



意図の理解と行動の再現のための上肢到達運動の分析

清水ありさ¹⁾, 三武裕玄²⁾, 長谷川晶一²⁾

1) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-626, ashimizu@haselab.net)

2) 東京工業大学 精密工学研究所 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-624, {mitake,hase}@haselab.net)

概要: 作業支援のためのロボットや CG エージェントには人の動作から行動意図を察することが期待される。本研究では、次々と目標位置が切り替わるときの上肢の到達運動をモーションキャプチャし、躍度最小モデルを適用して到達対象物体の時系列変化を分析した。分析によって、連続な動作データから手先到達予定位置の列という離散的な記号列を得ることができる。これにより行動を再現するための状態遷移機械の構成を行い、バーチャルヒューマンやキャラクタの動作生成、共同作業中の行動意図の認識を目指す。

キーワード: バーチャルヒューマン, 到達運動, 躍度最小モデル, 動作生成

1. はじめに

ロボットや CG エージェントなどの人工物が、生活の中で人を支え、親しまれる存在となる事が期待されている。こうした場面において人間とエージェントが協調して行動できるためには、エージェントが人間の意図を理解し、同時にエージェントの意図を動作や表情で人間に分かりやすく表出する事が求められる。そのような協調作業を実現する AI を手作りで作成することには自然さに限界がある。そこで人間同士の協調作業における動作の実例から協調作業をモデル化する状態遷移機械や HMM 等を構築し、協調作業を実現する AI の作成に役立てることを考える。特に協調作業中の手の動作からは、操作や指示の対象という、作業者の意図を示す情報が得られると考えられる。

協調作業中の手の動作は連続な座標データである。一方で、手の動作を分析して到達対象を示す記号列が得られれば、操作意図の変遷を直接記述した状態遷移機械が生成できると考えられる。このような状態遷移機械は連続な座標値そのものに基づくものより簡潔になり可読性が高くなると期待できる。

以上より、本研究では作業中の手先動作の分析による到達対象を示す記号列を得る手法の構築を目的とする。

2. 先行研究

投げられたボールをキャッチするときの手先の運動や視線を解析し、人型のキャラクタにより再現した研究として Yeo らの研究 [1] が挙げられる。この研究ではボールをキャッチするときのような素早い動きを再現するために手先の到達運動を躍度最小モデルに基づき解析を行っているが、人の意図を分析するという観点での解析は行っていない。また、Wada ら [2] は躍度最小モデルを文字を書くときの動作に適用することで、書字動作が少数の経由点で説明できることを

示した。この研究でも躍度最小モデルを用いているが、到達運動ではなく文字を書く動作に適用している。また、この研究についても意図の分析という観点での分析は行われていない。草野ら [5] は、指差し動作に躍度最小モデルを適用することで指差しが止まる位置の予測を行ったが、複数の躍度最小軌道が足しあわされる軌道については検討を行っていない。

本研究では、物を手にとって組み立てるといった作業時の手先動作に対し同様の分析を行うことで、作業者の操作・指示の意図を反映した経由点を得られることを示す。

3. 提案手法

提案手法では、手先座標の連続な時系列データを入力とし、到達目標位置の列を出力する。まず、手先運動の接線方向の速度の時系列データを、開始・終了時刻と最大速度の異なる複数の躍度最小到達運動の和であると仮定してフィッティングを行い、連続な手先運動を複数の到達運動に分解する。次に得られた各到達運動の開始時刻・終了時刻を用いて躍度最小軌道をフィッティングし、各到達運動の到達目標位置を算出する。

3.1 躍度最小モデル

手先の到達運動を説明するモデルとして、Flash[3] らは躍度最小モデルを提案した。

$$C_J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left(\frac{d^3x}{dt^3} + \frac{d^3y}{dt^3} + \frac{d^3z}{dt^3} \right)^2 dt \quad (1)$$

(1) 式が最小になるように軌道が計画されるモデルが躍度最小モデルである。到達位置の座標は時間の 5 次多項式で表され、2 点間の運動において、始点と終点では速度、加速度が 0 として多項式に現れるパラメータを決めると、軌道

は次式で表される。

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + (x_0 - x_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3) \\ y(t) &= y_0 + (y_0 - y_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3) \\ z(t) &= z_0 + (z_0 - z_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 x_0, y_0, z_0 は各方向における運動の初期位置、 x_f, y_f, z_f は終端位置を表し、 $t_0 \leq t \leq t_f, \tau = \frac{t-t_0}{t_f-t_0}, 0 \leq \tau \leq 1$ である。式を時刻 t の 1 階微分で表すと速度については次式で与えられる。

$$v_x(t) = (x_f - x_0) \left\{ 30 \frac{(t-t_0)^4}{(t_f-t_0)^5} - 60 \frac{(t-t_0)^3}{(t_f-t_0)^4} + 30 \frac{(t-t_0)^2}{(t_f-t_0)^3} \right\} \quad (3)$$

(y, z についても同様)

なお、(3) 式をプロットすると図 1 のようなベル型の波形で表される。

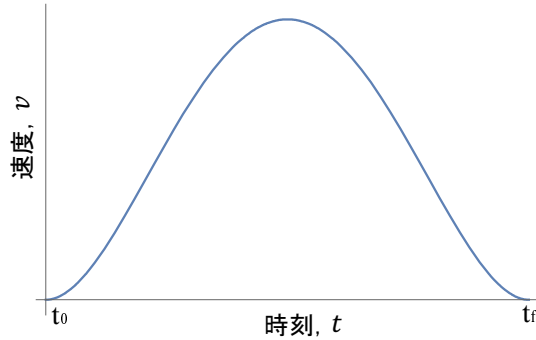


図 1: 躍度最小モデルの速度波形

3.2 躍度最小モデルを適用した手先のモーションデータのフィッティング

人の手先の到達運動の速度波形は、図 1 のような単一のベル型波形のみではなく、複数のベル型波形が足しあわされたような形で表されることも多い。例として、図 2 に積み木の組立作業中における手先のモーションデータの速度波形の一例を示す。ある積み木へ手先を到達させている途中に到達目標とする積み木が切り替わった場合などにこのような速度波形となることが多い。

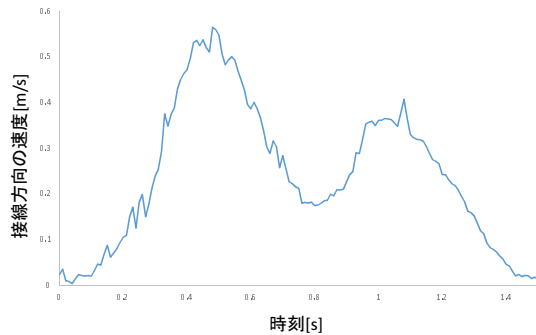


図 2: 積み木の組み立て作業における、到達途中に目標位置が切り替わる場合の速度波形の例

次に、フィッティングの方法を示す。モーションデータから求められる手先の接線方向の速度を $v_{tangential}(t)$ 、フィッティング対象の関数を $v_{synthesized}(t)$ 、両者の自乗誤差を E とし、

$$v_{tangential} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (4)$$

$$v_{synthesized}(t) = \sum_{n=0}^{n_b} A_n \left\{ 30 \frac{(t-t_{n0})^4}{(t_{nf}-t_{n0})^5} - 60 \frac{(t-t_{n0})^3}{(t_{nf}-t_{n0})^4} + 30 \frac{(t-t_{n0})^2}{(t_{nf}-t_{n0})^3} \right\} \quad (5)$$

$$E = \sum_{t=t_0}^{t_f} \{v_{tangential}(t) - v_{synthesized}(t)\}^2 \quad (6)$$

と定義する。このとき、フィッティングは、自乗誤差 E を最小化するような n_b, A_n, t_{n0}, t_{nf} を求めることによって行った。

また、得られる経由点の数が多くなり過ぎないようにするため、フィッティング誤差がある閾値以下となった時点で経由点数 n_b の増加を打ち切るものとした。打ち切りの判定は、二乗誤差 E を運動に要した時間及び速度の最大値で割ることで正規化した $E_{normalized}$ (式 (7)) によって行った。

$$E_{normalized} = \frac{E}{(t_f - t_0) \max(v_{tangential})} \quad (7)$$

以上の方法により求めたパラメータを用い、到達予想位置を求める。手先位置のモーションデータを $x(t)$ 、フィッティング対象の関数を $x_{synthesized}(t)$ 、両者の二乗誤差を E_x とし、

$$x_{synthesized}(t) = \sum_{n=0}^{n_b} A_n \left[x_{n0} + (x_{nf} - x_{n0}) \left\{ 15 \left(\frac{t}{t_f} \right)^4 - 6 \left(\frac{t}{t_f} \right)^5 - 10 \left(\frac{t}{t_f} \right)^3 \right\} \right] \quad (8)$$

(y, z についても同様)

$$E_x = \sum_{t=t_0}^{t_f} \{x(t) - x_{synthesized}(t)\}^2 \quad (9)$$

(y, z についても同様)

と定義する。このとき、フィッティングは、二乗誤差 E_x を最小化するような $x_{n0}, x_{nf}, y_{n0}, y_{nf}, z_{n0}, z_{nf}$ を求めることによって行った。

4. 実験

本分析の対象のタスクとして、40 インチのモニタ画面 (BRAVIA KDL-10V2500, SONY) に表示した円形の図形を 0.1~0.16 秒のランダムな間隔で、ランダムな座標に移動させ、この図形の中心の点を利き手の人差し指で追いかけるというタスクを設定した。(図 3)

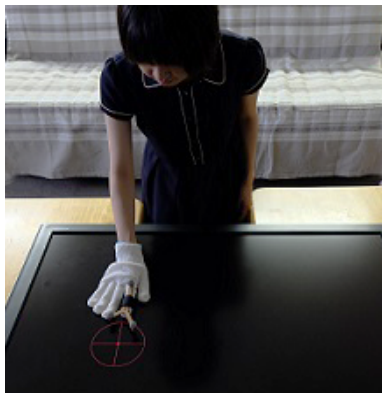


図 3: 実験の様子

5. 評価

3.2 節で述べた手法により 4. 節のタスクにおける手先の到達運動の分析を行った。図 5, 図 7, 図 9 上にモーションデータの接線方向における速度波形と本手法により行ったフィッティング結果を重ねて表示したグラフの一例を示す(以下, これらの到達運動をそれぞれ運動 1~3 とする)。各グラフとも, ピンクの線が実際のモーションデータの速度波形を示し, その他の線はフィッティングにより求めた速度波形を表す。モーションデータの速度波形が複雑であっても, 本手法を適用することにより複数のベル型波形に分解できることが確認できた。

次に, 代表例として運動 3 におけるモーションデータの位置波形及びフィッティング結果を図 4 に示す。それぞれの線はモーションデータの位置波形(灰色), x 方向(ピンク色), y 方向(緑色), z 方向(青色)を表す。一部, 実データとのずれがあるものの, 位置波形を概ね再現できたことがわかる。

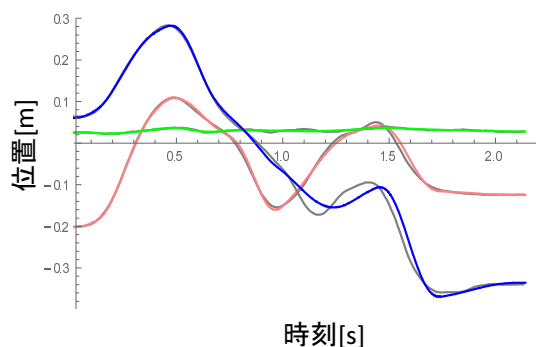


図 4: 運動 3 の位置波形・フィッティング結果

さらに, 図 6, 図 8, 図 10 にモニタに表示した到達目標の図形的位置 (T とする) とモーションデータの手先の軌道(灰色の線), フィッティングにより再現した軌道(ピンク色の線), フィッティングの結果得られた到達予想位置 (F とする) を xz 平面に表した図を示す。T, F に割り振った数字は到達した順番を示す。また, 図 6, 図 8, 図 10 下に T1 を時刻 0 としたときの各 T が表示された時刻, 分解した到達運動が最後まで完了する場合に手先が各 F を通過し

たと推測される時刻を示す。到達目標である T に到達完了する場合には, T と F が一致すると考えられる。

図 8 では, T1 の付近である F1 を通過した後 T2 へ到達しようとしたが, 到達する途中で目標位置が T3 に切り替わってしまったために F2 には到達完了しなかったが, 本手法を適用することで F2 の座標を推定できたことがわかる。また, 図 10 では T1 に到達するために F2 を通過したものの, すぐに目標位置が T2 へ切り替わり, さらに T2 に向かう途中の F4 を通過した後, F5 に向かう途中で目標位置が T3, T4 と変化している。T3, T4 と切り替えが素早く行われた結果, T3 に向かうという運動は省略され, T4 のみに到達が行われたと考えられる。

また, 実際には T と F の点は完全に一致しない箇所も多くあり, これはモーションデータ取得の際に, モーションキャプチャの座標系がモニタ画面の座標系と完全には一致しなかったことや, フィッティングの誤差が原因であると考えられる。

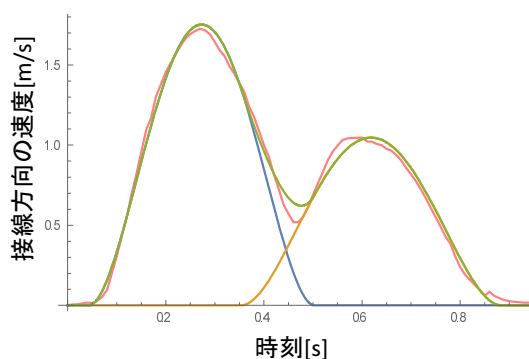
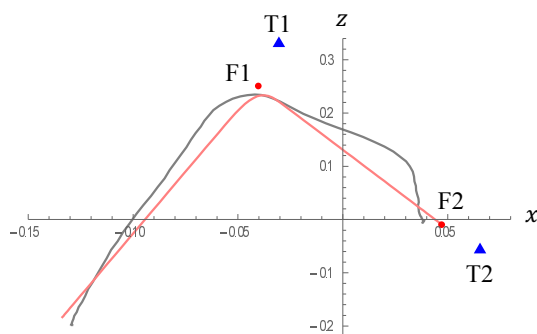


図 5: 運動 1 の速度波形・フィッティング結果



順	位置	時刻	順	位置	時刻
1	T1	0	3	F1	0.2785
2	T2	0.1372	4	F2	0.2829

図 6: 運動 1 の軌道・フィッティング結果 (xz 平面)

6. まとめ・展望

今回設定したタスクにおいて, 手先のモーションデータに本手法を適用することで, 到達運動が最後まで完了せず途中で目標位置が切り替わった場合にも到達目標位置を予測し, さらにモーションデータの軌道を再現することに成功した。予測した到達目標位置をそこに到達させたいとい

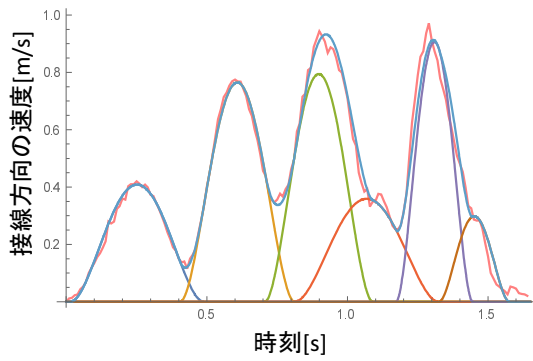


図 7: 運動 2 の速度波形・フィッティング結果

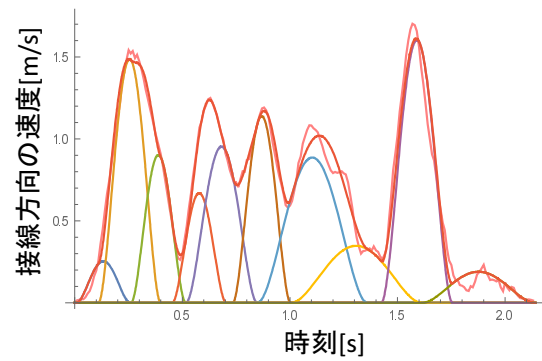
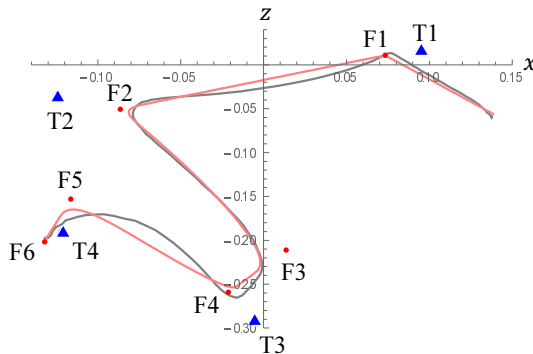
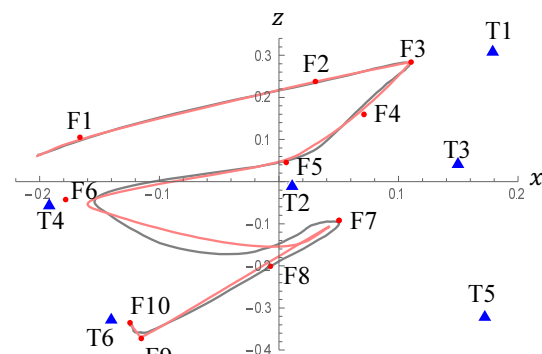


図 9: 運動 3 の速度波形・フィッティング結果



順	位置	時刻	位置	TF	時刻
1	T1	0	6	F3	1.0897
2	T2	0.4829	7	T4	1.2159
3	F1	0.4886	8	F5	1.4451
4	T3	0.783	9	F6	1.5758
5	F2	0.8114			

図 8: 運動 2 の軌道・フィッティング結果 (xz 平面)



順	位置	時刻	順	位置	時刻
1	T1	0	9	F5	0.7268
2	F1	0.1372	10	T5	0.7989
3	F2	0.2785	11	F6	0.8818
4	T2	0.2829	12	T6	1.2329
5	F3	0.3945	13	F7	1.238
6	F4	0.5824	14	F8	1.4918
7	T3	0.5999	15	F9	1.6341
8	T4	0.6159	16	F10	2.0184

図 10: 運動 3 の軌道・フィッティング結果 (xz 平面)

う意図と捉えると、予想到達目標位置の列という時間的に離散なデータを用いることで、分割された意図という単位でステートマシンや HMM 等を構築することが可能になると考える。今後は、上記のような方法でステートマシンや HMM 等を構築し、バーチャルヒューマンやキャラクタ等の動作生成や、作業中の人の意図を読み取るためのモデルとして応用していきたいと考えている。

また、本手法はバーチャルヒューマンやキャラクタ等の動作生成や作業中の人の意図の読み取りのみならず、モーションキャプチャデータの圧縮やモーションリターゲットング等にも応用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Yeo, Sang Hoon, et al. "Eyecatch: simulating visuo-motor coordination for object interception." ACM Transactions on Graphics (TOG) 31.4 (2012): 42.
- [2] Wada, Yasuhiro, and Mitsuo Kawato. "A theory for cursive handwriting based on the minimization principle." Biological Cybernetics 73.1 (1995): 3-13.
- [3] Flash, Tamar, and Neville Hogan. "The coordination of arm movements: an experimentally confirmed

mathematical model." The journal of Neuroscience 5.7 (1985): 1688-1703.

- [4] 川人光男, 脳の計算理論, 産業図書
- [5] 草野祐樹, 大村廉."Jerk 最小モデルを用いた人の指さし行動予測手法の検討" インタラクシオン 2012