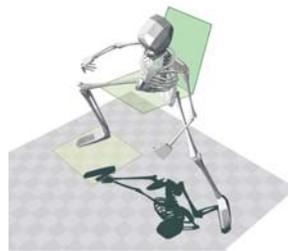
(B2)



(A3)



(B3)



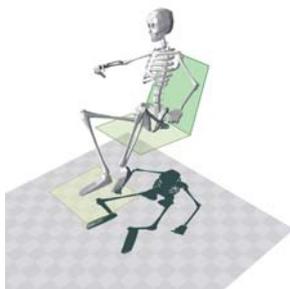
(A4)



(B4)



(A5)



(B5)



図 7: 動作戦略を代表する運動の合成: (A1...A5) 頭から乗り込む戦略, (B1...B5) 腰から乗り込む戦略