

リアクティブバーチャルヒューマンのための ユーザ動作に基づく予測行動モデルの構築

石川 俊明

Development of Prediction and Action Model based on User's Movements for Reactive Virtual Human

Toshiaki ISHIKAWA

Abstract: In this paper, we describes design and implementation of a virtual human system that does interaction with human. In an interaction, the human-like reaction of virtual human to user's action is requested, because the other party's reaction is very important. We proposed the virtual human system that satisfies such a request, and constructed it. This proposal system is composed by thought model that predicts future movements from user's action and selects next action of self, body model based on dynamics, and motion controller. In this system, we could achieve virtual human that reacted to the user's movements.

1 はじめに

1.1 研究背景

バーチャルリアリティ技術の進歩に伴い、仮想世界における人型のCGキャラクタであるバーチャルヒューマンは、様々な分野での応用が期待されている。その1つとして、仮想世界内におけるユーザとの共同作業やインタラクションが挙げられる。このようなバーチャルヒューマンやユーザとのインタラクションに関する研究では、ビジュアル面や滑らかな動きによる現実感の高い視覚提示や、ジェスチャや文章・音声を利用した対話エージェントなど、視覚・聴覚的效果の提示に重みが置かれてきた。バーチャルヒューマンの更なる人間らしさの向上のために、今後は、豊かな感情や表情を持たせることや、インタラクションにおける反応動作の充実が求められている。

1.2 反応動作

本研究では、ユーザとバーチャルヒューマンとの身体的インタラクションにおける、反応動作に着目する。実世界での人間同士の身体的インタラクションでは、一方の行動は相手への直接的な接触も含め、常に相手の挙動に影響を与え、得られるフィードバックにより、力覚や触覚を始め、相手の存在感や躍動感を感じることができる。また、同じ立場において自身が想定しているような反応動作を相手が示すことにより、相手に対する興味や親近感が高まると考えられる。逆に、相手が無反応であったり、まったく予想しない反応ばかり

示していると、インタラクションが成立しない可能性がある。このように、身体的インタラクションでは、視覚・聴覚的效果のみのインタラクションでは得られない、様々な身的効果を得ることができる。したがって、インタラクションにおける相手の反応動作は非常に重要であり、相手の動作や周囲の状況に対して適応的でなければならない。本研究では、このような反応動作のことを”リアクティブ動作”と呼び、リアクティブ動作を行うバーチャルヒューマンを”リアクティブバーチャルヒューマン”と呼ぶ。

人間は外界に変化が生じた場合、どのように反応しているのだろうか。相手の動作や環境の変化など、ある刺激が与えられたとき、人間は認識・判断・行動という一連の過程を経て、刺激に対して反応している。ここで、認識・判断・行動とは次のような処理を想定している (Fig.1)。

認識 刺激がいかなるものであるか、もたらす結果を評価する。長期的な結果を評価するためには、状況を予測する必要がある。

判断 認識結果に応じて反応行動・動作を決定する。判断基準は目的によって変化する。

行動 決定した反応行動・動作を実行する。

したがって、ユーザとの身体的インタラクションにおける、バーチャルヒューマンのリアクティブ動作の実現には、自律的な行動を可能とする”認識・判断”の思考モデルと、”行動”を実時間で実行する動作生成法が必要である。

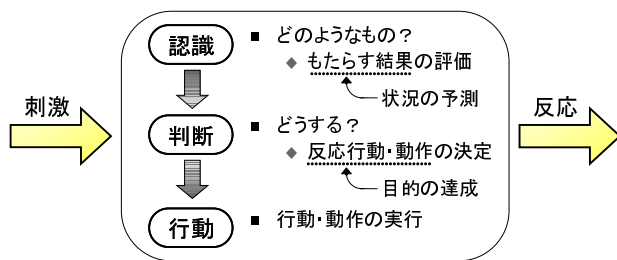


Fig. 1 刺激から反応への流れ

1.3 思考モデル

バーチャルヒューマンが自律的に行動するためには、行動計画が必要である。また、それは定められた目的を達成するような行動を選択することが求められる。そのためには、相手の行動が自身に与える影響や結果をあらかじめ認識しておく必要がある。

ユーザとインタラクションを行うバーチャルヒューマンの例として、対戦ゲームにおける敵キャラクタを考える。バーチャルヒューマンの行動計画を構築することは、敵キャラクタの思考ルーチンを構築することに相当する。対戦ゲームにおける敵キャラクタの代表的な思考ルーチンを以下に記す。

- ランダムに行動を選択。
- テクニックや定石のプログラム化。
- 行動パターンのデータ化。
- 行動結果を数値化して最善行動を選択。

ゲームのキャラクタは、これらの思考ルーチンを組み合わせることにより、行動計画を行っている。チェスや将棋などのテーブルゲームでは、数手先まで探索することによって、最善手を選択している。スポーツゲームやアクションゲームなどでは、キャラクタや物体の動きは物理法則に従ってはならず、限られたパターンの中から選択されるか、少ないパラメータによって作られている。したがって、ユーザの入力の影響が簡単にわかるため、敵キャラクタの行動選択には特別な予測を必要としていない。

身体的インタラクションにおいては状況が時々刻々変化するので、相手の運動と自身の運動から今後を予測しなければ、相手動作の自身に与える影響や結果を認識することはできない。また、影響や結果を評価する基準が必要である。そして、得られた運動予測結果に従って目標行動・動作を決定する思考モデルを構築する必要がある。

1.4 動作生成

多くのバーチャルヒューマンは、映画やビデオゲームなど必要となるモーションが決まっている場合、モーションキャプチャ装置やクリエイタの手によって、あらかじめモーションデータを用意しておき、それらの参照および合成により、現実味の高い動作を生成している。

インタラクションにおいては、適切な動作を実時間で生成する必要がある。基本的な短いモーションをデータベース化し、編集・接続することにより、目的の動作を実時間で生成する手法が提案された [1]。また、バーチャルヒューマンとバスケットボールを投げ合うことを通じて、力覚を介したインタラクションを可能とするシステムが提案された [2]。しかし、参照による動作生成では外力が加わるなど環境の変化に対し、力学的な影響を考慮した動作を生成することができないという問題がある。したがって、ユーザが力覚インタフェースを使ってバーチャルヒューマンに直接触ったとしても、その影響を反映させた動作を生成することができない。このような問題に対して、モーションデータを目標動作とし、物理シミュレータにて追従制御することにより、環境からの力学的影響に応じた動作生成の手法が提案されている [3]。しかし、モーションデータに依存した動作生成であるため、モーションデータに含まれていない任意の姿勢や動作の生成は依然として困難であり、豊富なモーションデータを確保するために労力と費用をかけてしまう。

身体的インタラクションにおいては、力学的影響を考慮した任意の動作が求められる。したがって、バーチャルヒューマンを物理法則に従ったモデルで定義し、発生させる力を制御することにより、任意の動作を生成する必要がある。

1.5 研究目的

本研究では、ユーザとの身体的インタラクションにおいて、ユーザの動作に対して適応的な反応動作を行う、リアクティブバーチャルヒューマンシステムの実現を目的とする。

バーチャルヒューマンを剛体のリンク系で定義し、物理シミュレータを用いて運動制御することにより、力学的影響を考慮した任意の動作を実時間で自動生成する。また、ユーザとバーチャルヒューマンの運動を物理シミュレータで予測することにより、ユーザ動作がバーチャルヒューマンに与える影響を踏まえて、次の行動を決定する思考モデル (予測行動モデル) を構築する。

本論文の構成を以下に示す。第 2 節では提案するシ

2 提案システム

2.1 概要

バーチャルヒューマンを自律的に行動させるための行動計画を行う思考モデルが必要である．そして，決定された目標動作を実現するための力やトルクを計算する，運動制御機構が必要である．提案システムでは，現在のユーザの動作から，その後の運動を予測することにより，ユーザ動作がバーチャルヒューマンに与える影響を踏まえた思考モデルを構築する．

Figure 1 is a conceptual diagram of the proposed system. It illustrates the interaction between a Virtual Human (VH) motion control system, a physics simulator, and a user interface. The central component is the "Dynamic Model Physics Simulator" (動力学モデル物理シミュレータ), which models the interaction between two humanoid figures. The VH motion control system (VHの運動制御) provides "Joint Torque" (関節トルク) to the simulator. The simulator outputs "Visual/Force Feedback" (視覚・力覚) to the user interface (インタフェース). The user interface also provides "User Position/Velocity" (ユーザの位置・速度) to the VH motion control system. The VH motion control system includes a "VH Target Action Decision" (VHの目標動作決定) block, which receives "VH Target Action Selection" (VHの目標行動選択) from a "VH Prediction Action Model" (VHの予測行動モデル). The VH Prediction Action Model includes "Contact Prediction" (接触予測) and "Model Motion Prediction" (モデルの運動予測). The VH Target Action Decision block outputs "VH Arrival Motion" (VHの到達運動) to the VH motion control system. The VH motion control system also includes a "Balance Control" (バランス制御) block. The user interface includes an "Avatar Motion Control" (アバターの運動制御) block, which receives "VH Target Action Selection" from the VH Prediction Action Model and outputs "Avatar Motion Control" to the Dynamic Model Physics Simulator.

Fig. 2 システムの構成

2.2 物理シミュレータ

物理エンジンでは、剛体同士の抗力や静止摩擦力などの拘束力を解析法で解かず、侵入量に応じてバネダンパモデルによる力(ペナルティ)を加えることにより、拘束が満たされるように制御する．関節エンジンでは、複数の関節の拘束力を一度に解かず、葉から根に向かって複数の剛体を1つの剛体とみなし、順に拘束力を解いていく．これらの手法によって計算量を抑え高速に処理することが可能であり、リアルタイム性を重視する力覚インタラクションに適した物理シミュレータである．

提案システムでは，物理シミュレータを用いてバーチャルヒューマンの動作生成および運動予測を行う．

2.3 動力学モデル

バーチャルヒューマンおよびアバターの動力学モデルを作成した．作成したモデルを Fig.3 に示す．

剛体数および関節自由度は全身でそれぞれ 17, 36 とし、剛体特性および関節特性は文献 [12][13][14] を基に設定した。なお、動力学モデルの詳細は付録に記す。

2.4 インタフェース

等身大スクリーンにプロジェクタにて映像を投影することにより、ユーザへの視覚提示を行う。また、SPIDAR[4]を用いてユーザ手部の位置計測および力覚提示を行う。SPIDAR ワイヤ駆動型力覚提示装置であり、グリップに4本のワイヤが設置され、ワイヤの長さからグリップ

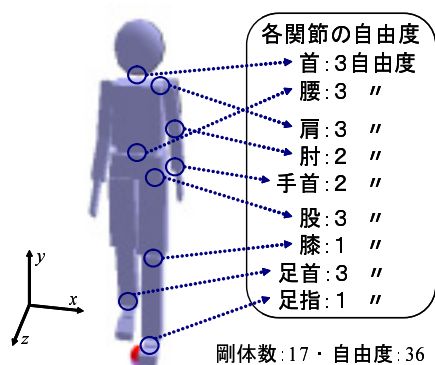


Fig. 3 動力学モデル

ブの3次元位置を計測し、ワイヤの張力を制御することによりグリップに並進力3自由度の力覚を提示する。ユーザは球状のグリップを装着するだけなので操作性に優れ、ワイヤにより視界がさえぎられることもない。提案システムでは、等身大スケールのSPIDARであるSPIDAR-H[5]を使用し、ユーザ手部の位置計測およびアバターの手部に生じる接触力を提示する (Fig.4)。

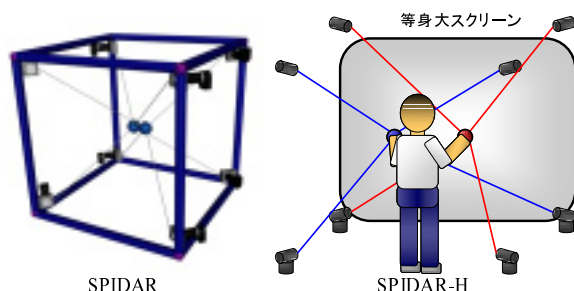


Fig. 4 インタフェース

ユーザの動作入力は、等身大環境にてリアルタイムモーションキャプチャ装置を用いて全身の姿勢を計測し、全身による直感的な入力をアバターにて忠実に再現することが望ましいが、大規模な設備を必要としてしまう。提案システムでは、インタラクションにおいて重要と思われる部位のみを計測し、アバターの対応する部位に反映させることにより動作の再現を行う。

2.5 予測行動モデル

人間は刺激に対する反応の過程 (認識・判断・行動) において、あらかじめ結果を予測することにより、スムーズな行動や動作を実現している。提案システムでは、このような人間の行動決定過程を模倣し、ユーザの動作からその後の運動を予測することにより、ユーザの動作がバーチャルヒューマンに与える影響を読み

取り、その結果に応じて次の行動を決定する思考モデルを提案する。

インタラクションにおいて必要となる動作の多くは、身体の一部をある場所へ移動させる到達運動を組み合わせることにより生成できると考えられる。予測行動モデルでは、バーチャルヒューマンおよびアバターの運動を入力とし、複数の到達運動指令により構成されるバーチャルヒューマンの目標動作を出力する。提案手法を以下に示す。

- アバターおよびバーチャルヒューマンの運動を解析し、両モデルの今後の運動を物理シミュレータを用いて予測する。
- 運動予測における、アバターとバーチャルヒューマンとの接触を評価基準とし、ユーザの動作が与える結果を評価する。
- 運動予測結果に基づいて、バーチャルヒューマンの目標行動を選択し、目標動作となる到達運動を決定する。

2.6 運動制御機構

運動制御機構では、動力学モデルの関節トルクを制御することにより、バランス保持および指定された到達運動を実現する。

3 実装

実世界での人間同士のインタラクションでも、置かれているシチュエーションが異なれば、行動パターンも異なってくる。本研究では、ユーザとバーチャルヒューマンとのインタラクションとして、ボクシングにおける上半身の運動を例にとり、提案システムの実装を行う。

バーチャルヒューマンの行動は、ジャブやストレートなどの手による攻撃動作と、ユーザからの攻撃の回避動作および防御動作に限定する。そして、体 (頭、胸部) と両腕 (手、前腕) の計3ヶ所に、到達運動指令を与えることにより、これらの動作生成を行う。

また、ボクシングでは相手の手の動きが重要であり、他の部分の動きが行動決定におよぼす影響は少ないと考えられる。したがって、ユーザからの位置入力は力覚提示に使用する SPIDAR-H で計測される手部の位置のみとし、他の部分の位置計測は行わない。

以下に、各実装部分の詳細を述べる。

3.1 アバターの運動制御

計測したユーザの一部の位置情報を入力とし、アバターの手部の位置が入力値と一致するように、すべての剛体の位置・姿勢を決定する必要がある。

このように少ない既知の点から全身の姿勢を決定する問題の代表的な解法として、逆運動学法が挙げられる。人体のように冗長性の高い構造では姿勢は一意には決まらないため、擬似逆行列を用いた手法 [8]、特異点低感度運動分解による特異点の影響を少なくした手法 [9]、あらかじめ取得したデータより求めた回帰式を用いた手法 [11] などが提案されている。しかし、逆運動学法では関節の可動域や力学的な整合性が満たされる保障はない。拘束条件を追加することにより、関節可動域や力学的整合性を満たす手法 [10] が提案されているが、床反力のみしか考慮されていないため、他の物体との接触による外力が頻繁に生じる環境に応用するのは難しい。

提案システムでは、力学的影響を重視するため、動力学法と PD 制御によるモデル全身の姿勢制御法を用いる。すなわち、入力値など目標となる位置・姿勢が与えられている剛体に対し、PD 制御により目標値に向かうような外力を加え、すべての剛体・関節に対し重力や外力・関節の拘束力を加えることにより、モデル全体の位置と姿勢を決定する。PD 制御による位置と姿勢の制御の様子を Fig.5 に示す。

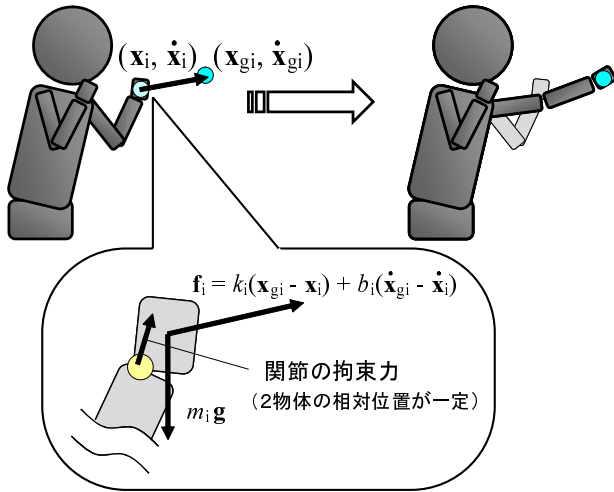


Fig. 5 位置・姿勢の制御

目標の位置と速度を $(x_{gi}, x_{gi}\dot{ })$ 、制御対象の剛体の位置と速度を $(x_i, x_i\dot{ })$ とすると、位置制御に必要な外力 f_i は

$$f_i = k_i(x_{gi} - x_i) + b_i(x_{gi}\dot{ } - x_i\dot{ })$$

となる。ただし、 k_i, b_i はそれぞれバネ・ダンパ係数で

ある。

提案システムでは、ユーザ手部の位置をアバター手部の目標位置として PD 制御することにより、アバター手部の位置制御と他の剛体の姿勢制御を行う。また、全身の姿勢を安定化させるために、アバター腰部の位置と姿勢に対し、固定された目標値による PD 制御を同時に行う。ここで、バネ・ダンパ係数を小さく設定することで、腰部に自由度を与えることができる。

3.2 予測行動モデル

予測行動モデルでは、バーチャルヒューマンおよびアバター両モデルがこのまま運動を継続した場合、どのような結果になるかを予測し、得られた結果に応じて次の運動を決定する。提案システムでは、物理シミュレータを用いて両モデルの運動を予測し、予測運動におけるモデル同士の接触を運動予測の結果とする。

予測行動モデルは、両モデルの運動予測・モデル同士の接触判定・接触予測に応じた行動選択・目標到達運動決定の 4 つの処理により構成される。処理の流れを Fig.6 に示す。

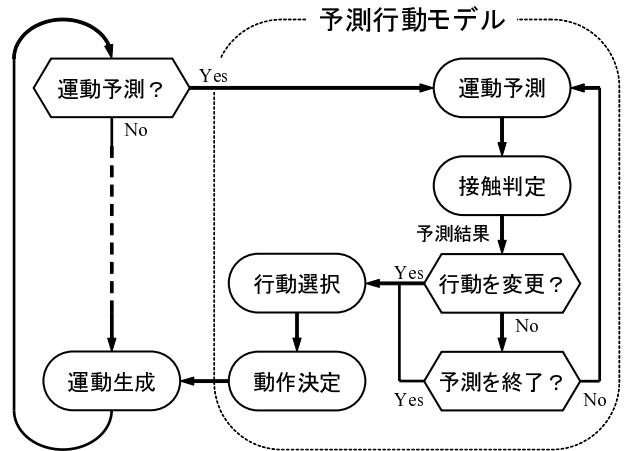


Fig. 6 予測行動モデル

3.3 モデルの運動予測

提案システムでは、両モデルの運動予測を物理シミュレータを用いて行う。

実時間で進行中の物理シミュレータを $Sim \alpha$ とし、それとは別に予測専用のシミュレータ ($Sim \beta$) を用意する。運動予測開始時に、バーチャルヒューマンおよびユーザ両モデルの物理状態を、 $Sim \alpha$ から $Sim \beta$ に渡し、 $Sim \beta$ を更新させることにより、両モデルの今後の運動を予測する。

Sim α の積分ステップ間隔を Δt_0 , Sim β の積分ステップ間隔を Δt_1 とし, Sim α を 1 回更新する間に Sim β を更新する回数を C とする. このことから, 先読み予測時間は $C\Delta t_1 - \Delta t_0$ となる. 先読み時間を長く得るために, この作業を最大 S 回繰り返す. 以上のことから, 実時間で $S\Delta t_0$ 予測に費やすと, 予測完了時から $S(C\Delta t_1 - \Delta t_0)$ までの運動予測が可能となる. シミュレータを用いた運動予測の様子を Fig.7 に示す.

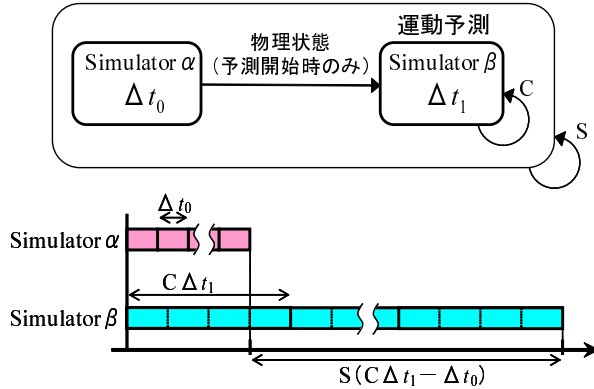


Fig. 7 物理シミュレータによる運動予測時間

なお, 効率的に予測を行うために, ユーザの手部の動きに注目し, ユーザがバーチャルヒューマンに攻撃をしていると判断したときより予測を開始する. 判断基準を次の通りに定める.

- ユーザの手部の速度が一定以上である.
- ユーザの手部の進行方向にバーチャルヒューマンが存在する.

予測中も進行中の運動を継続し続けるためには, モデルに加わるべき力を補完しなければならない. しかし, 人間の運動は複雑であるため, 正確に推定することは不可能である. ここで, 以下の仮定をする.

- バーチャルヒューマンは進行中の到達運動を継続する.
- ユーザの手部の軌道は過去の手部の運動から推測できる.

このことから, 今後のユーザ手部の軌道を過去の位置から重み付き最小二乗法より多項式近似し, 予測更新中は, 得られた軌道の各時刻における位置と速度を目標として PD 制御する. また, 制御対象はユーザの両手ではなく, 前記の接触の可能性があると判断した手のみ制御を行う.

3.4 両モデルの接触判定

両モデルの接触ペアを Fig.8 のように分類し, 予測更新する度に両モデルの接触判定を行う. 接触が生じ

接触のペア	接触パターン	重要度
(頭, 手) (胸, 手)	① ユーザの攻撃がヒット	高 中 中 低 低
(手, 頭) (手, 体)	② VHの攻撃がヒット	
(手, 手) (前腕, 手)	③ ユーザの攻撃をガード	
(手, 前腕)	④ VHの攻撃をガード	
その他のペア	⑤ その他の接触	

接触のペア: (VHの剛体, ユーザの剛体)

Fig. 8 接触ペアの分類

た場合は, どのような接触であるか以下の情報を時系列に記録する.

- 接触した剛体:
バーチャルヒューマンおよびユーザ
- 接触した位置:
絶対座標・それぞれの剛体のローカル座標
- 接触した時刻:
実時間での時刻と接触予測時刻
- 接触の重要度

そして, 生じた接触パターンの重要度に応じて, バーチャルヒューマンの行動を変更するかどうかを決定する.

重要度: 高の接触 予測を終了し, 行動を変更する.

重要度: 中の接触 その後に重要度の高い接触が生じないか, しばらく予測を継続する. 一定時間内に, より重要度の高い接触が生じなければ予測を終了する.

重要度: 低の接触 より重要度の高い接触に備え, 予測を継続する.

予測終了時までには複数の接触が生じた場合は, 最も重要度が高く, 先に生じた接触を, バーチャルヒューマンの行動決定接触とする.

3.5 目標行動選択

バーチャルヒューマンの目標行動を, 体・両腕の3ヶ所にそれぞれ与える. 体は待機および回避, 両腕は待機および攻撃・防御の状態を持ち, 行動決定接触を入力として状態遷移する. それぞれの状態遷移図を Fig.9 に示す. 腕部の行動選択では, 両腕とも攻撃行動に遷移することはないとする.

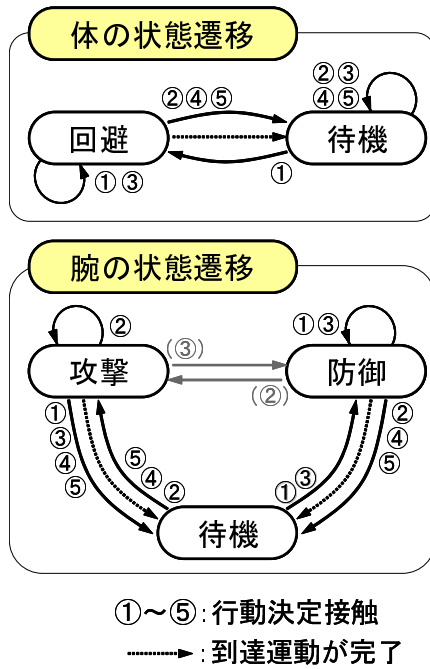


Fig. 9 体・両腕の状態遷移図

例えば、現在のバーチャルヒューマンの目標行動が（体：待機，右腕：攻撃，左腕：待機）であるとする。このとき、運動予測によって得られた行動決定接触が，“バーチャルヒューマンの頭部と，アバターの左手部の接触”であるならば，それぞれの目標行動は（回避，待機，防御）へと遷移する。

3.6 目標動作決定

目標動作は，対象の剛体・目標位置・目標時間で定義される到達運動にて実現する。目標行動ごとに対象剛体および目標位置を Table 1 のように定める。また，予測を終了した時点での実時間で時刻を t_0 とし，行動決定接触の情報から各目標行動の到達運動を決定する。

Table 1 目標行動に対する目標動作

目標行動	対象剛体	目標位置
回避	頭・胸部	ユーザの手に接触しない位置
防御	前腕・手部	ユーザの手の位置
攻撃	手部	ユーザの頭・胸部の位置

回避動作

ユーザの攻撃を回避するには，ユーザの手が描く軌道から，バーチャルヒューマンの体が十分離れた位置に移動すればよい。行動決定接触において，接触する

ユーザの手およびバーチャルヒューマン体の時刻 t_0 での位置を a, b とし，両者の接触予測位置を p ，接触予測時刻を t_1 とする。また，

$$p' = p + s(p - a), \quad s > 0$$

で表される点を P' とし，線分 AP' と点 B の最近傍点を Q とする。ただし，

$$q = \begin{cases} p' & \left(\frac{(b-a) \cdot (p'-a)}{\|p'-a\|^2} > 1 \right) \\ a + \frac{(b-a) \cdot (p'-a)}{\|p'-a\|^2} (p'-a) & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

である。そこで，

$$r = b + u(b - q), \quad u > 0$$

で表される点を R とし，点 R を回避動作の目標位置とする。回避目標位置を Fig.10 に示す。到達運動の目標時間は $t_1 - t_0$ とする。

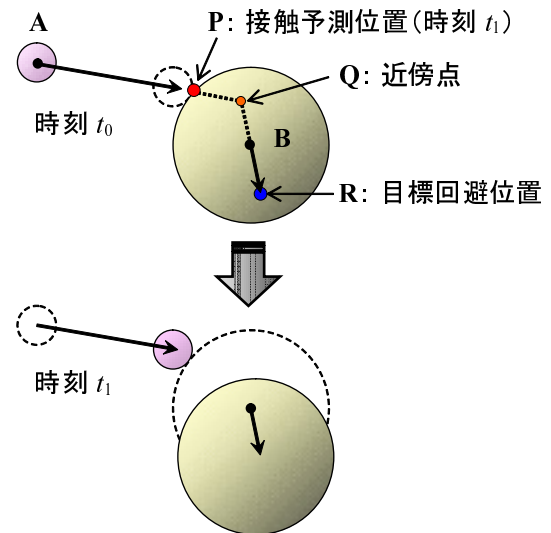


Fig. 10 回避動作

防御動作

ユーザの攻撃を防御するには，ユーザの手部が描く軌道の途中位置に，バーチャルヒューマンの前腕を割り込ませればよい。回避動作と同様に，バーチャルヒューマンの体と接触するユーザの手の時刻 t_0 での位置を a とし，接触予測位置を p ，接触予測時刻を t_1 とする。また，バーチャルヒューマンの前腕の時刻 t_0 での位置を b とする。そして，

$$p' = a + s(p - a), \quad 0 < s < 1$$

で表される点を P' ，線分 AP' と点 B の最近傍点 Q を防御動作の目標位置とする。防御目標位置を Fig.11 に

示す．到達運動の目標時間 t'_1 は

$$t'_1 = u(t_1 - t_0), 0 < u < s$$

とする．

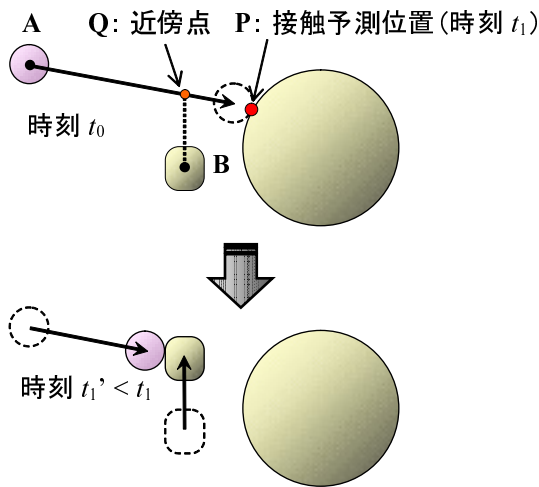


Fig. 11 防御動作

攻撃動作

攻撃対象はユーザの頭・胸部から，バーチャルヒューマンの手との距離が短い方が選択される．偏りを減らすために乱数によって対象を変更する．目標位置・目標時間も乱数によりバラつきを持たせる．

3.7 運動制御機構

動力学モデルの関節トルクによる運動制御は計算量が多いため，現段階では実時間で処理することは難しい．そこで，提案システムでは，少ない計算量でバランス制御と到達運動を実現するため，アバターの運動制御に用いた PD 制御による手法を使って，簡易的な運動制御機構を構築した．

アバターと同様に，バーチャルヒューマンの腰部に対し，固定値を目標とした PD 制御による位置・姿勢制御を行うことにより，バランス制御を実現する．また，目標動作が指定された剛体に対し，躍度最小モデルによる到達運動の軌道を目標とした PD 制御による位置制御を行うことにより，指定された到達運動制御を実現する．

4 評価

本節では，実装したリアクティブバーチャルヒューマンシステムの評価を行う．動作実験には，Pentium4

3.2[GHz] プロセッサ搭載の PC を使用した．

なお，構築したシステムでは，バーチャルヒューマンおよびアバター両モデルとも，腰部を PD 制御による位置・姿勢制御しており，脚部に対して運動指令を与えることもないため，上半身のみモデルを使用した．

4.1 処理時間

バーチャルヒューマンおよびユーザアバターの上半身モデル 2 体での，物理シミュレータ 1 回の更新に掛かる時間は平均 1.34[msec] であった．また，運動予測用のシミュレータを更新する回数を 2 回とした場合，運動予測中の 1 ステップあたりの時間は平均 4.60[msec]，システム全体の 1 ステップあたりの時間は平均 1.55[msec] であった．このことから，本実装システムは十分に実時間での処理が可能であった．

4.2 動作実験

実装したシステムの動作実験を行った．インタラクションの様子を Fig.12 に示す．

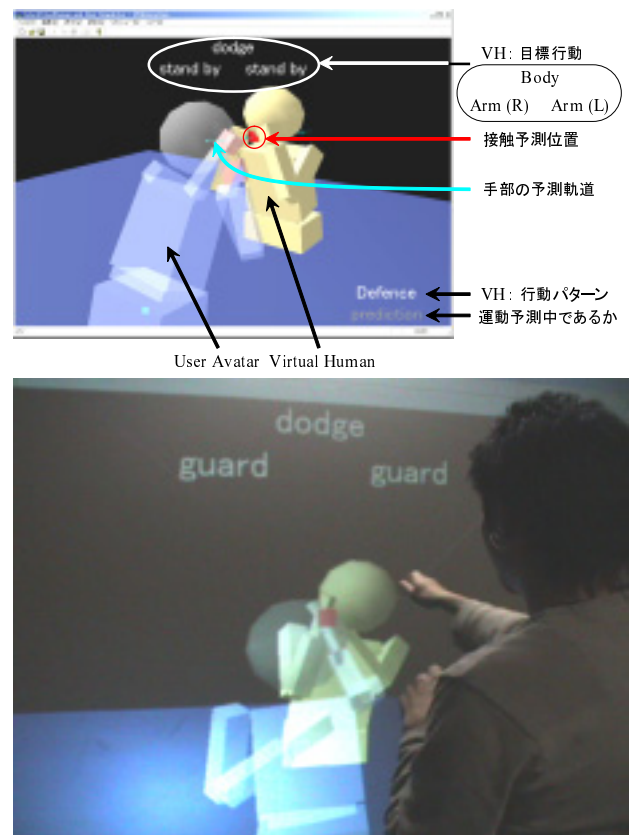


Fig. 12 インタラクションの様子

ユーザの攻撃動作に対して，反応動作をしない場合とする場合の動作例を，Fig.13-15 に示す．

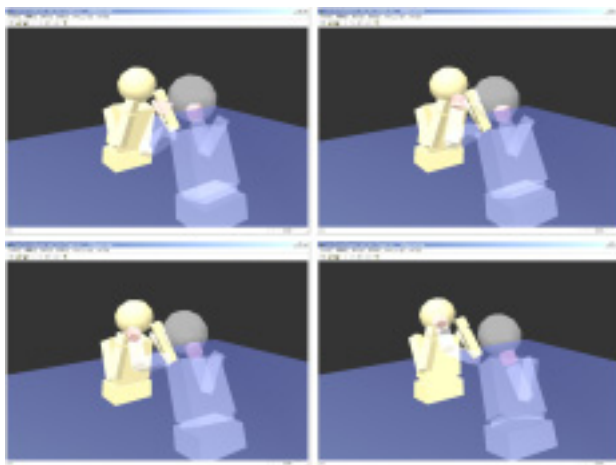


Fig. 13 反応動作をしない場合

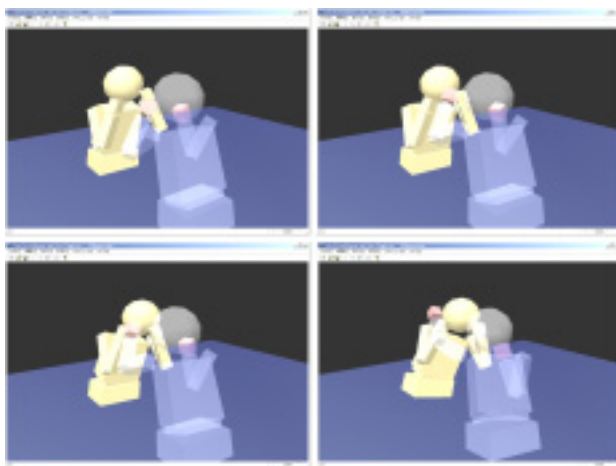


Fig. 14 回避動作をする場合

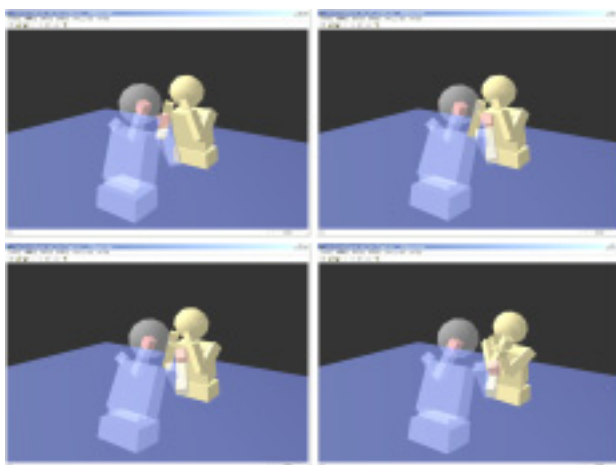


Fig. 15 防御動作をする場合

4.3 反応動作の検証

実世界では、ある人の反応動作を見ただけで、どのような状況が生じたか推測できることが多い。したがって、反応動作からその動作を生じさせた要因を推測できることは、人間らしい反応動作であるかどうかの1つの指標となる。

この指標をもとに、バーチャルヒューマンの反応動作が、人間らしい反応動作であるか検証を行った。検証方法を以下に示す (Fig.16)。

- アバターのバーチャルヒューマンへの攻撃において、攻撃対象をバーチャルヒューマンの頭部左領域・右領域・胸部左領域・右領域の上下左右4ヶ所とし、攻撃対象と攻撃を行う腕の合計8通りの中から無作為に選択する。
- 攻撃に対して、予測行動による反応動作を行う場合と行わない場合のバーチャルヒューマンの挙動をそれぞれ16パターン映像に記録する。ここではアバターの描画は行わない。
- 被験者に、バーチャルヒューマンの挙動のみの映像を見せ、アバターはバーチャルヒューマンへどのような攻撃を行ったか、攻撃対象の領域を識別してもらう。

攻撃対象の識別結果を Fig.17,18 に示す。

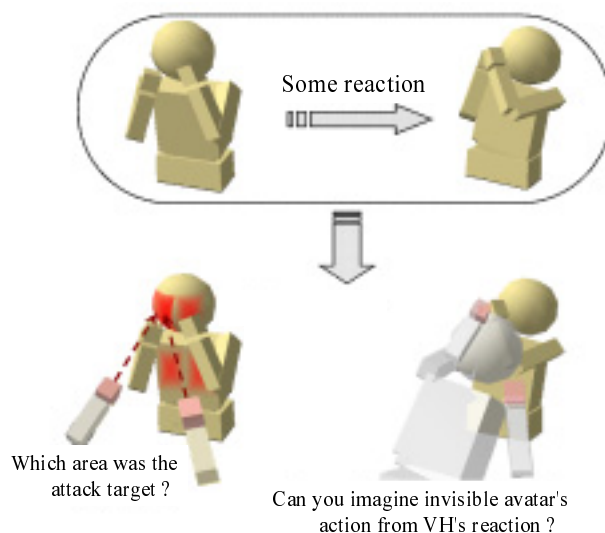


Fig. 16 検証方法

反応動作を行う場合はどの領域においても識別正答率は高く、反応動作を行わない場合と比べ大きな差が見られた。このことから、構築したバーチャルヒューマンの反応動作から、どの領域を狙った攻撃であるか推測可能であることが分かった。

識別精度		被 験 者 の 解 答			
		左頭	右頭	左胸	右胸
正 答	左頭	0.833	0.083	0.083	0
	右頭	0.208	0.708	0	0.083
	左胸	0.083	0	0.792	0.125
	右胸	0	0	0.125	0.875

識別正答率： **0.802**

Fig. 17 反応動作を行う場合の正答率

識別精度		被 験 者 の 解 答			
		左頭	右頭	左胸	右胸
正 答	左頭	0.625	0.125	0.25	0
	右頭	0.417	0.417	0.083	0.083
	左胸	0.25	0.417	0.167	0.167
	右胸	0.125	0.625	0.125	0.125

識別正答率： **0.333**

Fig. 18 反応動作を行わない場合の正答率

今回の検証法では、どの程度の正答率であれば、人間らしい反応動作であると判断できるか、明確な基準は定まっていない。今後、実際の人間の反応動作について同様の検証法を試した場合、どの程度の正答率であるか検討したい。

5 おわりに

5.1 結論

本研究では、ユーザとバーチャルヒューマンとのインタラクションにおいて、ユーザの動作から今後の運動を予測することにより、自律的に反応動作を生成するバーチャルヒューマンシステムを提案し、ボクシングにおける攻撃動作と防御動作を例にとって実装を行った。

評価実験から、実時間での処理が可能であり、ユーザとのインタラクションも十分行える、という結果が得られた。

5.2 今後の課題

実装したシステムでは、実時間処理が可能なバーチャルヒューマンの運動制御機構が構築できていないため、モデルの上半身のみを外力により運動制御を行った。今後は、モデルの関節トルクによる自律的な運動制御機構を組み込んで、提案システム全体を実装する必要がある。

また、ユーザの手部2点の位置情報のみしか計測していないので、アバターを思い通りに操作できないと

いう問題があった。頭や肘など計測箇所を増やすなど、ユーザが操作しやすいインタフェースを構築する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、常に暖かく御指導下さりました佐藤誠教授に心より感謝致します。有益なご教示、ご助言をいただきました小池康晴助教授、張曉林助教授に心より御礼申し上げます。数々の有益な助言を賜わり、本研究を導いて下さりました長谷川晶一助手に心より感謝致します。数多くの貴重なご指摘を下さりました橋本直己助手に深く感謝致します。そして、日頃からご協力していただいた佐藤・小池・張研究室の学生、事務員の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] 川地克明, 鈴木宏正: "モーションデータベースによる実時間モーション合成手法" 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 第7巻, 4号, pp.453-458., 2002年, 12月
- [2] 鄭承珠, 橋本直己, 長谷川晶一, 佐藤誠: "力覚によるインタラクションを可能にするバーチャルヒューマンの実現", 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.1, pp.101-106 (2003).
- [3] 尾下真樹, 牧之内顕文: "環境からの力学的な影響に応じたキャラクタアニメーションの生成", 情報処理学会全国大会, 山口大学, 2001年9月.
- [4] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-2, o.7, pp.887-894 1991.
- [5] L Buogiuila, Y. Cai, M. Sato: "New For Human-Scale Virtual Environment: Scaleable-SPIDAR", the 7th proc.of ICAT, pp.93-98 (1997).
- [6] 藤井伸旭, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠: "ペナルティー法を用いた剛体運動シミュレータの開発", 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集.
- [7] 長谷川晶一, 田崎勇一, 佐藤誠: "ハプティックインタラクションのための物理ベースモデリング", 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集.

- [8] Badler N.I., Hollick M.J., Granieri J.P.: "Real-time control of a virtual human using minimal sensors", *Presence*, Vol.2, No1, pp.82–86, MIT (1993).
- [9] 山根克, 中村仁彦: "ヒューマンフィギアの全身動作生成のための協応構造化インタフェース", 第19回日本ロボット学会学術講演論文集, p. 3A33, 2001.
- [10] 丹下学, 山根克, 中村仁彦: "逆動力学計算を用いた力学的整合性を満たすヒューマノイド動作の振付け", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02.
- [11] 川崎雷太, 北村喜文, 北野文郎: "3点の6自由度トラッカによる両手把持道具を利用する人体アニメーション生成", 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.8, pp.2078–2086, 2004.
- [12] Williams, Marian. Lissner, Herbert R.: "Biomechanics of human motion", Philadelphia, Saunders, 1962.
- [13] 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: "人体寸法データベース".
- [14] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構 生活・福祉技術センター: "人間特性データベース".
- [15] T. Flash and N. Hogan: "The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model," *J. of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1688–1703, 1985

付録

A 動力学モデルの詳細

作成した動力学モデルの詳細を以下に示す．

A.1 剛体特性

リンク長 文献 [13] の青年男子 (19-27 歳) リンク長の平均値から，各リンクを楕円体とみなした場合の，各軸長の身長に対する比を求めた．各リンクの座標系は，直立姿勢における，左方向を x 軸，鉛直方向を y 軸，正面方向を z 軸とした右手座標系とする．なお，文献よりリンク長が求まらない場合は，周囲長より楕円近似して軸長を割り出した．また，同文献より関節位置を求め，木構造としてモデルを設計した．

質量比 文献 [12] の各分節の体重に対する比率を用いた．なお，文献に掲載されていない分節については，体積比より質量比を割り出した．

慣性モーメント 各リンクの質量は一樣に分布するとし，リンクを楕円体近似して各軸周りの慣性モーメントを求めた．楕円体における軸周りの慣性モーメントは次式より求まる．

$$I_x = \frac{M}{20} (l_y^2 + l_z^2)$$

ただし， M はリンクの質量， (l_x, l_y, l_z) は楕円体の軸長である．

Table 2 に剛体特性を示す．

Table 2 剛体特性

剛体名	リンク長比 (軸長 × 2)	質量比
頭部	(0.0949, 0.140, 0.111)	6.9
胸部	(0.184, 0.202, 0.124)	31.1
腰部	(0.190, 0.0768, 0.137)	15.0
上腕	(0.0487, 0.181, 0.0487)	2.7
前腕	(0.046, 0.141, 0.046)	1.6
手部	(0.0169, 0.106, 0.0479)	0.6
大腿	(0.0961, 0.233, 0.0961)	9.7
下腿	(0.0664, 0.233, 0.0664)	4.5
足部	(0.0379, 0.0408, 0.0942)	0.85
爪先	(0.0582, 0.0288, 0.0542)	0.55

A.2 関節特性

関節可動範囲 文献 [14] の成人男性 (20-60 歳) の関節自動可動域データから，各関節の可動範囲を求めた．なお，使用したデータは高齢者が多く含まれるため，平均値ではなく下位から 95%tile の値を使用した．

Table 3-5 に関節特性を示す．単位は度 [°]．また，表中の*印は他の文献を参考にした関節可動範囲である．

Table 3 関節特性 (胴体部)

関節名	自由度	軸方向 (+ / -)	可動範囲
腰関節 (体幹)	3	前屈/後屈	[-51, 102]
		左側屈/右側屈	[-35, 35]*
		左回旋/右回旋	[-49, 49]
首関節 (頸部)	3	前屈/後屈	[-101, 70]
		左側屈/右側屈	[-58, 58]
		左回旋/右回旋	[-80, 80]

Table 4 関節特性 (腕部)

関節名	自由度	軸方向 (+ / -)	可動範囲
肩関節	3	屈曲/伸展	[-66, 186]
		水平内転/水平外転	[-60, 164]
		内旋/外旋	[-90, 90]*
肘関節	2	屈曲/伸展	[-26, 154]
		回内/回外	[-90, 90]*
手関節	2	屈曲/伸展	[-96, 100]
		橈屈/尺屈	[-64, 48]

Table 5 関節特性 (脚部)

関節名	自由度	軸方向 (+ / -)	可動範囲
股関節	3	屈曲/伸展	[-36, 128]
		外転/内転	[-33, 69]
		内旋/外旋	[-45, 45]*
膝関節	1	屈曲/伸展	[-8, 164]
足関節	3	底屈/背屈	[-39, 73]
		内返/外返	[-20, 20]*
		内転/外転	[-20, 20]*
足指関節	1	屈曲/伸展	[-30, 45]*

B 予測軌道の近似多項式

運動予測時の軌道に重み付き最小二乗法による近似多項式を用いた．重み付き最小二乗法による近似多項式は以下のように求まる．

N 点のサンプルを $(x_i, y_i), i=0, \dots, N-1$ とする． $n(< N)$ 次の近似多項式を $y(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k$ とすると，

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} w_i (y_i - \sum_{k=0}^n a_k x_i^k)^2 \rightarrow \min$$

となる係数 a_k を求める． $\partial S / \partial a_k = 0$ を満たすので， a_k に関する次の連立方程式 $\mathbf{X}\mathbf{a} = \mathbf{y}$ が導かれる．

$$\begin{bmatrix} X[n, n] & \cdots & X[n, 0] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X[0, n] & \cdots & X[0, 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ \vdots \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y[n] \\ \vdots \\ Y[0] \end{bmatrix}$$

ただし，

$$X[p, q] = \sum_{k=0}^{N-1} w_k x_k^p x_k^q, \quad Y[p] = \sum_{k=0}^{N-1} w_k x_k^p y_k$$

である．よって， $\mathbf{a} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{y}$ より，近似多項式の係数 a_k が求まる．

ここで， (x_0, y_0) を現在の位置， (x_i, y_i) を i ステップ前の位置とし， $w_i = 1 - i/N$ と重み付けすることにより，最近の運動を重視した軌道を得ることができる．この軌道を運動予測時の軌道に用いた．

C 到達運動の軌道

到達運動の軌道として躍度最小モデル [15] による直線軌道を用いた．躍度最小モデルは次の評価関数を最小にするような軌道である．

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \|\ddot{\mathbf{x}}\|^2 dt$$

運動開始時刻 $t = t_0$ の位置を \mathbf{x}_0 速度・加速度を 0 とし，終了時刻 $t = t_f$ の位置を \mathbf{x}_f 速度・加速度を 0 とすると，軌道は次の 4 次式で表される．

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_0 + (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3)$$

$$\tau = t/(t_f - t_0), \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

運動中の速度は時刻 $(t_f - t_0)/2$ でピークとなるベル型である．