コンピュータアニメーション特論

第14回　キャラクタアニメーション（7）

九州工業大学 情報工学研究院　尾下真樹

今回の内容

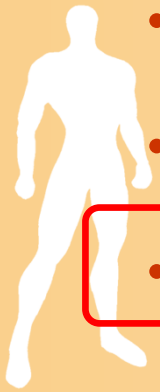
- 動作生成・制御
  - 動作状態機械
  - 動力学を考慮した動作生成
  - 歩行動作生成
- 深層学習による動作生成
- 自律動作制御
  - 身体制御
  - 動作制御
  - 行動制御

キャラクタ・アニメーション

- ＣＧにより表現された人体モデル（キャラクタ）のアニメーションを実現するための技術
- キャラクタ・アニメーションの用途
  - オフライン・アニメーション（映画など）
  - オンライン・アニメーション（ゲームなど）
    - どちらの用途でも使われる基本的な技術は同じ（データ量や詳細度が異なる）
    - 後者の用途では、インタラクティブな動作を実現するための工夫が必要になる
- 人体モデル・動作データの処理技術

全体の内容

- 人体モデル（骨格・姿勢・動作）の表現
- 人体モデル・動作データの作成方法
- サンプルプログラム
- 順運動学、人体形状変形モデル
- 姿勢補間、キーフレーム動作再生、動作補間
- 動作接続・遷移、動作変形
- 逆運動学、モーションキャプチャ
- 動作生成・制御



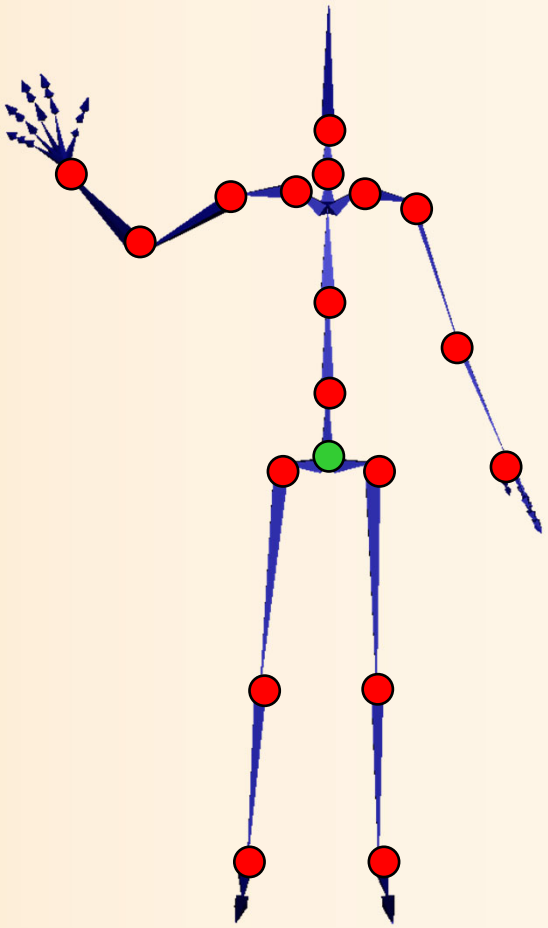
今回の内容

- 動作生成・制御
  - 動作状態機械
  - 動力学を考慮した動作生成
  - 歩行動作生成
- 深層学習による動作生成
- 自律動作制御
  - 身体制御
  - 動作制御
  - 行動制御

前回までの復習

骨格・姿勢・動作の表現

- 人体の骨格の表現
  - 多関節体モデルによる表現
  - 複数の体節と関節
    - 関節は２つの体節の間を接続
- 姿勢の表現
  - 全関節の回転 ＋ 腰の位置・向き
- 動作の表現
  - 姿勢の時間変化
    - 一定間隔 or キーフレーム動作データ



基礎技術

- 人体モデル（骨格・姿勢・動作）の表現
- 順運動学
- 姿勢補間
- 動作補間
- 動作接続・遷移
- 動作変形
- 逆運動学

動作生成・制御

動作生成・制御

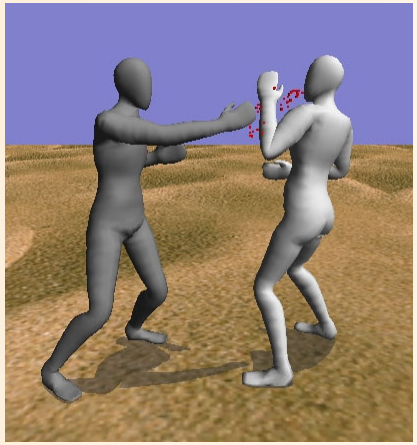
- 人間が作成した動作データをそのまま再生したり、変形・編集して別の動作を作成したりするのではなく、何らかのモデルにもとづいて、動作を動的に生成・制御する技術
  - 動作制御＝状況に応じた動作を動的に生成
  - 現在の技術では、人間同様の動作を生成することは難しい
    - 人間の動作制御の仕組みが、完全には分かっていないため
    - 人型ロボットの動作制御が難しい問題と同様の理由

動作制御の用途

- オフライン・アニメーション（映画など）
  - 動作生成は難しいため、モーションキャプチャやキーフレームアニメーションなどの、人間が動作データを作成する方法が用いられる
  - 一部の動作は、動作生成・制御手法により生成
- オンライン・アニメーション（ゲームなど）
  - 状況に応じた動作を行うことが求められるため、動作生成・制御手法が重要
  - 実際には、あらかじめ作成された動作データを利用して、動作生成・制御を実現

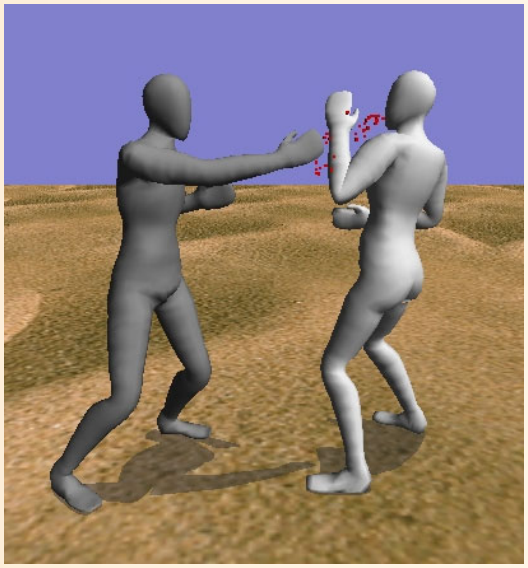
オンライン・アニメーション

- コンピュータゲームが代表例
  - 映画などの動画製作とは異なり、動作データを動的に生成する必要がある
- 動作の動的な生成方法
  - 剛体の動作生成（車・飛行機など）
    - キー入力や単純な制御モデルによる動作
    - 物理法則を考慮する場合もある
  - キャラクター（多関節体）の動作生成
    - 動作状態機械（次に説明）による連続動作再生
      - 必要な動作データをあらかじめ作成して用意
      - 入力などに応じて適切な動作データを順番に再生
    - 物理法則は考慮されていない（不自然な動作になることがある）



オンライン・アニメーションの問題点

- 現在の主なアプローチ
  - 必要な動作データをあらかじめ全て作成しておき、ユーザの操作に応じて動作データを再生
- 問題点
  - 決められた動作の繰り返ししかできない
  - 特に衝突や外力などの力学的な影響に応じた自然な動作が困難
- 状況に応じて動的に動作を生成する技術が必要



今回の内容

- 動作生成・制御
  - 動作状態機械
  - 動力学を考慮した動作生成
  - 歩行動作生成
- 深層学習による動作生成
- 自律動作制御
  - 身体制御
  - 動作制御
  - 行動制御

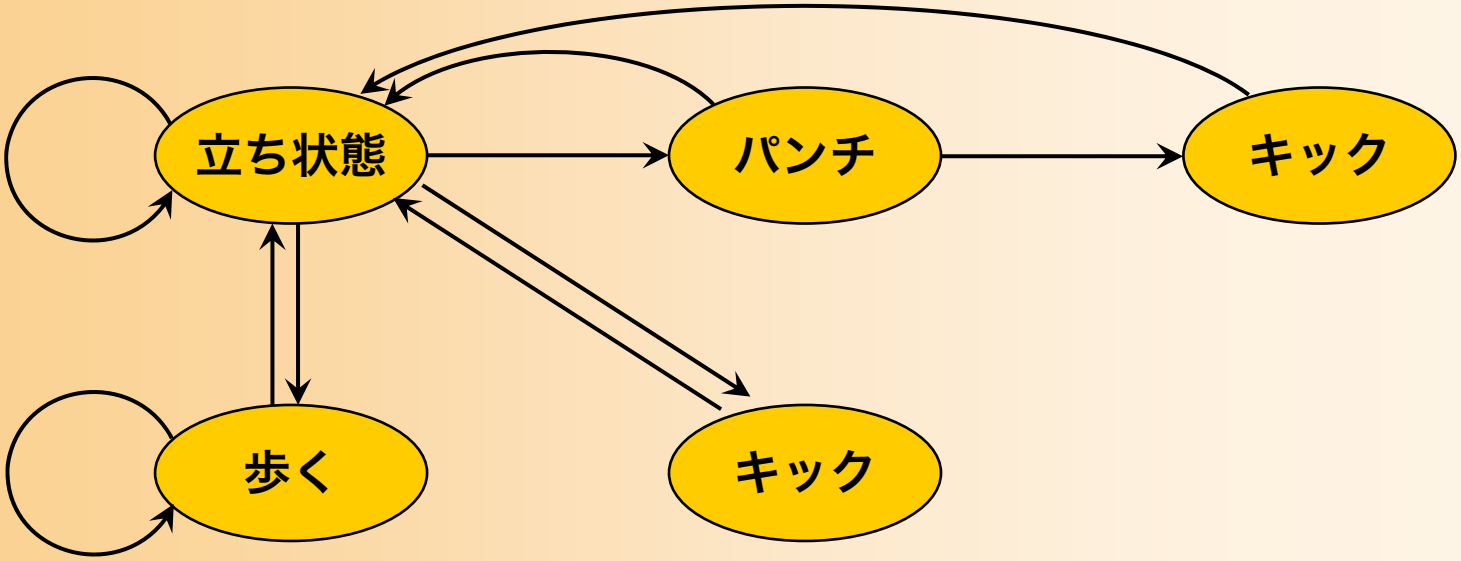
動作状態機械

動作データの再生

- オンライン・アニメーションでの動作再生
  - 動作を連続的に行う必要がある
  - ユーザの操作や周囲の状況に応じて適切な動作を行う必要がある
- 現在のゲームなどでの一般的な方法
  - あらかじめ多数の基本的な動作データを用意
  - 適切な動作データを順番に再生することで、連続的な動作再生を実現
  - 動作データの間がなめらかにつながるように作成しておく必要がある

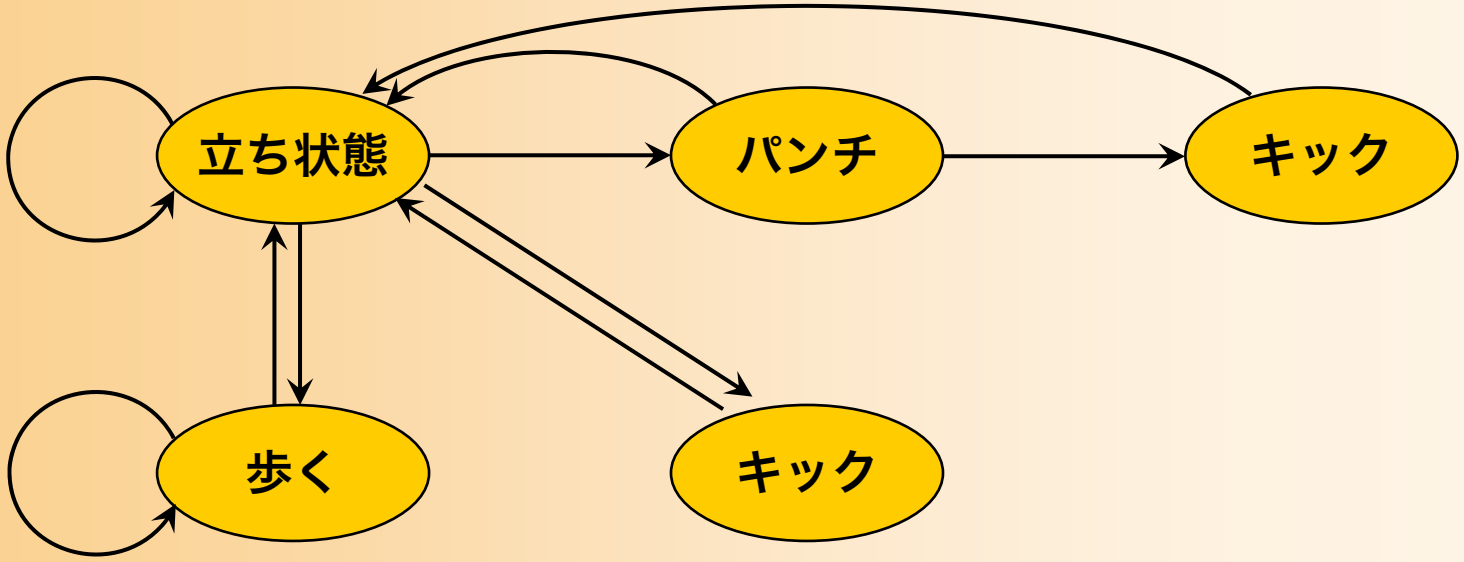
動作状態機械

- 多数の動作データと、連続して再生できる動作データ間のつながりを、グラフ構造で表現
  - 前の動作の終了姿勢と次の動作の開始姿勢が同じになるように、動作を作成
  - 各動作間の遷移のタイミングや方法を設定



動作状態機械の表現

- 動作状態機械（State Machine）
  - データ構造としては、ノードが短い動作、エッジが前後の動作の接続を表す、有向グラフとなる
  - 動作ツリー、動作グラフなどの呼び方もある
    - 「モーショングラフ」は、別の技術（後述）を指す

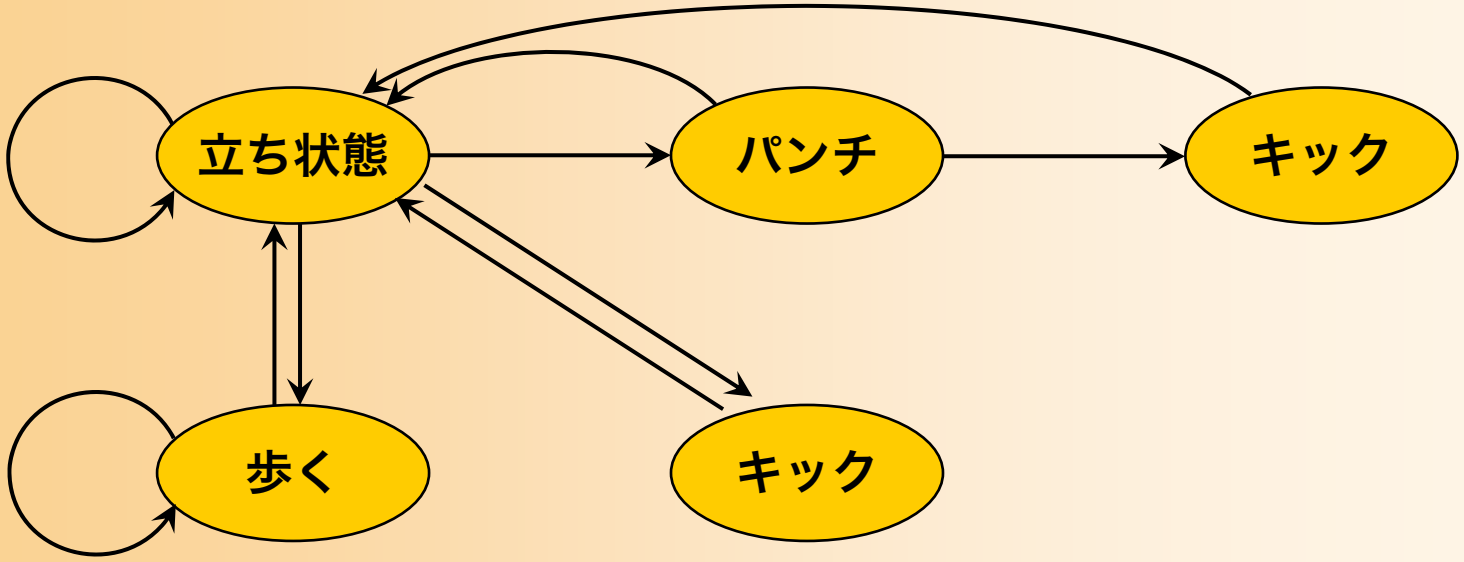


動作状態機械の作成

- それぞれの動作データは、一般的なアニメーション制作ソフトウェアを使って作成
  - 前後の動作がうまくつながるように、動作データを作成しておく
- 動作間の接続の設定は、動作状態機械の編集用のソフトウェアを使って、デザイナーが作成
  - 動作接続・遷移のパラメタ（タイミング等）を調整
  - 次の動作を選択する条件なども定義できる
  - 最近のゲームエンジンなどには、動作状態機械の編集用のソフトウェアが付属しており、利用可能
    - 例： Unity の Mechanim （Animator）

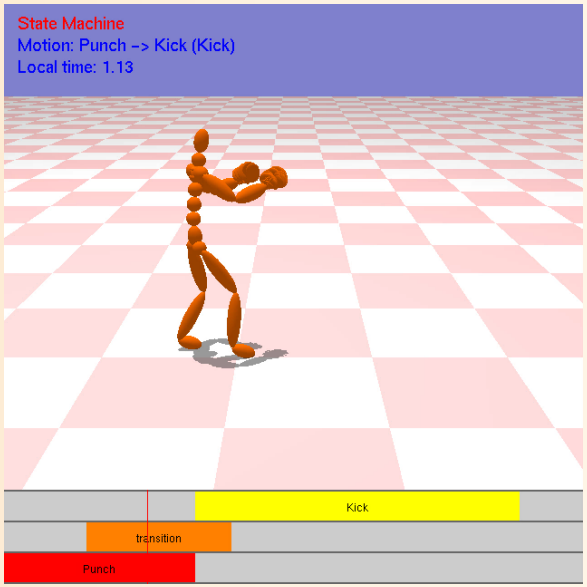
動作状態機械の利用

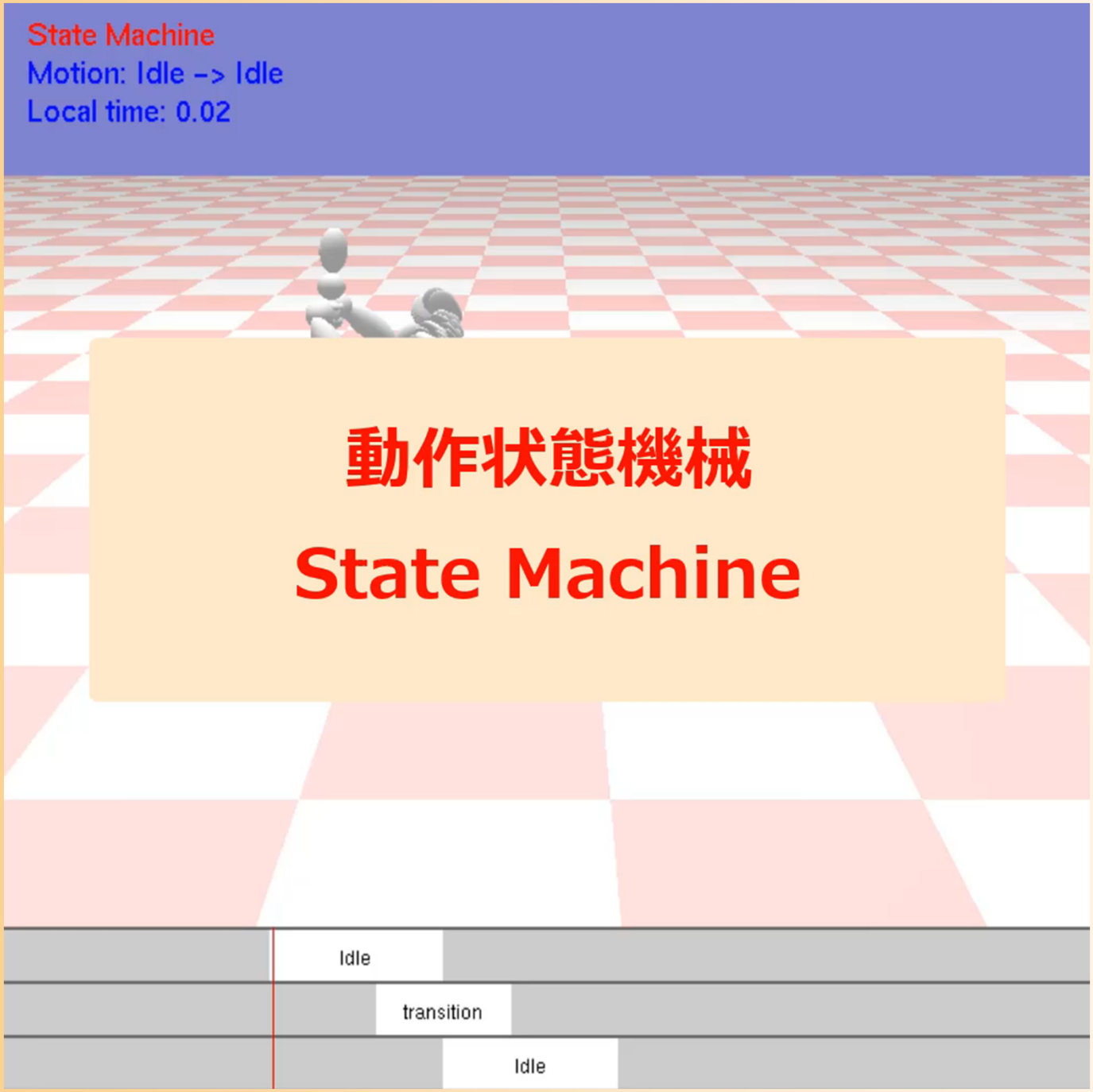
- 動作状態機械に従って、連続的に動作再生
- 次にどの動作状態に遷移するかを、利用者の操作や状況に応じて決定
  - プログラム上での処理が必要



デモプログラム

- 動作状態機械
  - キー操作に応じて、次に実行する動作を選択すると、連続的に動作を再生
    - キー操作がない場合は、デフォルトの動作を再生
  - 動作データや遷移情報をファイルから読み込み
  - 前後の動作の切り替えには、動作接続・遷移の処理を利用
  - タイムライン上に、現在と次の動作の時刻の情報を可視化




State Machine
Motion: Idle -> Idle
Local time: 0.02
動作状態機械
State Machine
Idle
transition
Idle

動作状態機械のプログラミング（1）

- 動作状態機械を表すためのデータ構造
  - 動作状態機械、状態（動作）、遷移

```
// 状態機械クラス
class  StateMachine
{
    // 骨格情報
    const Skeleton *  body;

    // 全状態情報
    vector< SMState * >  all_states;

    // 全遷移情報
    vector< SMTransition * >  all_transitions;
}
```

```
// 状態機械の状態（動作）の情報
struct  SMState
{
    // 状態に対応する動作データ
    Motion *  motion;

    // 次の動作への遷移情報
    vector< SMTransition * >  transitions;
}

//  状態機械の状態間（動作間）の遷移の情報
struct  SMTransition
{
    // 前・後の状態（動作）
    SMState *  prev_motion, *  next_motion;

    // 動作接続・遷移に用いるパラメタ情報
}
```

動作状態機械のプログラミング（2）

- 動作状態機械の設定ファイル
  - 状態と遷移の情報を記述
    - 各状態の動作データは、別途作成
    - 遷移の基準部位やタイミング等は、動作データを見て決定

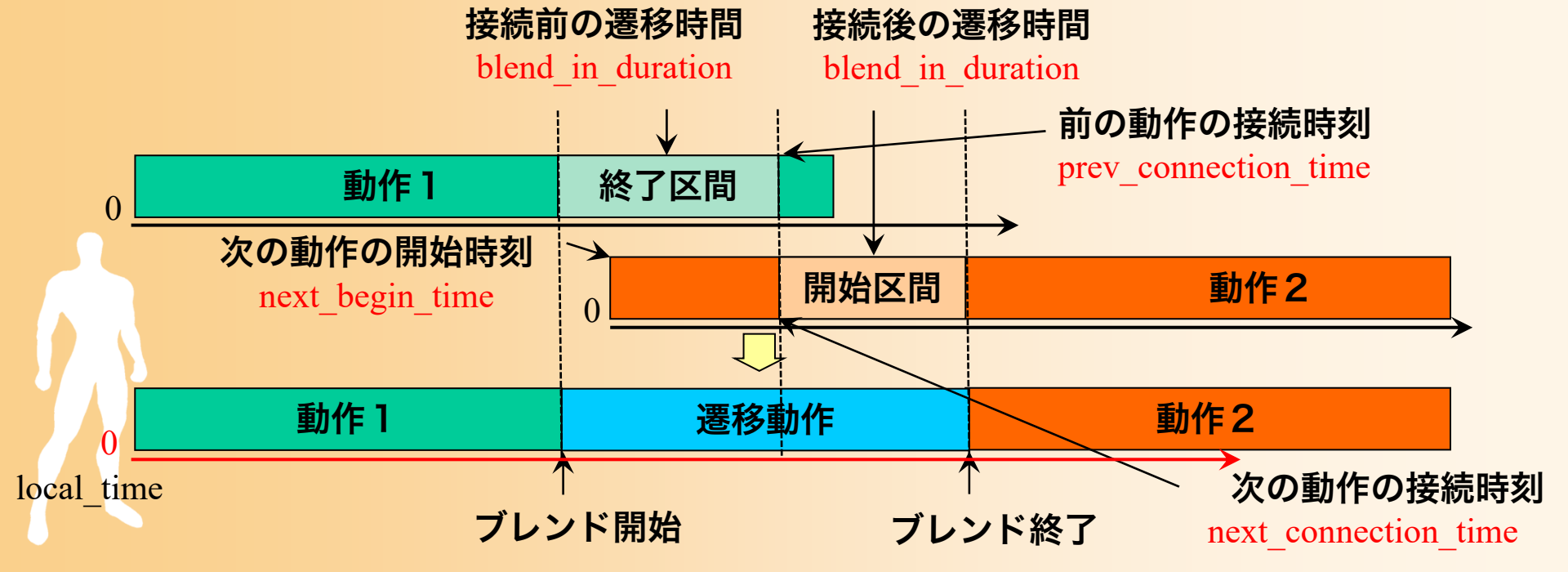

```
STATE Idle
MOTION fight_idle.bvh
COLOR 1.0, 1.0, 1.0
DEFAULT_NEXT_MOTION Idle

STATE Forward
MOTION fight_forward.bvh
COLOR 0.0, 1.0, 0.0
DEFAULT_NEXT_MOTION Idle
・・・

TRANSITION Idle Idle
BASE_SEGMENT Hips
BLEND_IN 0.25
BLEND_OUT 0.25

TRANSITION Idle Forward
BASE_SEGMENT LeftFoot
BLEND_IN 0.25
BLEND_OUT 0.25
・・・
```

動作状態機械のプログラミング（3）

- 動作状態機械の設定ファイルの読み込み
- 次の状態（動作）の決定
  - 利用者の入力により決定
  - 入力がない場合は、自動的に決定
- 動作再生処理
  - 前後の動作間の動作遷移の処理は、動作接続・遷移のプログラムと同様
  - 動作接続・遷移の拡張
    - 強制的な動作遷移への対応
      - 現在時刻から速やかに動作遷移を開始
    - 基準部位・向きを考慮した動作接続への対応

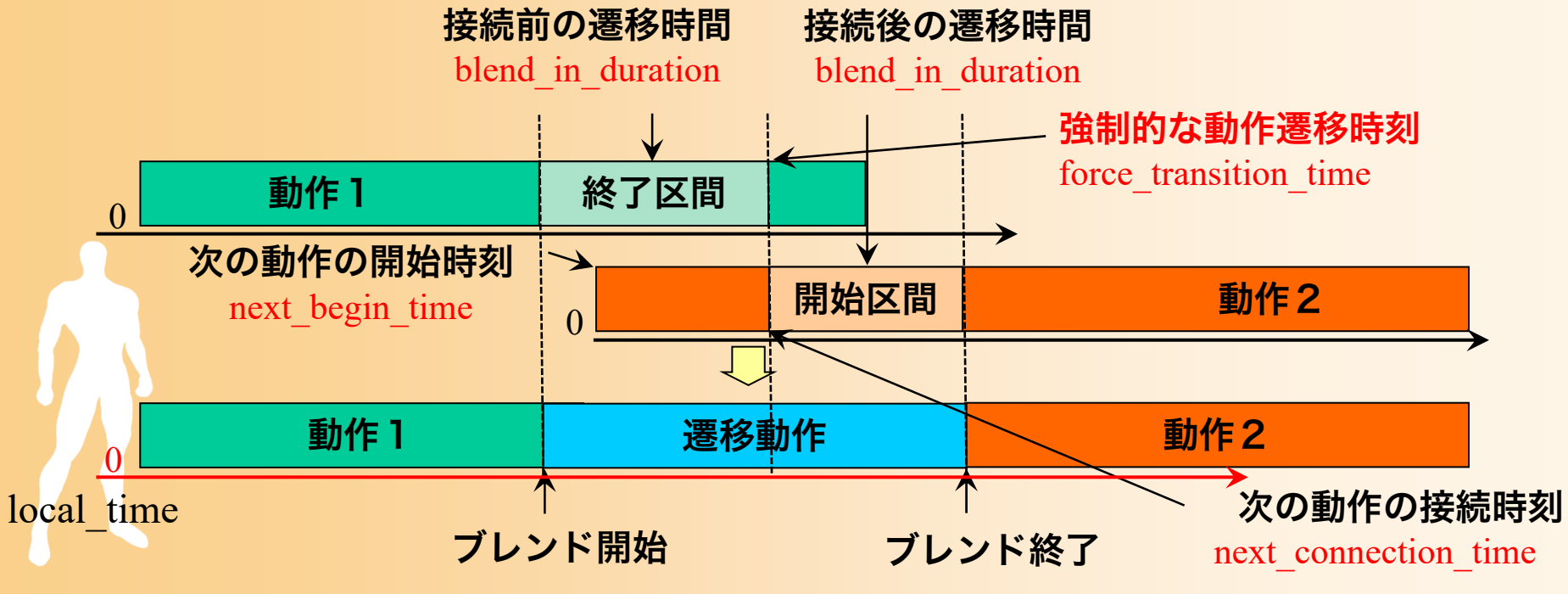
動作状態機械のプログラミング（4）

- 動作遷移のタイミングの情報
  - 次の動作の開始時刻（next_begin_time）
  - 動作ブレンドの開始時刻（blend_begin_time）
  - 動作ブレンドの終了時刻（blend_end_time）



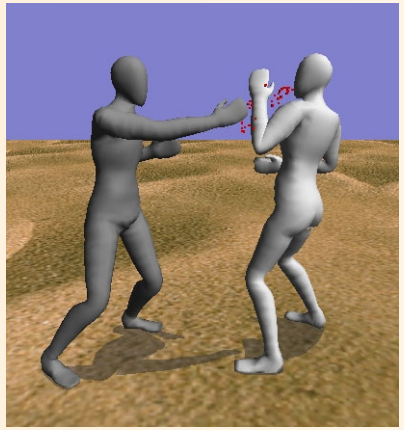
動作状態機械のプログラミング（5）

- 動作遷移のタイミングの情報（強制的な動作遷移）
  - 次の動作の開始時刻（next_begin_time）
  - 動作ブレンドの開始時刻（blend_begin_time）
  - 動作ブレンドの終了時刻（blend_end_time）



動作状態機械による方法の問題点

- 動作状態機械の作成には多くの手間がかかる
- 一定動作の繰り返ししかできない
  - ワンパターンな動きになる
  - 特に衝突や外力などの力学的な影響に応じた自然な動作が困難
- 自律動作の実現は困難
  - 敵キャラクタや群集などを自律的に動かすためには、適切な動作ルールが必要になる



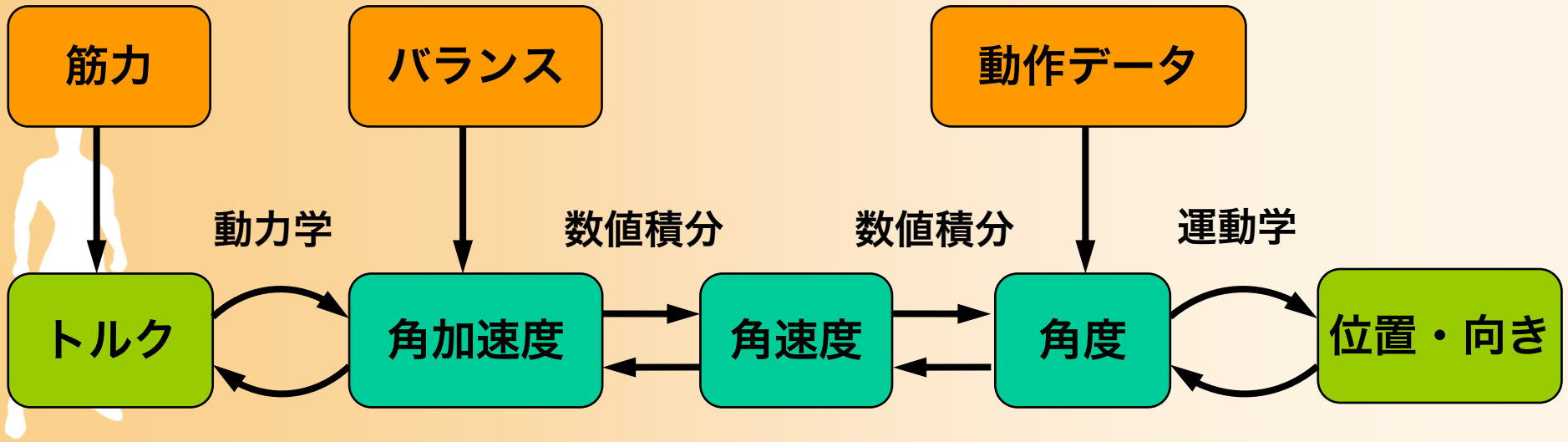
動力学を考慮した動作生成

動力学を考慮したアニメーション

- 運動学（キネマティックス）
  - 多関節体の骨格構造を扱うための手法
    - 関節回転と各部位の位置・向きの関係を扱う
  - 現在は、こちらが主に使われている
  - 力学的に正しい動きが生成されることは保証されない
- 動力学（ダイナミックス）
  - 運動学に加えて、力学的な要素を考慮する手法

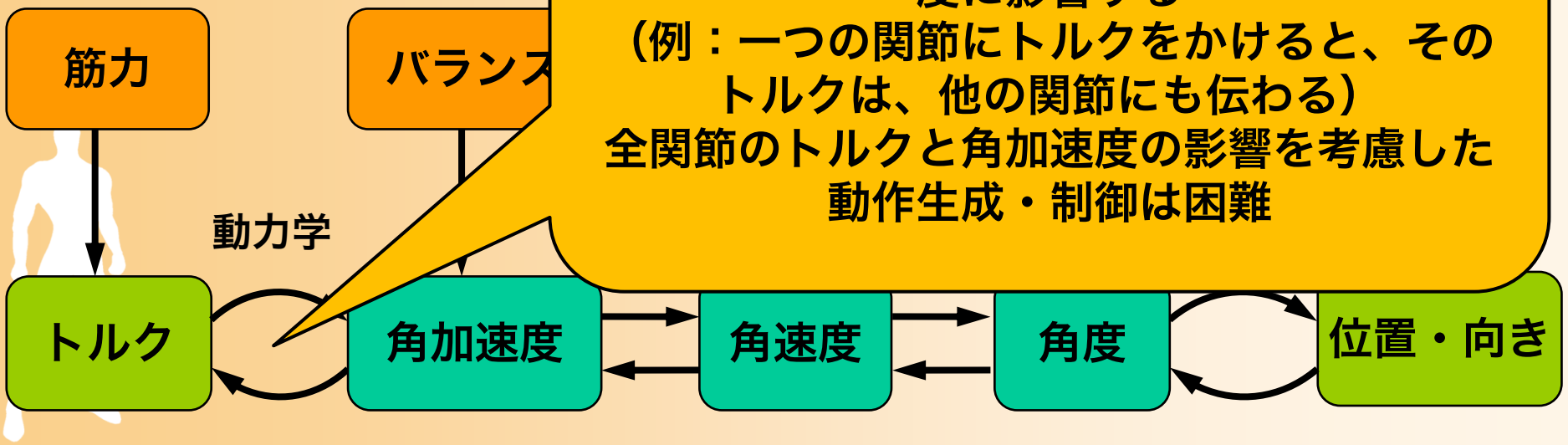
動力学を考慮した動作生成

- 主に２種類の方法がある
  - 動力学シミュレーションによるアプローチ
  - 動作最適化によるアプローチ
- 多関節体の動力学



動力学を考慮した動作生成

- 主に２種類の方法がある
  - 動力学シミュレーションによるアプローチ
  - 動作最適化によるアプローチ
- 多関節体の動力学



動力学シミュレーション

- コントローラ＋動力学シミュレーション
  - 本物のロボットと同様に、制御理論に基づいて関節のトルクを制御するコントローラを構築
  - 動力学シミュレーションを行って動作を生成
    - 安定した動作を実現できるコントローラの設計は困難
    - 人間らしい動作を生成することは困難

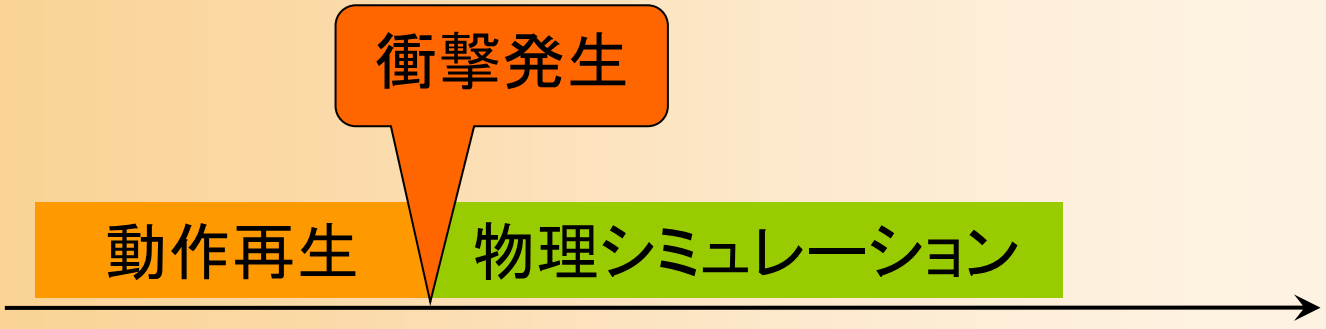
$$\tau_i = K\left(\theta_{i,goal} - \theta_{i,curr}\right) - K\left(\dot{\theta}_{i,goal} - \dot{\theta}_{i,curr}\right)$$

PD制御
目標角度ー現在角度に適当な係数をかけることで各関節のトルクを決定

[Hodgins 97]

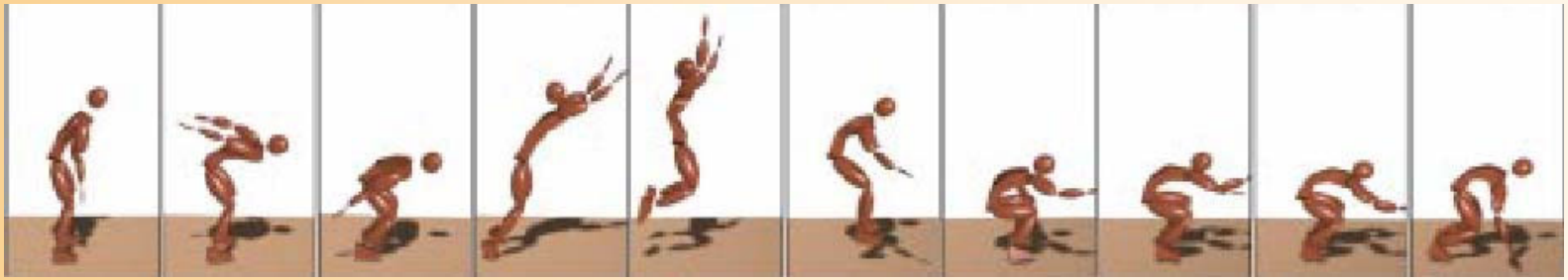
動力学シミュレーションの応用例

- ラグドール・シミュレーション
  - 衝撃時の動作を動力学シミュレーションで生成
  - 一部のコンピュータゲームで使われている
  - 衝撃後のみ、動力学シミュレーションに切り替え
    - 受動的な動作のみで、能動的な動作は実現できない
    - 倒れずに途中で回復して元に戻るような動作は実現できない



動作最適化

- 動作最適化による動作変形
  - 関節トルクやバランスの不自然さを評価する目標関数 f（動作） を設計
  - 目標関数 f（動作） がなるべく小さくなるように、動作を少しずつ修正する
    - 計算に非常に多くの時間がかかる
    - 人間のような多関節体には、自由度が高すぎてそのまま適用するのは困難



[Popovic 98]

歩行動作生成

歩行動作の重要性

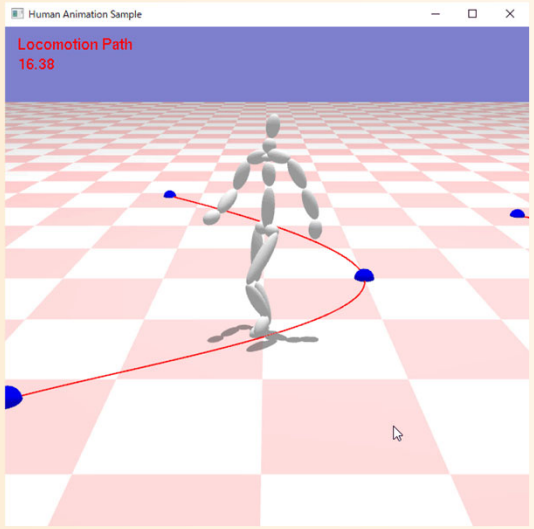
- 歩行動作
  - 人間の基本的かつ重要な動作の一つ
  - 任意の軌道に沿った歩行、地面の高低や障害物への対応、歩き方の変化、などの要素を含むため、歩行動作の生成には工夫が必要になる
  - 歩行だけでなく、移動動作全般も含む場合もある
    - 歩行、走行、方向転換、ステップ、ジャンプ
- 歩行動作の生成を目的とした手法が開発されている

歩行動作生成の手法

- 動作補間による歩行動作生成
  - 速度や方向などの特徴パラメタによる動作補間
- 動作変形による歩行動作生成
  - 軌道や地面の高さに合わせた動作変形
- 動力学シミュレーションによる手法
  - 手作業で設計されたコントローラの利用
  - 機械学習によるコントローラの獲得
- 深層学習による動作生成

デモプログラム

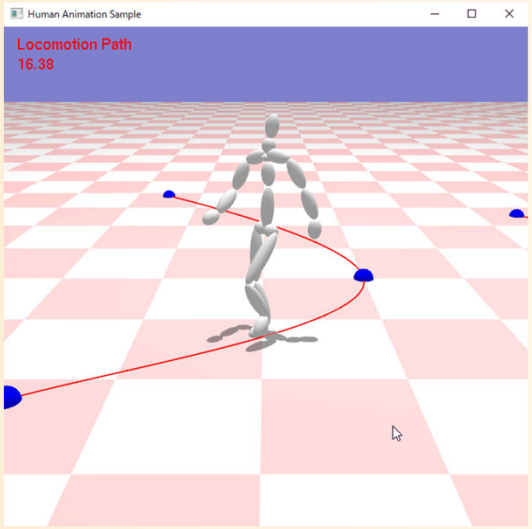
- 軌道に沿った歩行動作の生成
  - １サイクル分の歩行動作の軌道を変形して、入力軌道に当てはめる
  - 歩行軌道の編集
    - 制御点をマウスでドラッグすることで操作
    - B-Spline曲線による軌道生成
  - 歩行動作の生成




Locomotion Path
0.12
軌道に沿った歩行動作
Locomotion Along Path

軌道に沿った歩行動作の生成（1）

- デモプログラムでの、歩行動作の生成方法
  - １サイクル分の歩行動作の軌道を変形して、入力軌道に当てはめる
  - 軌道上の各点における、歩行動作の状態を計算
    - 時刻、位置・向き、歩行動作のステップ数、正規化時間
  - 再生時刻に対応する点から、歩行動作の姿勢を生成
  - 曲率が高い箇所では、動作が不自然になる可能性がある



軌道に沿った歩行動作の生成（2）

- 歩行軌道上の点での状態を表すデータ構造

```
// 軌道上の各点での歩行動作の状態を表す構造体
struct  LocomoPoint
{
    // 歩行開始からの経過時間
    float       time;

    // 歩行動作の繰り返し回数
    int         step_count;

    // 歩行動作の正規化時間(0.0～1.0)
    float       step_norm_time;

    // 位置・向き(基準点の位置・向き)
    Point3f     pos;
    float       ori;
}

// 歩行軌道上の各点の状態の配列
vector< LocomoPoint >  locomotion_points;
```

軌道に沿った歩行動作の生成（3）

- 歩行動作の初期化
  - 入力軌道を連続的な点の集まりで表す
  - 各点での歩行動作の状態を求める
    - １サイクル分の歩行動作データを読み込む
    - １サイクル分の歩行動作データの移動距離や時間から、各点の時刻や歩行動作の繰り返し回数・正規化時刻を計算する
- 歩行動作の再生
  - 現在時刻の点での歩行動作の状態を、前後の点の状態を補間して求める
  - 歩行動作から取得した姿勢を、現在時刻の点の位置・向きに当てはめる

今回の内容

- 動作生成・制御
  - 動作状態機械
  - 動力学を考慮した動作生成
  - 歩行動作生成
- 深層学習による動作生成
- 自律動作制御
  - 身体制御
  - 動作制御
  - 行動制御

深層学習を用いた動作生成

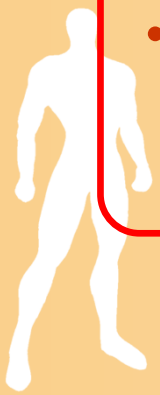
深層学習を用いた動作生成

- 機械学習の動作データ処理への利用
  - 動作認識（分類）には、古くから利用されている
  - 動作データは複雑であるため、従来の機械学習手法では、動作生成への応用は難しかった
  - 最近は、深層学習（ニューラルネットワーク）を動作生成に応用する技術も開発されている
    - 多数の動作データを学習することで、動作生成・変形などを実現
    - 実用レベルでの利用は、まだ少ない

機械学習の用途の分類

- 深層学習（・機械学習）の一般的な用途
- 認識（分類・回帰）
  - 高次元のデータ → 低次元のデータ
- 変換
  - 高次元のデータ → 高次元のデータ
- 生成
  - 低次元のデータ → 高次元のデータ

深層学習により実現可能になってきた



動作に対する機械学習の用途

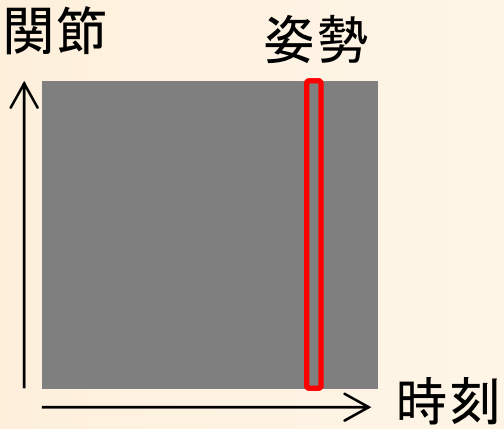
- 動作認識
  - 動作や姿勢の種類を認識する
  - 例：ジェスチャ認識、人物認識など
- 動作変換
  - 入力動作（姿勢）を別の動作（姿勢）に変換
  - 例：動作スタイルの変換、動作修正など
- 動作生成
  - 動作の生成や制御
  - 例：利用者の操作に応じた動作生成・制御など

動作を扱う深層学習ネットワーク

- 動作データは時系列データとなる
- 逐次的に、１フレーム分の姿勢、もしくは、一定数のフレーム分の姿勢を出力するようなネットワークを使用する
  - 繰り返し出力を行うことで、一連の動作を出力
- 適切な動作を出力するためには、姿勢以外の出力も必要となる
  - 例：足の地面への接地情報など

動作データの表現方法

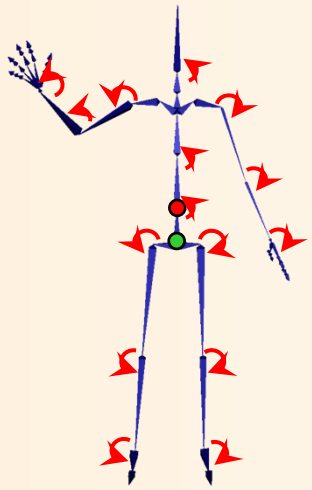
- 深層学習の入出力に姿勢や動作を使用
  - １フレーム分の姿勢 or 一定数フレーム分の動作時間の動作データをベクトル・行列として表現
    - 姿勢を表す全関節の回転情報を一列にまとめる
      - 関節の回転の代わりに位置を使うこともある
    - 腰の位置・向きや足の制約条件の情報も含める必要がある
    - 一つの姿勢で 100次元程度の情報
  - 出力に対する後処理の必要性
    - 姿勢・動作としての制約が保証されないため、姿勢・動作変形の後処理が必要になる



姿勢データの表現方法の選択

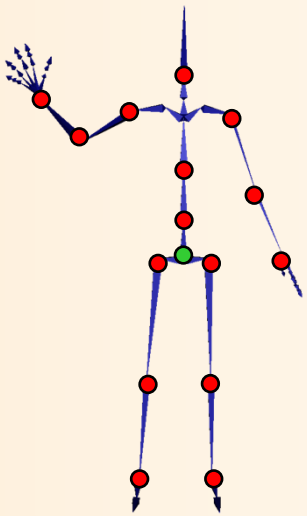
- 関節回転による表現
  - 基本的な姿勢表現の方法
  - 四元数がよく用いられる
  - 要素間に制約がある
  - 姿勢や動作を再現しやすい？

(x, y, z, w)



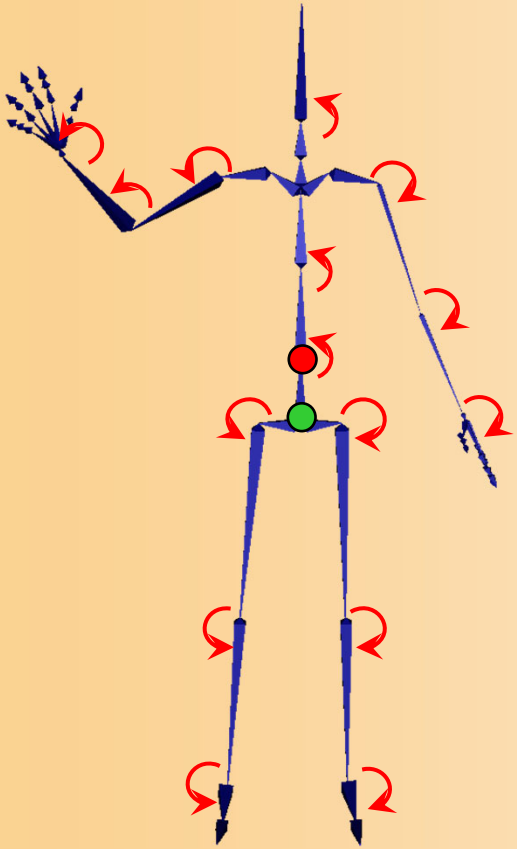
- 関節位置による表現
  - 運動学により関節回転間で変換
  - 要素間の制約がない
  - 手先・足先の位置を再現しやすい？

(x, y, z)



姿勢の表現方法と運動学

- 全関節の回転
  + 腰の位置・向き

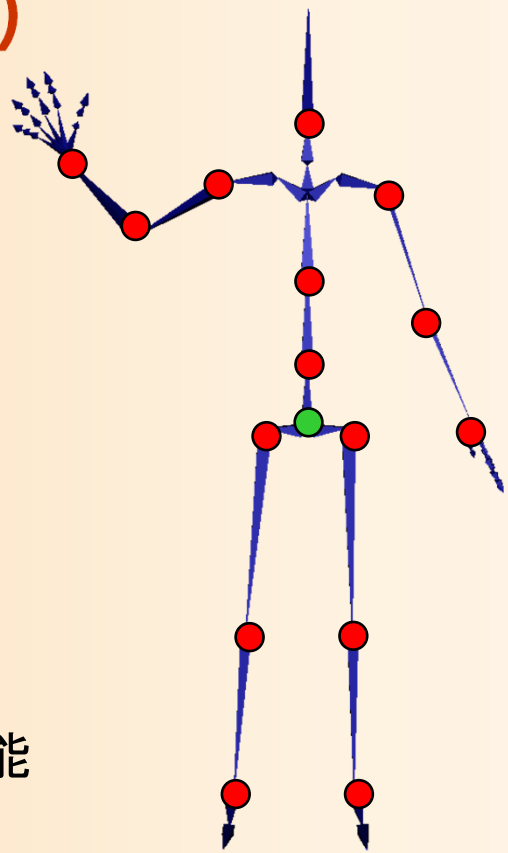


順運動学

逆運動学

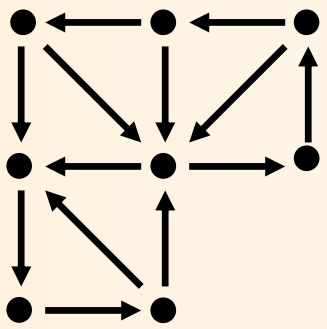
相互の変換が可能

- 全関節の位置
  （+ 全体節の位置・向き）



他の動作データの表現方法

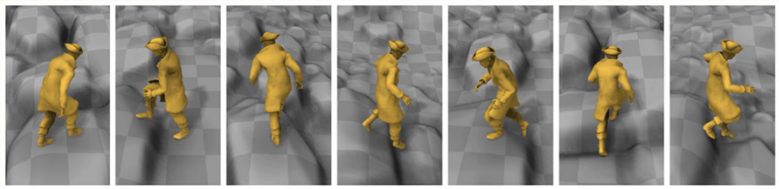
- 動作データを別の形式に変換して扱うこともある
  - 信号データ
    - 各関節の角度（１次元）の時間変化
  - グラフデータ
    - 各ノードが姿勢や短い動作を表す
    - 長い動作をノードのラベルの記号列により表せる

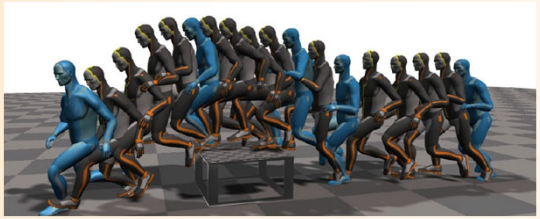


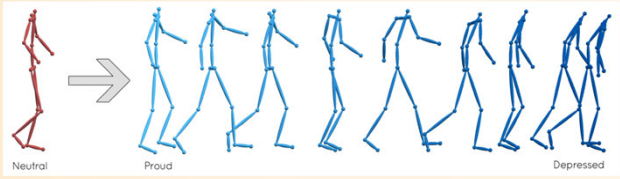
動作グラフ構造

関連研究

- 歩行動作生成
  - Holden 2017
- キーフレーム補間
  - Harvey 2020
- 動作スタイル変換
  - Smith 2019

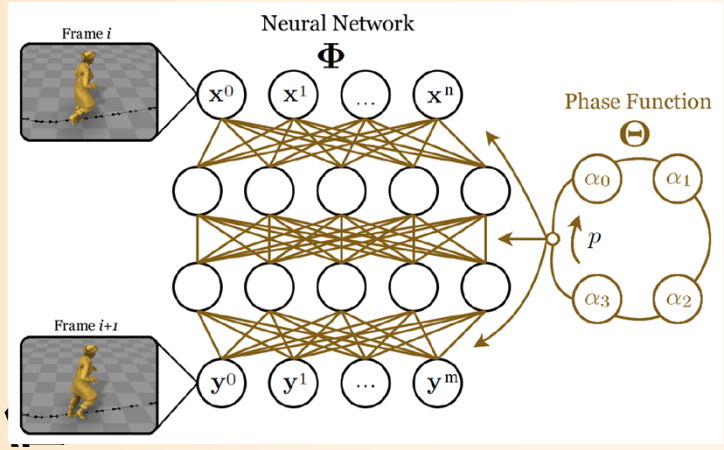






歩行動作生成への応用

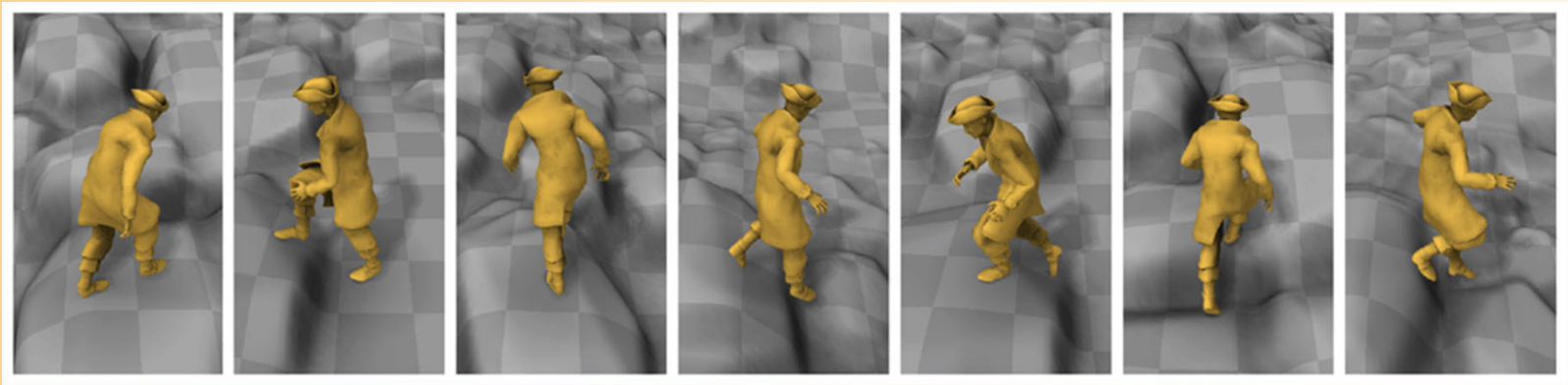
- 歩行動作生成への深層学習の応用
  - 入出力は姿勢データ
    - 前の姿勢と歩行動作の軌道を入力
    - 現在の姿勢を出力
  - ２層の全結合ネットワーク
  - ネットワークの重みを、固定値ではなく、歩行動作の位相（0~2π）の関数とする



Daniel Holden, Taku Komura, and Jun Saito, "Phase-Functioned Neural Networks for Character Control", ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2017), Vol. 36, No. 4, Article No. 42, pp. 1-13, July 2017.

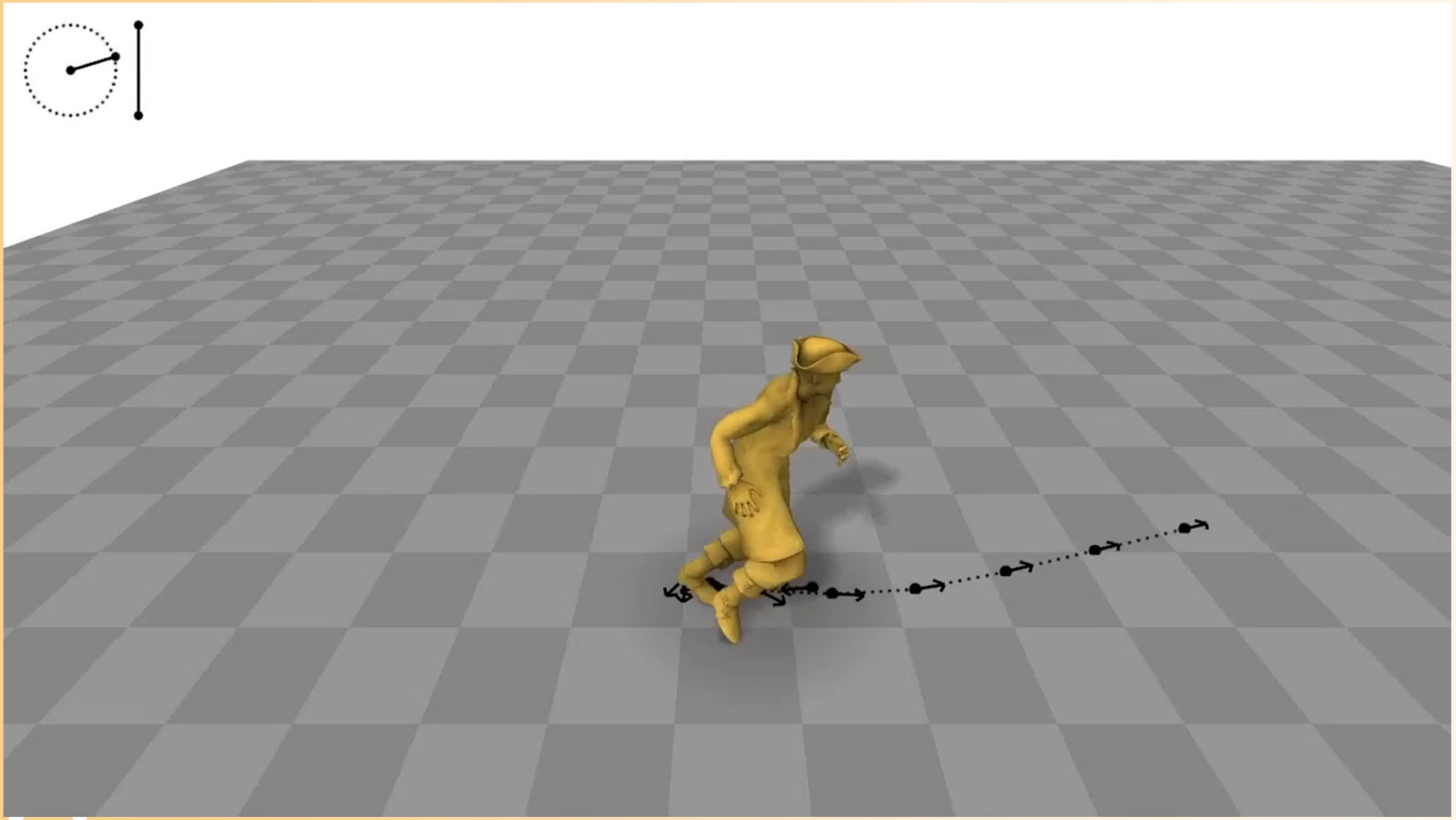
歩行動作生成への応用

- 対話的な歩行動作の生成
  - 多数の歩行動作データをモーションキャプチャにより取得して、深層学習により学習
  - 入力に応じて歩行動作を生成（制御）



[Holden 2017]

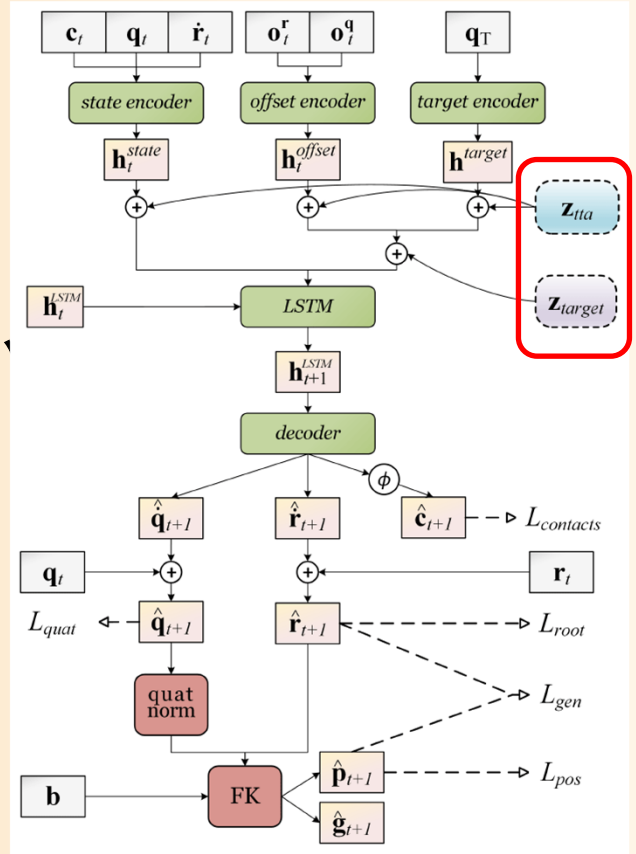
歩行動作生成への応用



[Holden 2017]

キーフレーム補間への応用

- キーフレーム補間動作生成への深層学習の応用
  - 入力は前のフレームの姿勢と次のキー姿勢・時刻
  - 出力は現在フレームの姿勢
  - LSTMを使用
    - Transformer ネットワークで用いられる位置符号化を応用

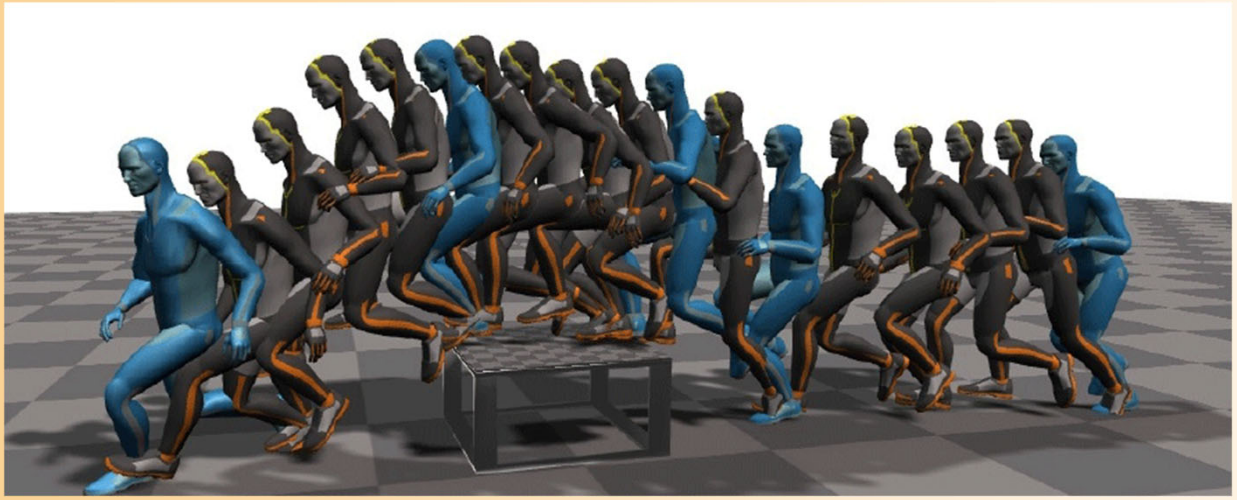


[Harvey 2020]

Félix G. Harvey, Mike Yurick, Derek Nowrouzezahrai, and Christopher Pal, "Robust Motion In-betweening", ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2020), Vol. 39, No. 4, Article No. 60, pp. 1-12, 2020.

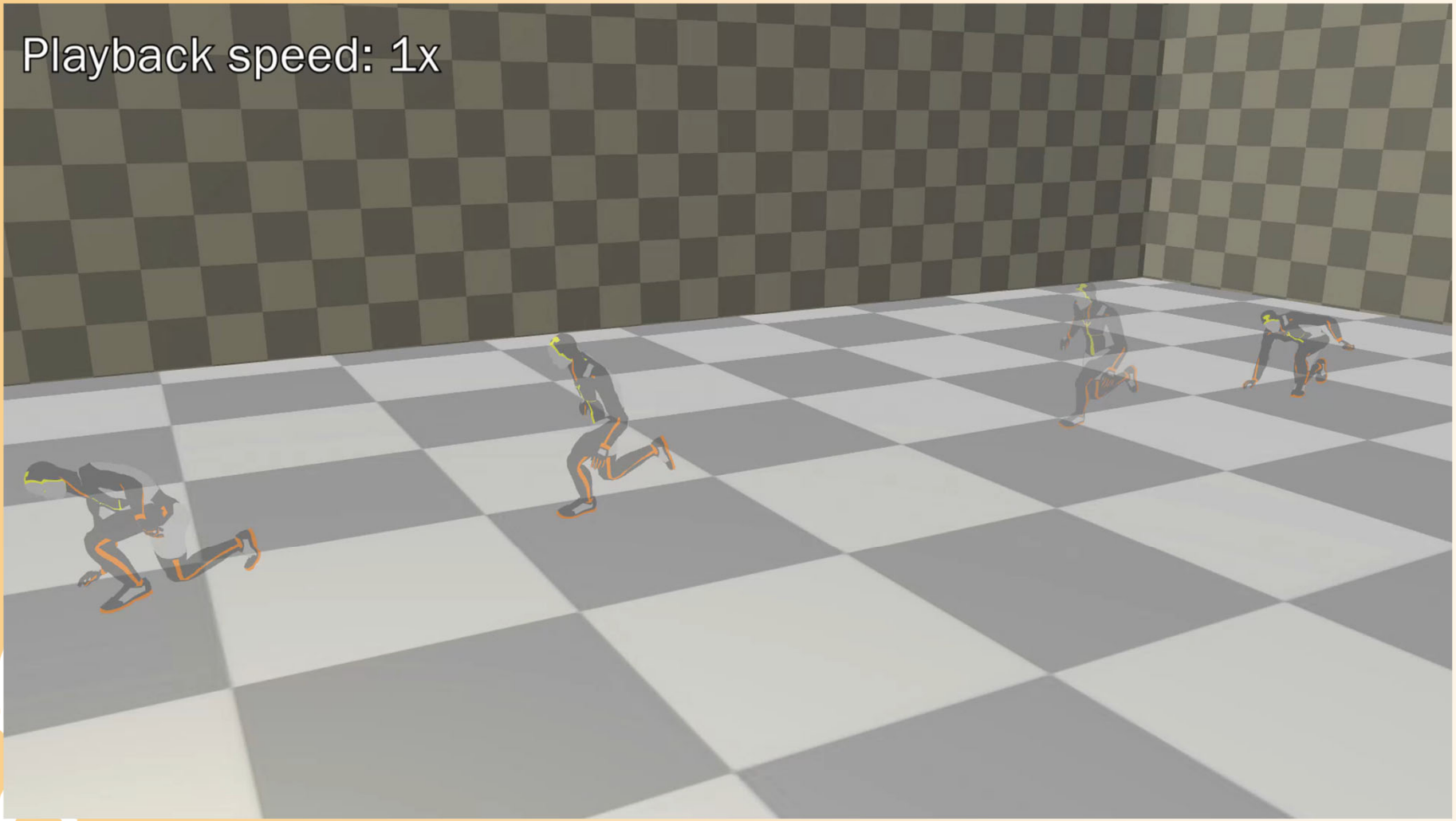
キーフレーム補間への応用

- キーフレーム補間による動作生成
  - 利用者はキーフレームの姿勢・時刻を入力
    - 下図の青い姿勢
  - キーフレームを補間して間の動作を生成
    - 下図の灰色の姿勢



[Harvey 2020]

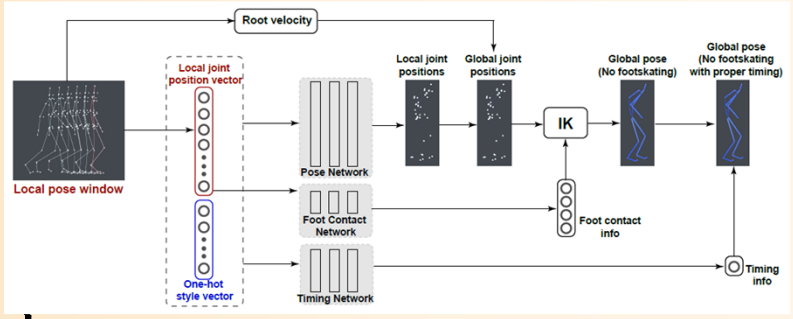
キーフレーム補間への応用



[Harvey 2020]

動作スタイル変換への応用

- 動作スタイル変換への応用
  - 入力は短い動作データ
    - 目標スタイルも入力
      （one-hot-vector）
  - 出力は姿勢データ
    - 姿勢・接地・時間の情報を出力
    - 全出力を統合して現在フレームの姿勢を出力
  - 姿勢・接地・時間とも、３層の全結合ネットワーク

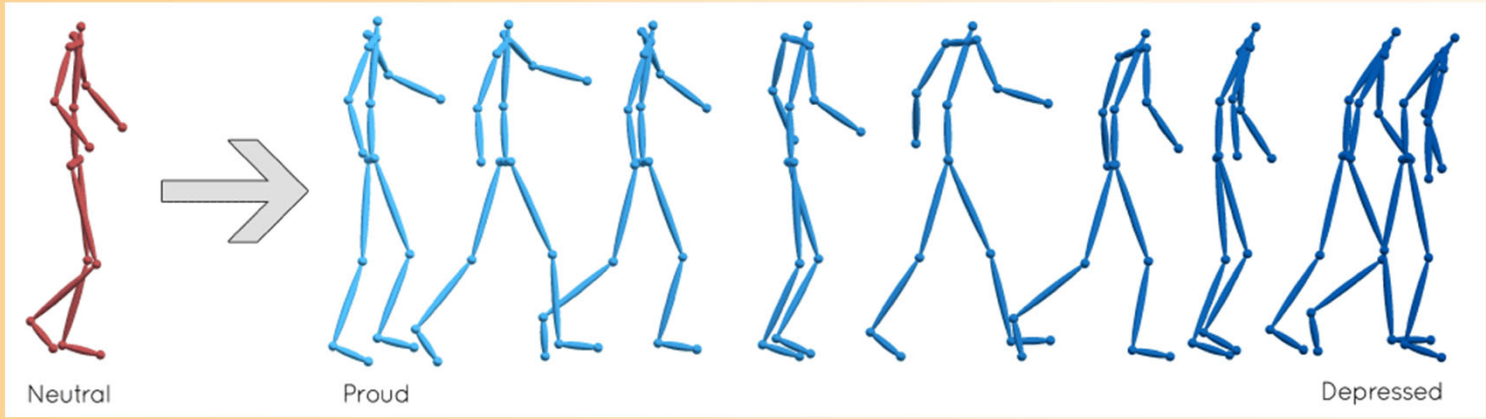


[Smith 2019]

Harrison Jesse Smith, Chen Cao, Michael Neff and Yingying Wang, "Efficient Neural Networks for Real-time Motion Style Transfer", Proceedings of the ACM in Computer Graphics and Interactive Techniques (PACMCGIT), vol. 2, no. 2, Article No. 13, pp. 1-17, 2019.

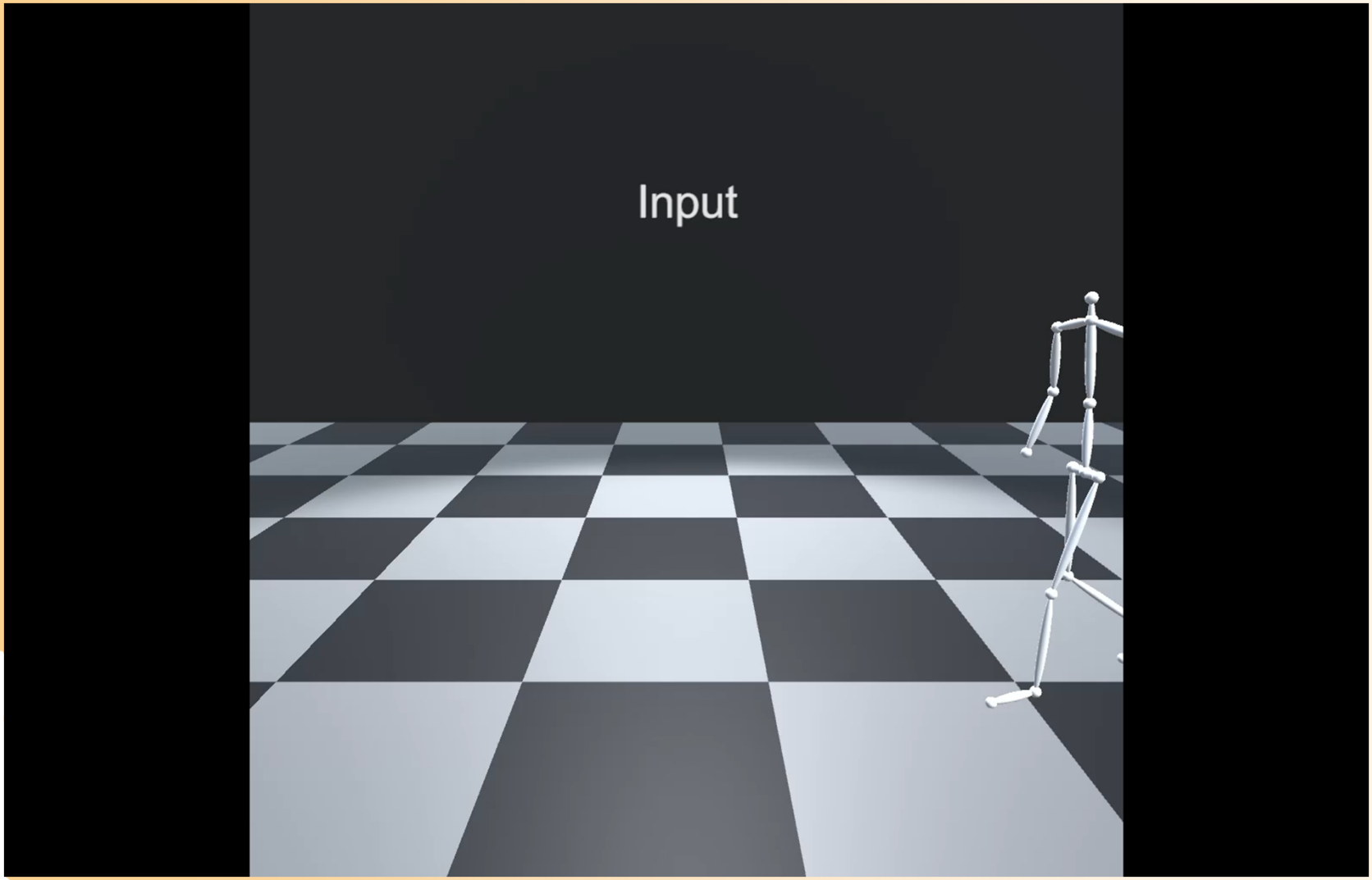
動作スタイル変換への応用

- 動作スタイル変換
  - 入力された動作データに対して、スタイルを付与した動作データを出力
    - neutral, proud, angry, depressed, strutting, childlike, old, sexy の８種類のスタイルを使用
    - スタイルの混合も可能



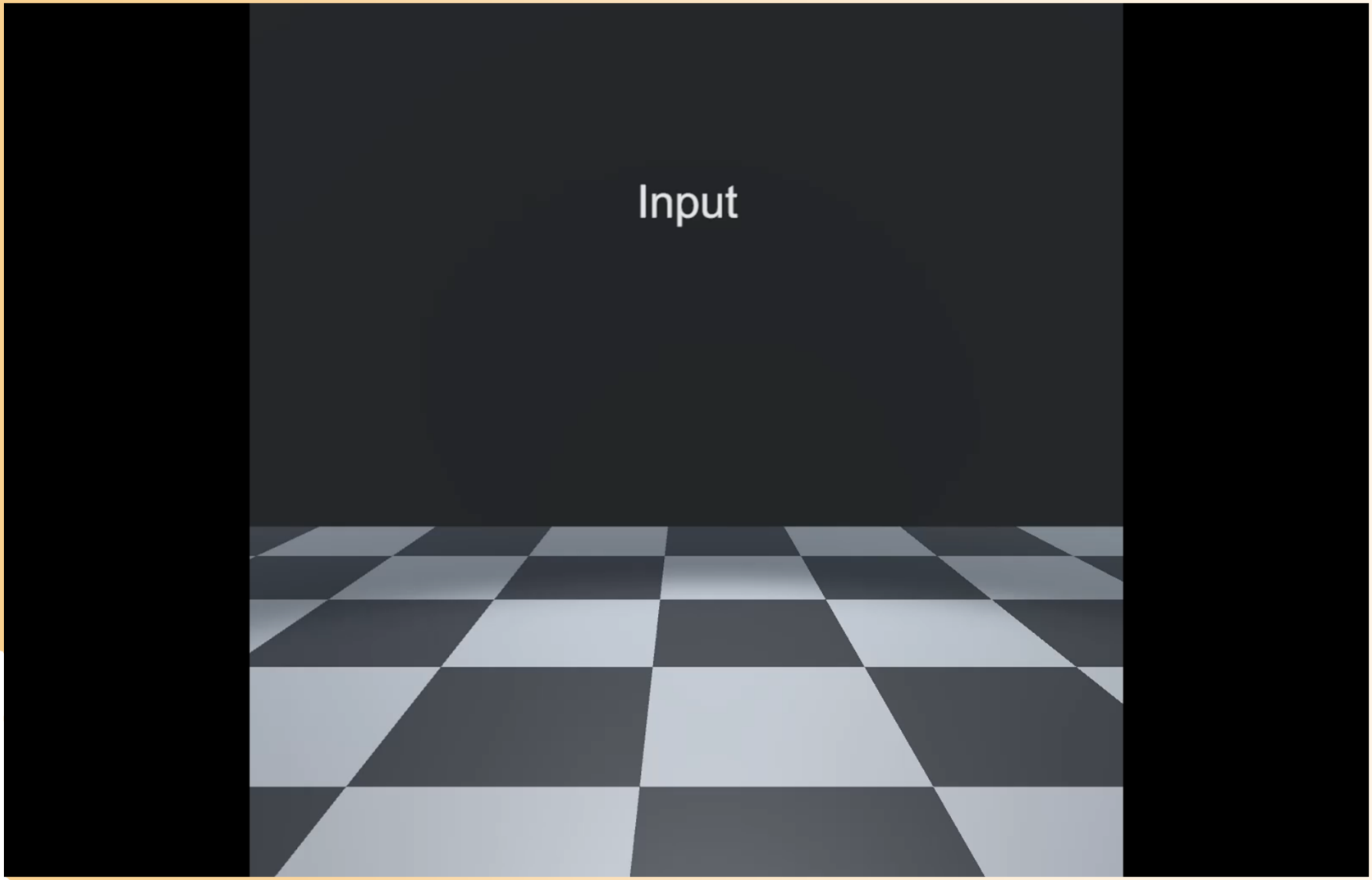
[Smith 2019]

動作スタイル変換への応用



[Smith 2019]

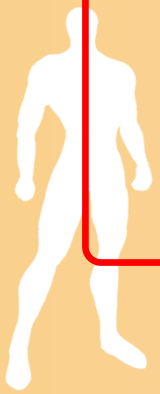
動作スタイル変換への応用



[Smith 2019]

今回の内容

- 動作生成・制御
  - 動作状態機械
  - 動力学を考慮した動作生成
  - 歩行動作生成
- 深層学習による動作生成
- 自律動作制御
  - 身体制御
  - 動作制御
  - 行動制御



自律動作制御

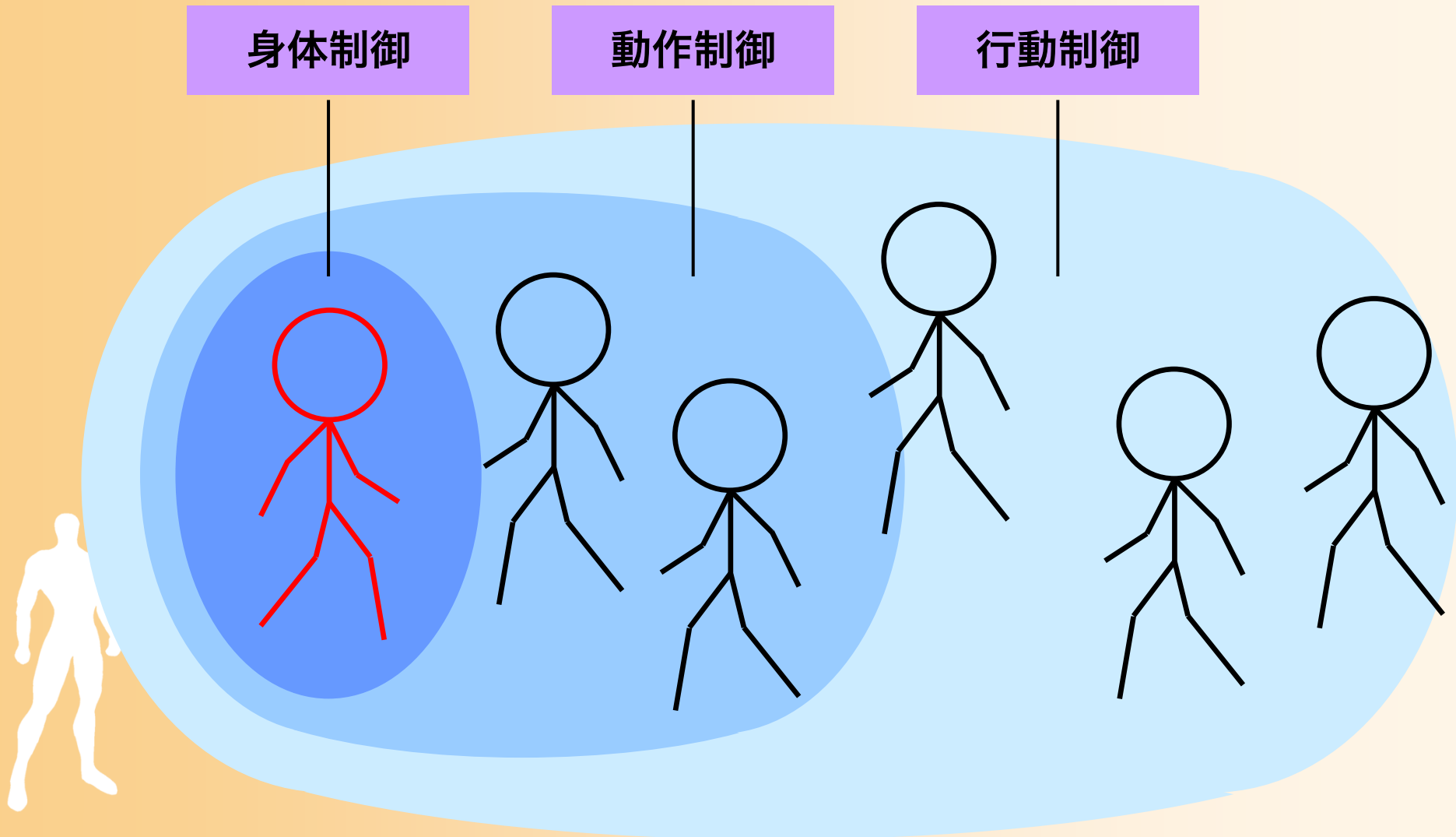
自律動作制御

- 自律動作制御
  - 与えられた指示や周囲の状況に応じて、適切な動作を生成
  - 例：コンピュータゲームにおける自律動作制御

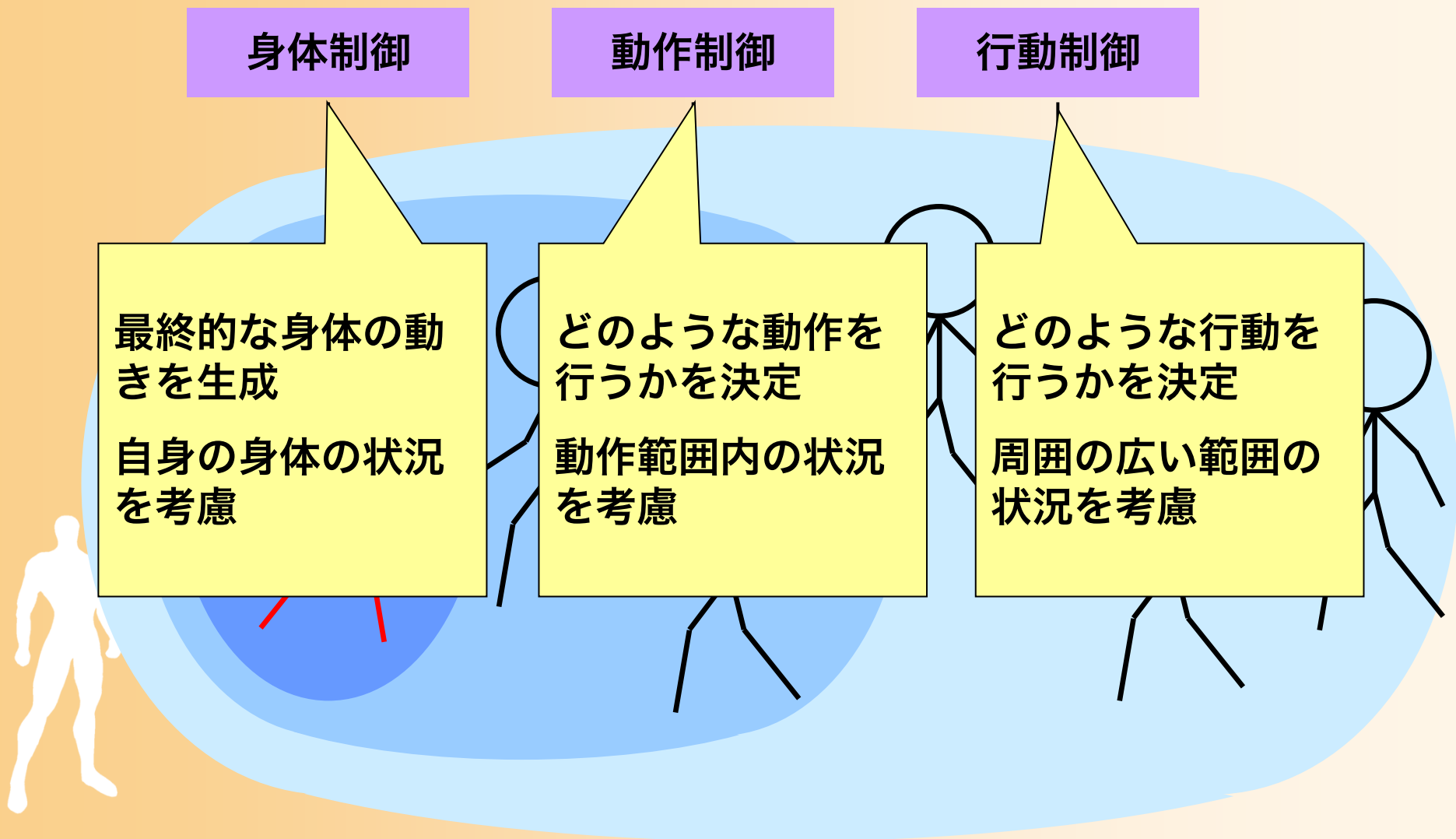
Non-Player Character
完全に自律的に動作を行う必要がある

Player Character
半自律的に動作を行う必要がある
（ex. プレイヤーの抽象的な操作に応じて具体的な動作を実現）

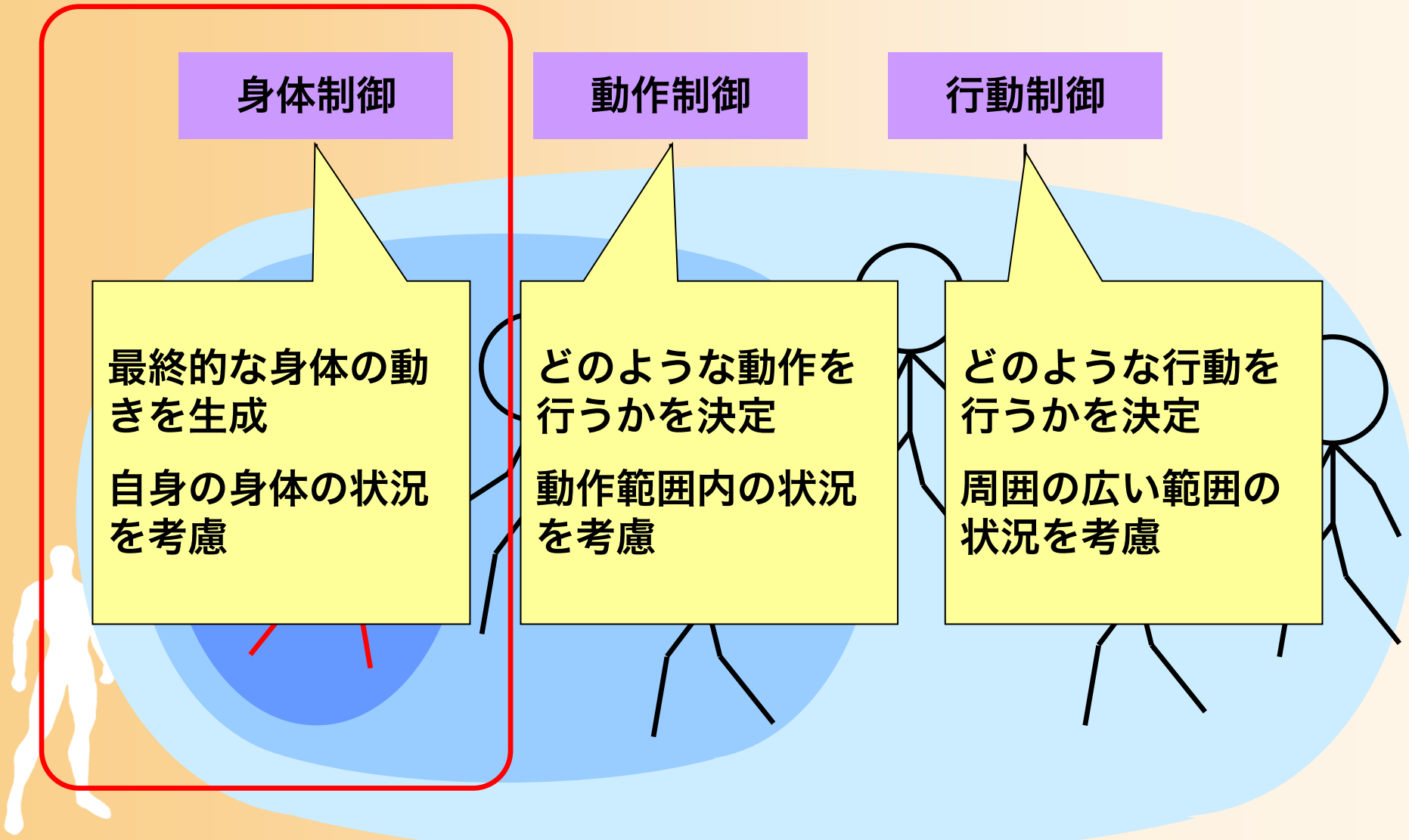
自律動作制御のレベル



自律動作制御のレベル

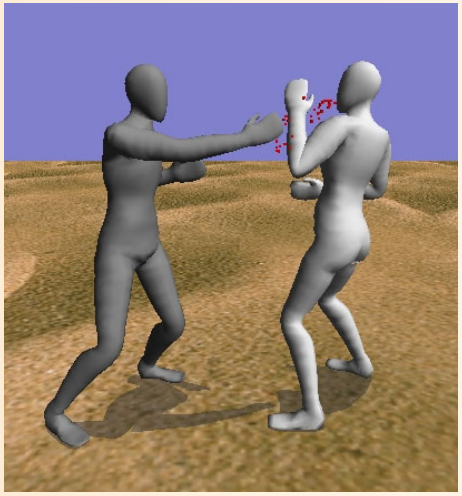

身体制御
動作制御
行動制御
最終的な身体の動きを生成
自身の身体の状況を考慮
どのような動作を行うかを決定
動作範囲内の状況を考慮
どのような行動を行うかを決定
周囲の広い範囲の状況を考慮

身体制御の技術


身体制御
動作制御
行動制御
最終的な身体の動きを生成
自身の身体の状況を考慮
どのような動作を行うかを決定
動作範囲内の状況を考慮
どのような行動を行うかを決定
周囲の広い範囲の状況を考慮

身体制御の課題

- 衝突や外力などの力学的な影響に応じた身体制御（動作生成）
  - 動力学シミュレーションを使う方法では、受動的な動作は生成できるが、能動的な動作は生成できない

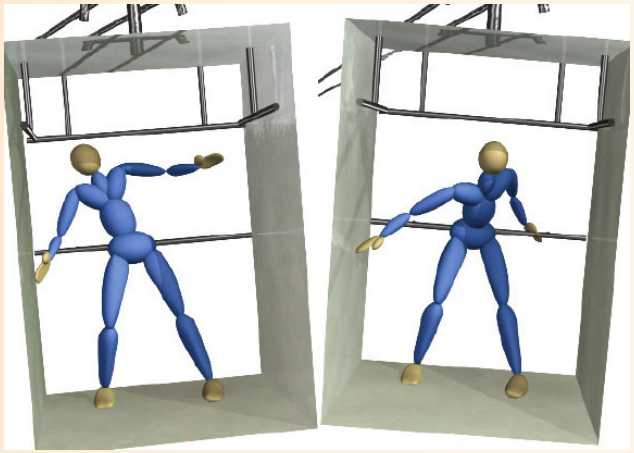


身体制御の技術

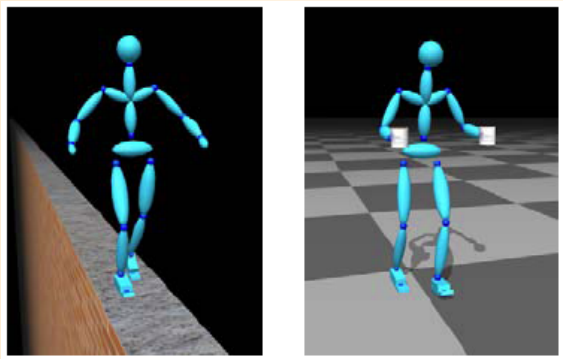
- モデルベース手法 vs データベース手法
  - モデルベース手法
    - 何らかのモデル（アルゴリズム）に従って動作を生成
    - 個人ごとの動作の違いの実現などは困難
  - データベース手法
    - 大量のデータを用意しておくことで、問題を解決
    - 準備が必要、適切なデータの検索・変形は困難
  - ハイブリッド手法
    - 両方をうまく組み合わせる手法
    - どのように組み合わせるかは、難しい

関連研究（モデルベース手法）

- 関節角度制御 [Jain 2009]
  - 力学的要素を考慮して、最適な角度（＋速度、加速度）を決定
  - 最適化問題に帰着

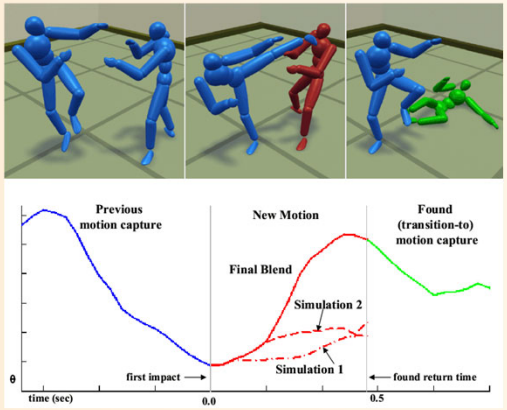


- 歩行制御モデル [Wang 2009]
  - 動力学シミュレーションによる歩行動作
  - 安定性を上げるための工夫



関連研究（ハイブリッド手法）

- 物理シミュレーションと動作データの利用 [Zordan 05]
  - 衝撃後の動作を物理シミュレーションで計算
  - 後にうまくつながるような転倒動作をデータベースから検索



- 動作データの選択と変形 [Arikan 05]
  - 衝撃・姿勢に応じたリアクション動作データを検索
  - 各部位に一定の速度を加えて逆運動学により姿勢を変形

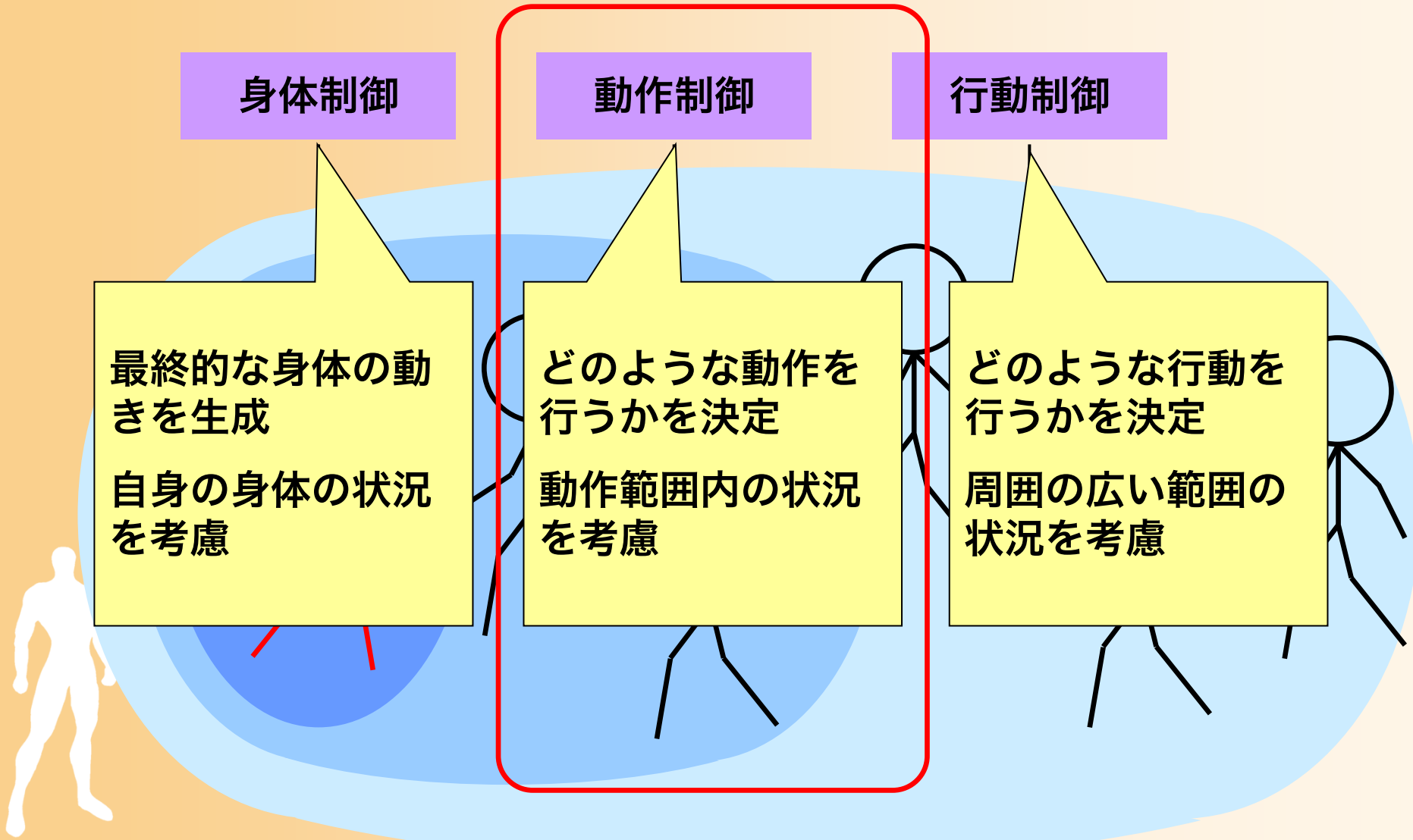
関連技術（ハイブリッド手法？）

- Endorphin, Euphoria (Natural Motion 社)
  - タイムライン上でビヘイビアを指定すると自動的に動作生成
    - さまざまなビヘイビアの制御モデルが用意されており、ビヘイビアの種類やタイミングを指定することで、自動的に動作が生成される（Endorphin）
    - ゲーム用のミドルウェアも存在（Euphoria）
    - 詳細な内部技術は公開されていない
    - モデルベースなので、動作を細かく変更したり、キャラクタの個性を出したりすることは難しい？

ロボット工学との関連

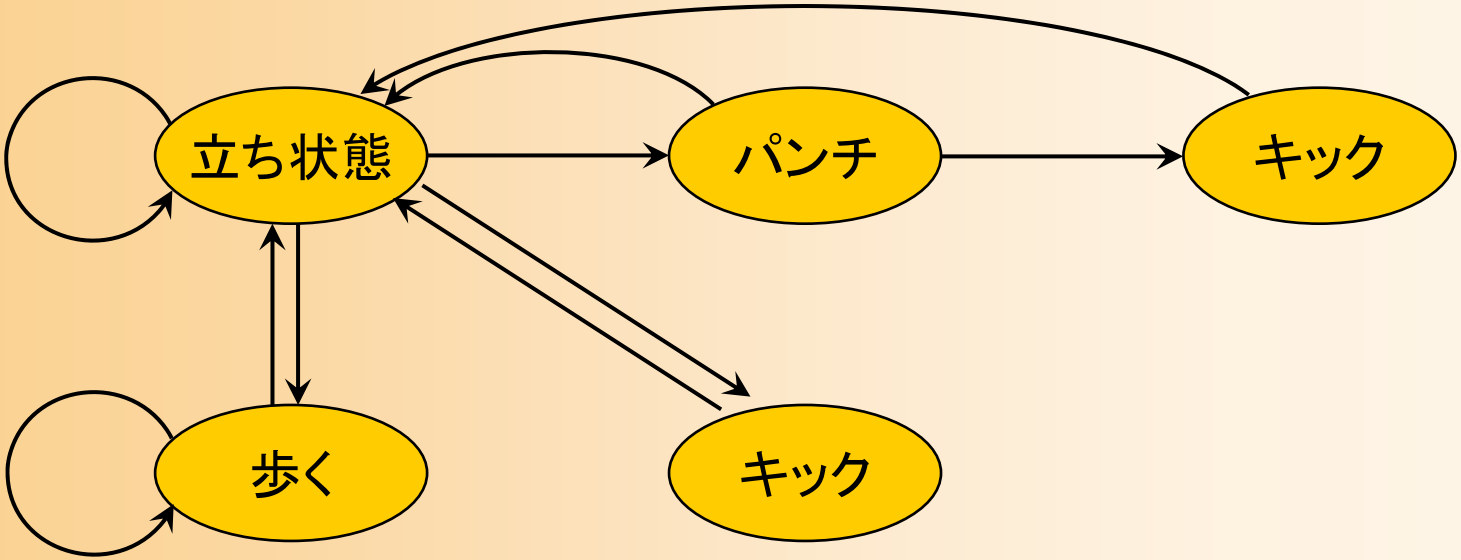
- ロボット制御とはやや目的や手段が異なる
  - ヒューマノイドロボット制御
    - 力学的に正確な制御が必要
    - 現在では、ごく単純な動作しか実現できていない
    - 人間らしい動作の再現はあまり考えられていない
    - 人間とはモータの機構も異なる
  - アニメーション
    - 力学的には厳密でなくても、人間らしい動きを実現
  - 動力学などの基礎的な理論はかなり共通
- 将来的にはヒューマノイドロボットの技術がゲームにも応用可能になる？

動作制御


身体制御
動作制御
行動制御
最終的な身体の動きを生成
自身の身体の状況を考慮
どのような動作を行うかを決定
動作範囲内の状況を考慮
どのような行動を行うかを決定
周囲の広い範囲の状況を考慮

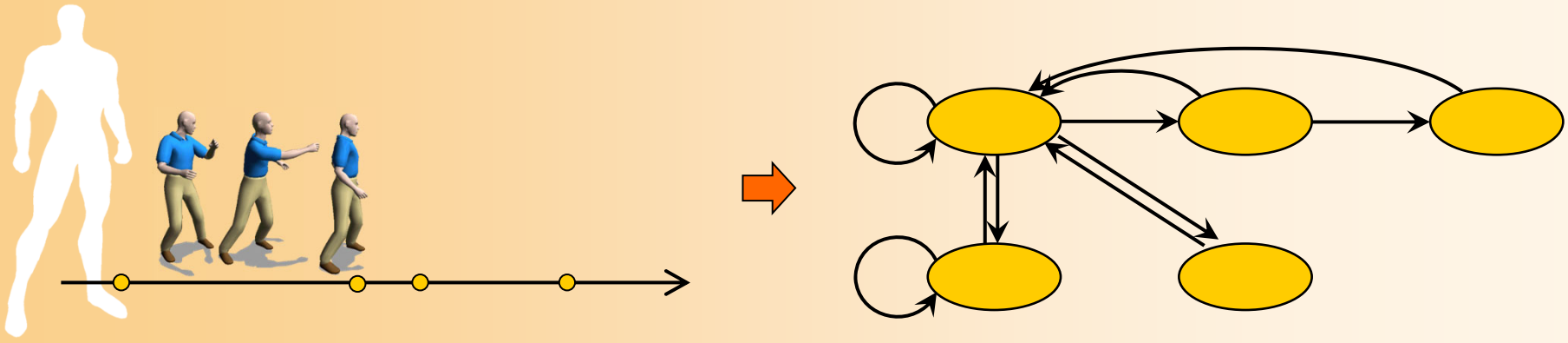
動作制御の課題

- 動作状態機械を用いた動作制御
  - 限られた種類の動作しか行うことができない
  - 動作状態機械の作成に手間がかかる
  - 状況に応じた適切な動作の選択が必要



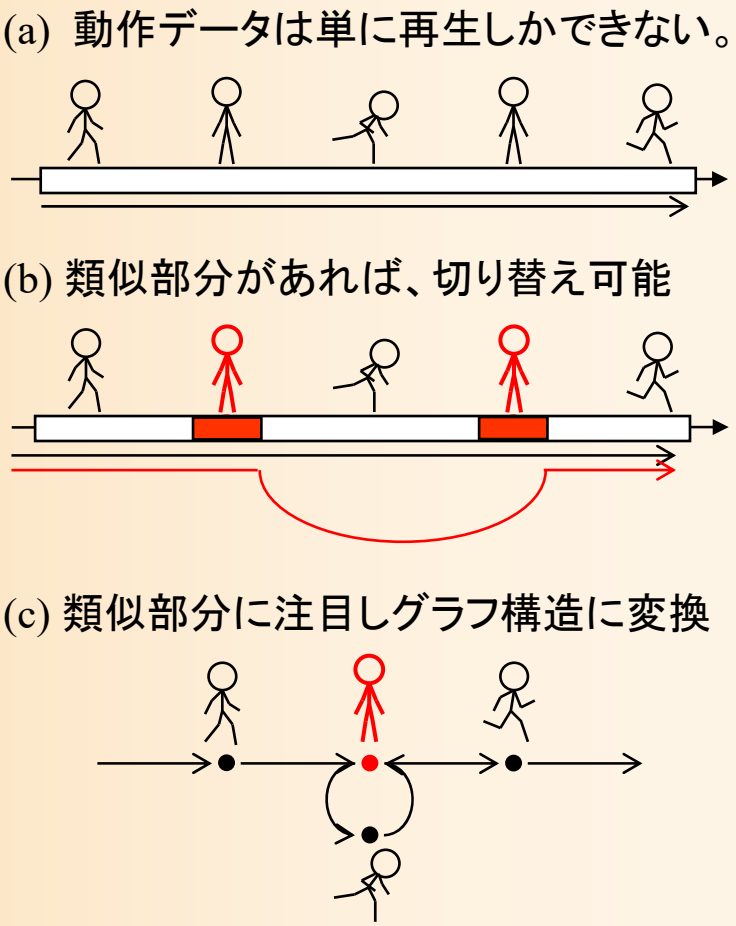
動作状態機械の自動作成

- 動作データを解析して、動作状態機械的なグラフ構造を自動的に作成する技術もある
  → モーショングラフ
  - 自動的に生成されたグラフ構造は整理されていないため、ゲームなどへの利用は難しい？
  - キャラクタを自律的に動かすような用途に有効
    - 群集アニメーションなど



モーショングラフ

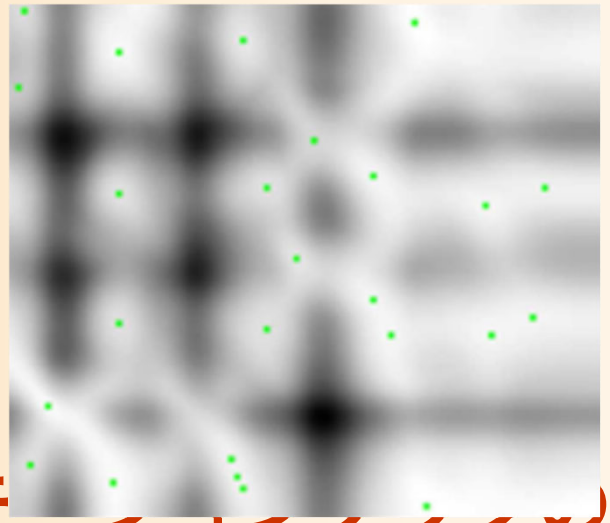
- モーショングラフ [Kovar 02]
  - モーションキャプチャデータを、有向グラフ構造に変換できる
  - ノードを順に遷移することで、連続的な動作を生成できる
    - 遷移のルールが重要



Lucas Kovar, Michael Gleicher, Frédéric H. Pighin, **Motion Graphs**, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2002)*, Vol. 21, Issue 3, pp. 473-482, *2002*.

モーショングラフの作成方法

- ２つの動作中の各フレーム同士の姿勢間の距離を計算（マッチウェブ）
  - 姿勢同士の距離の評価方法も重要
    - 例：主要部位同士の距離の和、ワンスキンモデルの頂点同士の距離の和、など



- マッチウェブ中の極小点をモーショングラフのノードとし、ノード間の動作をエッジとする

Kovar 02

姿勢間の距離の計算（1）（復習）

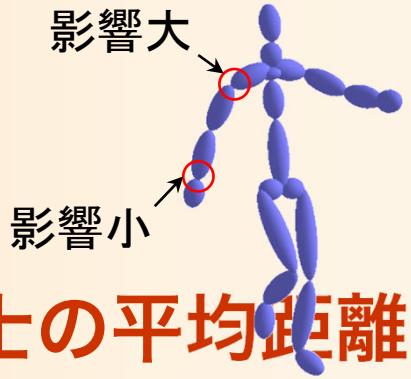
- 姿勢表現にもとづいて評価することは難しい
  - 全関節角度の差の平均値による評価

$$D = \frac{1}{n}\sum_{i}\left|\theta_i^1 - \theta_i^2\right|$$

n　関節数

θ_i^1　θ_i^2　各姿勢のｉ番目の関節の回転角度

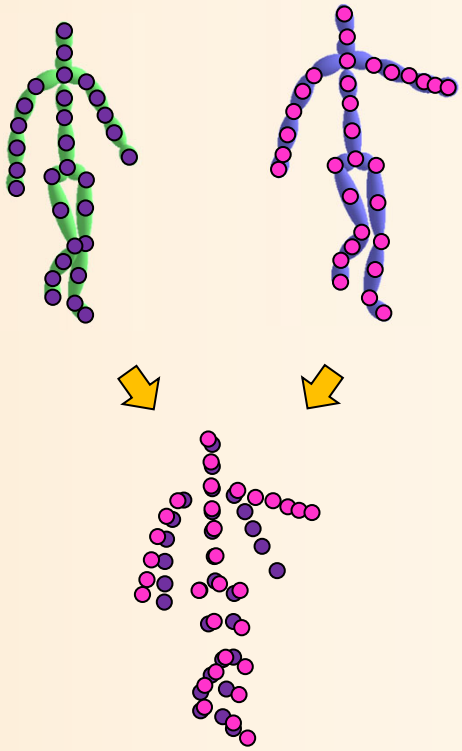
  - 関節によって、姿勢の見た目に与える影響には違いがあるため、このような計算方法は不適切
    - 関節の重み付けを行うことも難しい



- 姿勢を点群で表現して、その点同士の平均距離によって評価する方法が用いられる

姿勢間の距離の計算（2）（復習）

1. 姿勢を点群で表現
   - 関節・体節位置
   - 形状変形モデルの頂点、など
2. 位置・方向が一致するように一方の点群を移動・回転
   - ２次元平面上での正規分布を求めて、分散が一致するように移動・回転
3. 点同士の距離の平均を計算



$$D = \frac{1}{m}\sum_{i}\left|\mathbf{p}_i^1 - \mathbf{p}_i^2\right|$$

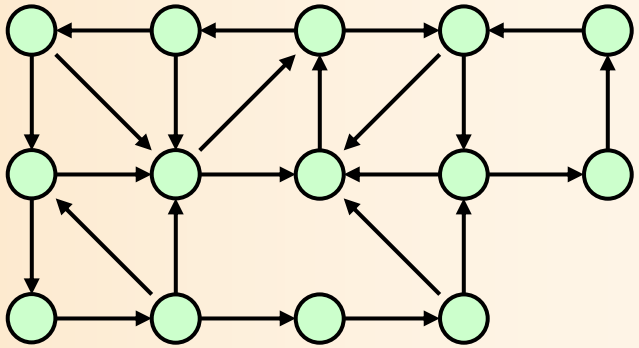
m　点の数

$\mathbf{p}_i^1$　$\mathbf{p}_i^2$　各姿勢の i 番目の点の座標

Lucas Kovar, Michael Gleicher, Frédéric H. Pighin, **Motion Graphs**, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2002)*, Vol. 21, Issue 3, pp. 473-482, *2002*.

モーショングラフによる動作生成

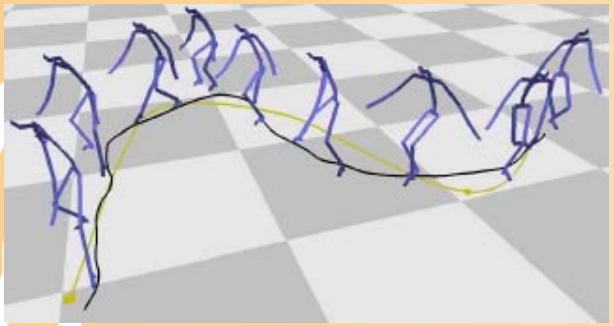
- データ構造
  - ノード・・・姿勢
  - エッジ・・・動作
    - 動作状態機械とは逆



- 動作生成
  - ノードを辿りながらエッジの動作を再生していくことで、動作を生成
    - 実際には、ノードの前後で、動作ブレンディングや、足を地面に固定するための逆運動学計算が必要
  - ノード遷移のためのルールが重要

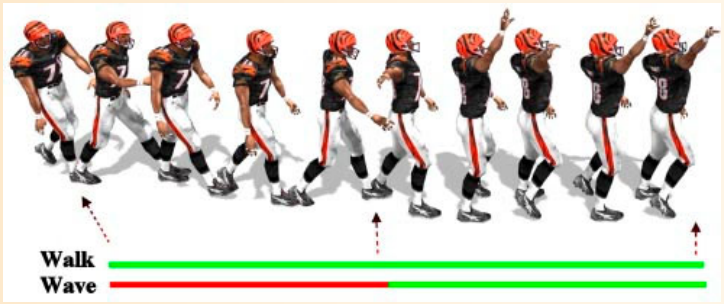
関連研究

- モーショングラフにおけるノード選択条件
  - 歩行軌道による条件 [Kovar 02]
  - 手先位置の条件 [Lee 05]
  - 動作の種類の条件 [Arikan 04]
  - 音楽に合わせた動作



[Kovar 02]

[Lee 04]

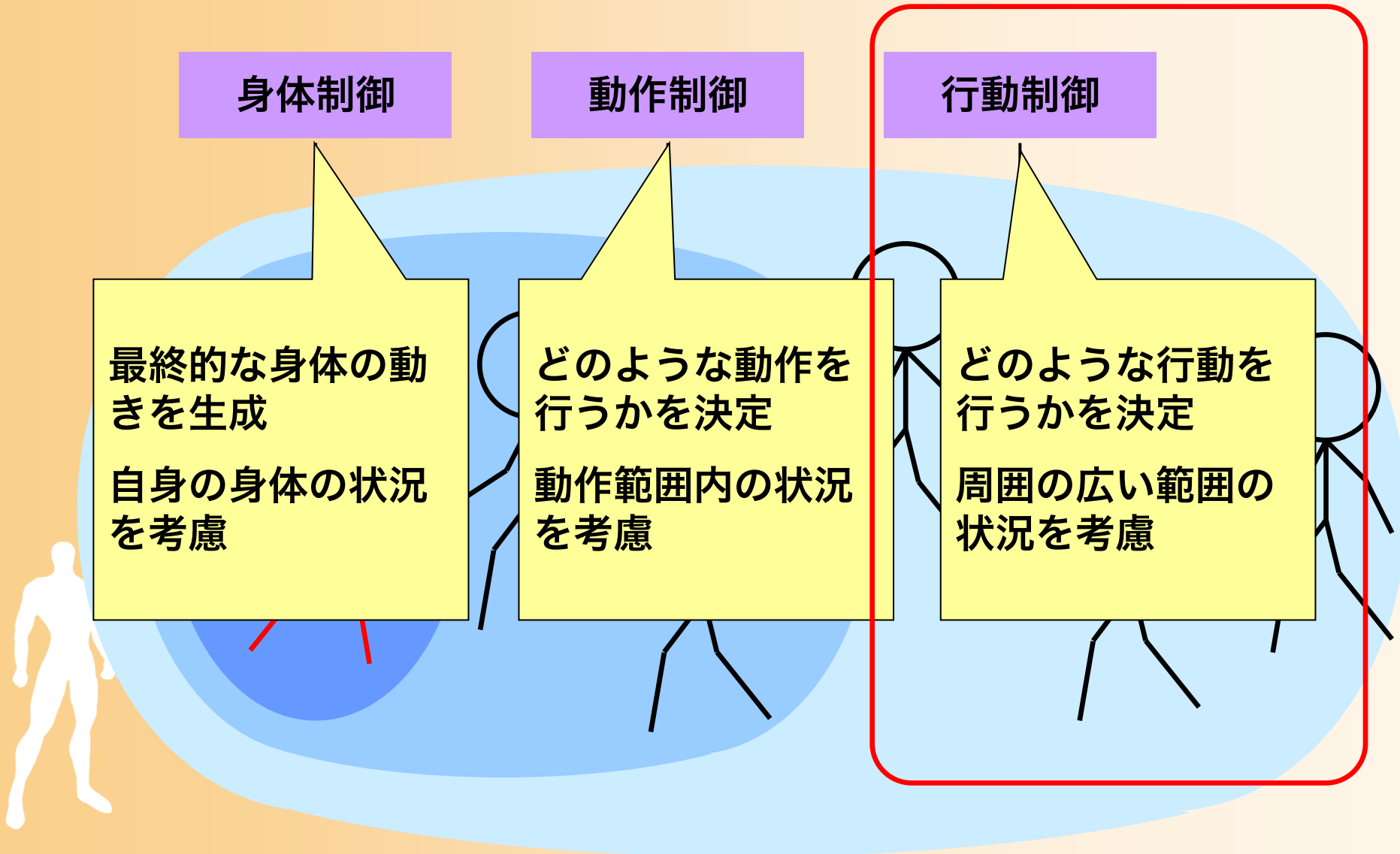


[Arikan 04]

モーショングラフの利点

- 動作データから自動的に構築できる
- 連続的な動作が無限に生成できる
  - 毎回異なる動作が生成される
  - 基本的には同じ動作の繰り返しだが、ノード数が十分にあれば、十分に自然に見える
- デメリット
  - 毎回異なる動作が生成される
    - ゲームによっては必ずしも良いとは限らない？
  - 適切な遷移ルールが必要（計算速度の問題）

行動制御


身体制御
動作制御
行動制御
最終的な身体の動きを生成
自身の身体の状況を考慮
どのような動作を行うかを決定
動作範囲内の状況を考慮
どのような行動を行うかを決定
周囲の広い範囲の状況を考慮

行動制御の課題

- 周囲の状況に応じた行動の決定が必要
- 用途に応じた、行動制御のモデルが必要

群集モデル

- 多数の人間の動きをシミュレートする技術
  - 映画やコンピュータゲームでの群衆シーンで利用
    - 個々のキャラクタの動作を作成するのは不可能
  - 一定のルールに従って各キャラクタを制御
    - 単純なルールでも、キャラクタ同士が相互作用し合うことで、ある程度リアルな動きが生成される

Lord of the Rings, 2002

Chronicles of NARNIA, 2005

NINETY-NINE NIGHTS, 2005

群集モデルの実現方法

- プログラムによる動作ルールの記述
  - if （条件） then （動作） の形式の動作ルールを多数、ゲームなどのプログラム内に直接記述
- GUI環境による高度な動作ルールの記述
  - 群衆シミュレーションソフトMassive が有名
  - 多数の映画で使用されている
  - 状態機械＋ファジィルール による条件を、GUI画面上で記述
  - かなりの知識や労力が必要

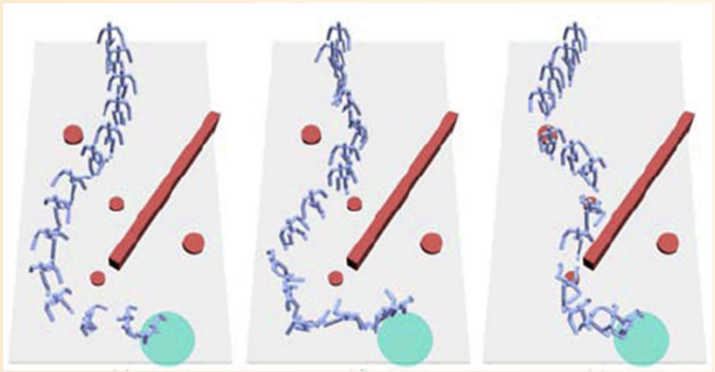
Massive

群衆シミュレーションの手法

- エージェントモデル
  - 各キャラクタ（エージェント）を点とみなして、一定のルールに従って点の移動を計算
    - social force model, flocking model など
- セルオートマトン
  - 空間を細かいグリッド（セル）に分けて、エージェントが存在するセルを、隣接するセルに移動させる
- 流体モデル
  - 流体力学にもとづき、密集した群衆の移動を計算

関連研究

- 行動ルールの自動学習
  - 逆強化学習 [Lee 2010]
    - 動作計画のための評価基準を自動学習



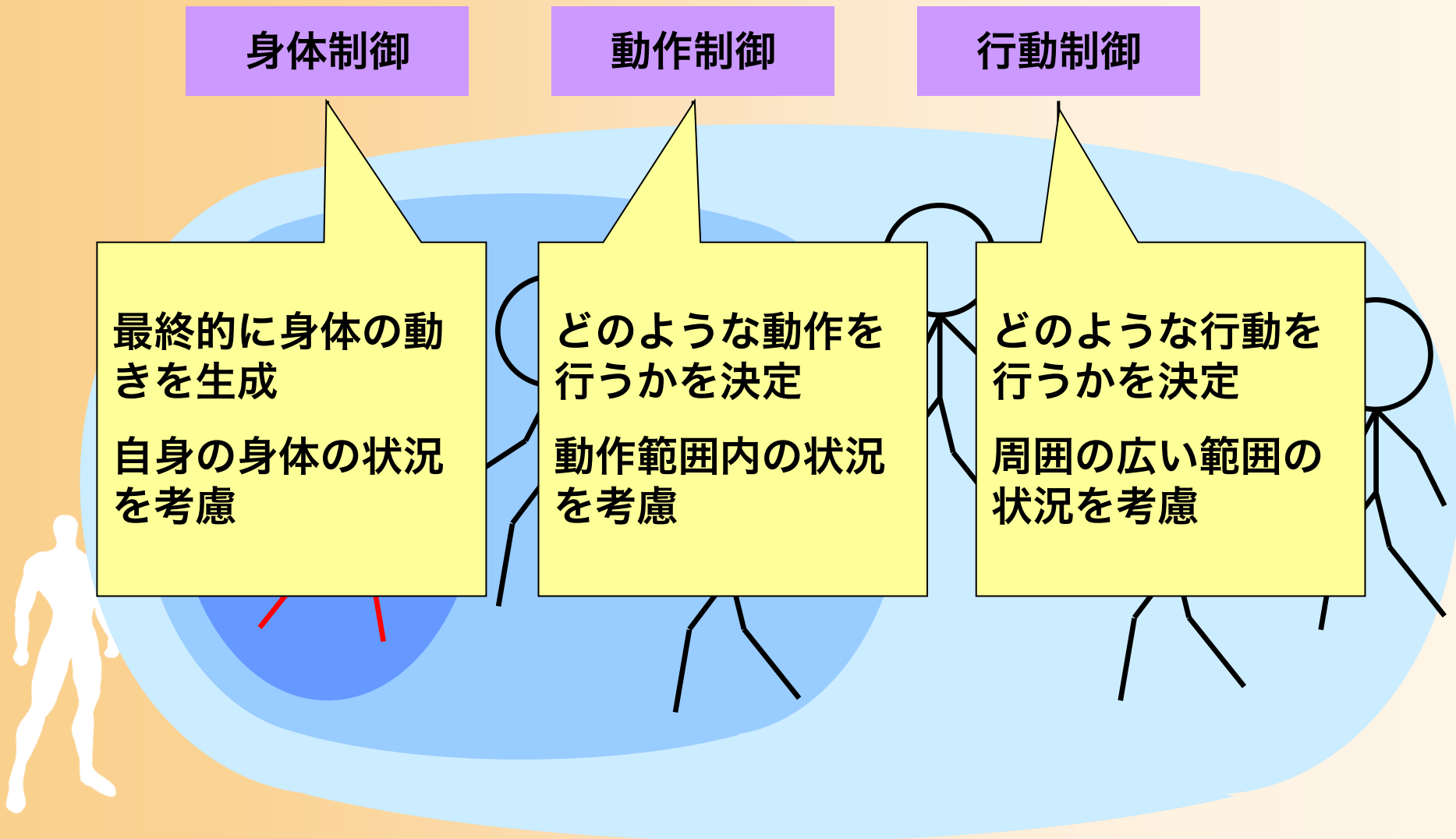
- 高度なルールベースの手法
  - 視界にもとづく動作決定 [Ondrej 2010]

デモプログラム

- エージェントモデルによる群衆シミュレーション
  - Social Force Model [Helbing 1995]
  - エージェントに働く複数の力を計算して加算
    - 目標位置・目標速度を満たすための推進力
    - 周囲のエージェントや壁・障害物と離れる反発力
  - エージェントに働く力から、加速度を計算し、速度・位置を更新（粒子シミュレーション）
  - エージェントを表す点の移動に歩行動作を当てはめて再生


18:05
Average arrival time: 15.37, Count 1
群衆シミュレーション
Crowd Simulation

自律動作制御のまとめ


身体制御
動作制御
行動制御
最終的に身体の動きを生成
自身の身体の状況を考慮
どのような動作を行うかを決定
動作範囲内の状況を考慮
どのような行動を行うかを決定
周囲の広い範囲の状況を考慮

まとめ

- 動作生成・制御
  - 動作状態機械
  - 動力学を考慮した動作生成
  - 歩行動作生成
- 深層学習による動作生成
- 自律動作制御
  - 身体制御
  - 動作制御
  - 行動制御

全体のまとめ

- 人体モデル（骨格・姿勢・動作）の表現
- 人体モデル・動作データの作成方法
- サンプルプログラム、動作再生
- 順運動学、人体形状変形モデル
- 姿勢補間、キーフレーム動作再生、動作補間
- 動作接続・遷移、動作変形
- 逆運動学、モーションキャプチャ
- 動作生成・制御

次回予告

- レンダリング関連技術
  - 影の描画（高度な描画技術）
  - イメージベースドレンダリング
  - BRDFによる質感の表現
  - HDRレンダリング