

動作データの知的処理を用いた シミュレーション・ミドルウェア

SIMULATION MIDDLEWARE USING INTELLIGENT MOTION DATA PROCESSING

栗山 繁 向井 智彦 入野 祐輔 按田 和幸 花村 真孝
Shigeru KURIYAMA Tomohiko MUKAI Yusuke IRINO Kazuyuki ANDA Masayoshi HANAMURA

豊橋技術科学大学 情報工学系 画像工学研究室 (〒441-8580 豊橋市 天伯町 雲雀ヶ丘 1-1
E-mail: kuriyama@ics.tut.ac.jp)

ABSTRACT. In this project, we have developed a middleware that can manage a database system of motion-capture data with intelligent motion transformation tools, by which a simulation system of digital human behaviors is easily customized. This system displays natural motions of digital humans through existing web browser from XML-based data of motions, behaviors, and environments. Such implementation can enhance common usability and flexible extensibility of this middleware using recent emerging technologies of Web3D.

1. 背景

工業製品等の人工物の評価に数値データ化された人間の動作や振舞を用いることにより、人間工学に基づく設計支援システムが構築される。しかしながら自然な人間の動作を数値データとして取り込む工程には、膨大な人的および金銭的コストを要する。したがって、資金の少ない業種や団体にもデジタルヒューマン技術を普及させるには、3次元計測装置で取得された動作のデータを互いに共有しそれらを効率よく柔軟に再利用する環境を提供する必要がある。

産業用 CAD 向けに開発された仮想人間シミュレータは、ロボットの動作制御を用いているので、人間として不自然な動作しか生成できず、体型や年齢からくる個人差も十分に反映できない。また、多くのシステムが大規模な CAD システムを用いて動作させるパッケージとして販売されているので、導入費用が高額なものになってしまう。また、動作データの入力インタフェースが不十分である等の問題点が指摘されている。CG 用のアニメーション編集システムは、モーションキャプチャのデータ編集サポート機能が充実してきたが、あくまで CG コンテンツの作成を目的に開発されており、行動規則のプログラムインタフェースが欠如しているので、行動のシミュレーション機構の構築には不向きである。一方、CG アニメーションの群集シミュレータは簡略な行動規則によってリアルな集団行動のシミュレーションが可能である。しかし、動作データの種類の扱いには制限があり、物体を操作する機能も十分ではない。

近年、Web 用のアニメーション・オーサリングツールが多く開発されており、独自データ形式とスクリプト言語により、データの軽量化と動作の高速化を実現している。これらは特に簡略な 2 次元アニメーション表示に威力を発揮する。しかしながら、動作データの取り込みに

柔軟性を欠き、特定のブラウザ環境に依存するという問題点がある。一方、3次元 CG データの標準的な記述言語である VRML に基づくブラウザも多く開発されており、その普及を促進させる団体 (Web3D コンソーシアム) も結成されて、各種の活動を続けている。最近では VRML の記述を XML で扱えるようにする X3D の標準化案が策定されている。しかし、VRML や X3D の記述方式だけでは人体アニメーションを柔軟に制御することはできないので、Java スクリプト等を用いて独自の制御機構を開発する必要がある。

2. 目的

本プロジェクトでは、計測した動作データ群のアーカイブと、その計測データに対して知的な処理を施し、利用する側の要求に合うカスタマイズを容易にするミドルウェア群を提供することを目的とする。ただし、適用事例は主として作業環境を評価するための行動シミュレーションを対象とする。具体的には、1) 計測データに含まれる動作の特徴を保ったまま運動学的な変換を施すツール、2) 単純な動作の計測データから連続的な動作を適応的に生成するツール、3) 生成された動作データを運動学的または動力学的に解析し、その諸量を算出するツール、および 4) 大量の計測データの分布や解析結果の特徴・パターンを、直観的に把握できるような可視化ツールを開発する。

前節の背景で述べた既存のシステムとの特徴との比較で述べると、CAD システムのように生産現場での使用を想定し、CG システムのようにモーションキャプチャデータの柔軟な扱いを可能とし、群集シミュレータのように簡略な行動制御を実現し、Web3D に準拠した汎用的な記述形式を開発することを目的とする。以上の項目を実現し、シミュレーション用のプロトタイプが安価で簡略に構築できる環境を提供する。

3. 関連研究

(1) 仮想人間の行動モデリング

AIの手法を用いた行動制御[1]に関する研究は、あらかじめ決められた動作パターンとロボットの動作制御を用いている。これらのシステムの多くは、モーションキャプチャデータの利用範囲が限定されている。また、テレビゲームの開発において、AIを用いた行動制御の記述方法[2]が提案されているが、上記の手法と同様に、動作データの扱いに関する機能が用意されていない。本プロジェクトは、これらのシステムが簡単な作業で自然な動作の生成機構を組み込めるようなミドルウェアの開発を目指す。

(2) モーションデータの編集技術

CGコンテンツの製作を主目的として開発されている技術[3]は、オフラインでの編集を前提にしており実時間処理には不向きな手法が多い。本プロジェクトは、実時間シミュレーションに適した動作の変形技術を導入する。また、モーションデータの最適な遷移計画の研究例[4,5]は、動作データの切り替えを状態遷移グラフの最適化問題として捉える。しかしながら、制御を最適化問題に置き換える必要があるため、柔軟な制御機構には不向きである。これらの手法は動作データの滑らかな遷移を自動的に計画する道具として有用である。しかし、大量の動作データが存在すれば簡略な変形で自然な遷移が得られるので、本プロジェクトではこれらの動作遷移の最適化手法は用いない。

(3) Web3D 標準化

近年、Webブラウザで用いられる3次元CGデータの形式の標準化が進んでいる[6]。仮想人間を表示する際に用いられる標準的な記述形式は、VHML(Virtual Human Markup Language)や、MPEG4のFAP(Facial Animation 変数)、BAP(Body Animation 変数)等が提案されているが、これらは主として表情、感情を表現する際のパラメータを規定するものであり、動作の緻密な表現には不向きである。また、Web3Dコンソーシアムのヒューマノイドアニメーショングループが仮想人間の表示用のタグセット(HumanoidAnimation.dtd)を提案しているが、その記述だけでは制御機構に柔軟性を欠く。

4. 開発目標

作業動作のシミュレーション環境を構築するミドルウェアを開発する際に、以下の目標を設定した。

- ◆ 普及している標準的な記述言語やAPIを採用し、その拡張性および可搬性を実現する。
- ◆ プログラムの知識がなくても簡略なシミュレーションシステムが構築できるようにする。
- ◆ ミドルウェアの拡張に対しては、できるだけ柔軟かつ簡略なインタフェースを提供する。
- ◆ 可能な限り計測した動作データの情報に基づいて動作を生成する。
- ◆ 特定のオペレーティングシステムやアプリケーションに依存しない動作環境を構築する。
- ◆ 現在市販されているPCの性能でも、対話的な実時間処理が可能な技術を採用する。

以上の目標を達成するため、既存のWeb3Dブラウザで表示が可能なシステムを、標準的な記述言語VRMLとXMLを用いて開発する。また、ミドルウェアはJavaのクラスライブラリとして実装し、一般に普及しているインタフェース言語(EAIやJAXP)を採用する。

以上の点を考慮して、本プロジェクトでXMLに基づく記述形式を導入する理由として、以下の点が挙げられる。

- ◆ XML文章の変換機構を用いることにより、データフォーマットの変換が容易となる。
- ◆ 記述の拡張が容易であり、RDF(Resource Definition Framework)によってセマンティックな情報を付与することも可能となる。
- ◆ JAXP(Java API for XML Processing)等の使用により、データ入出力用のパッケージを短期間で開発できる。
- ◆ XML用に開発された各種オーサリングツールが利用できる。
- ◆ 動作データと動作制御規則を共にXML文書化することにより、一貫性のあるデータベースが構築できる。

また、XMLで記述された文書からVRML文書を自動的に生成することにより、一般に普及しているVRMLブラウザでの表示を実現する。

5. システム構成

本プロジェクトで開発したシミュレーション用ミドルウェアの機能を概説する。

(1) 概要

本プロジェクトは、動作データベースとミドルウェア群を用いて、ユーザの入力条件の下に仮想人間の動作をシミュレーションする機能を開発する。その構成は以下の機構群に大別される。

- 動作のデータベースシステム
モーションキャプチャデータをXML形式化したデータベースの操作機構
- 動作のシミュレーション機構
仮想人間の動作制御規則から動作データを知的に処理する機能
- 動作の運動学的変形機構
仮想人間の手足の作業位置を修正して動作を自然に変形する機能
- 動作の動力学解析ツール
人体姿勢から動的可操作性を計算する機能とその可視化機能
- 動作データ群の可視化ツール
動作データ群の特徴を多次元データ情報の可視化技術を用いて表示する機能
- その他、付帯するツール
上記の機構・ツール開発に付帯するツール

ミドルウェア群はXMLとWeb3Dの技術を基盤として開発され、それらはView-Control-Model(VCM)の三層の設計パターンで構成する(図1参照)。すなわち、シミュレーションに使用するデータベースの層とそれを制御する層、および制御結果を可視化する層に大別され、各層が独立したパッケージとしても機能するように構成する。

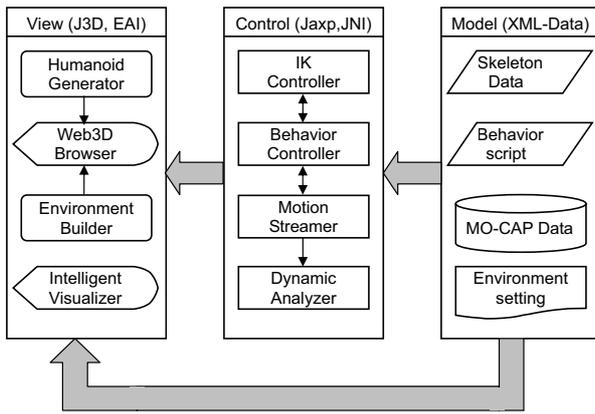


図1. システム構成

(2) 動作計測

17 台の赤外線カメラを用い、表 1 に示す日常的な作業動作を 10 名 (男 5 + 女 5) に対して計測した。各セッションにおいて複数の種類の動作を計測しているため、動作データを利用するには必要な部分を切り出して使用する。計測で取得した動作データは、総計約 5 時間に及んだ。データの形式は BVH と HTR[7] とし、骨格構造と関節の名前は W3C での標準形式 H-ANIM1.1 を参考にした。ただし、動作データの後処理と BVH、HTR への変換作業はリンクスデジワークスに外注した。BVH 形式から XML 形式へのデータ変換機構はプロジェクトの開発者で完成させた。

本システムは作業環境での行動シミュレーションを目的とするので、年齢層と体型の異なる複数の被験者に対して、日常的または作業的な動作に特化して動作計測を実施した。したがって、身振りや挨拶などの表現手段としての動作や、舞踏、格闘技、体操、およびスポーツ等の競技としての動作は計測の対象外とした。データの計測は、できるだけ多くの人数に対して多くの種類の動作を計測することが理想であるが、限られた開発期間と予算の範囲内で高品質な動作データを計測するには、対象人数か種類の数のいずれかを少なめに設定する必要があった。今回は、できるだけ多様な動作を用意することを最優先して、計測対象者の数を 10 名 (男性 5 名 + 女性 5 名) に設定した。この数は統計的な処理には十分な数とは言い難いが、典型的な年齢層と体型に対するデータを取得するには適当である。

動作種別	計測した動作内容
移動系	クロソイド曲線に沿った歩行と走行 (速度、歩幅、向き変更) 荷物を持った歩行(両手、片手、2人共同) 昇降動作(階段、斜面、梯子) 複数人間の衝突回避 障害物の回避(扉の開閉を含む)
操作系	手掴み(片手と両手で 12ヶ所、座位、立位) 荷物移動(片手と両手で 6ヶ所の台位置) 押し引き動作(3箇所)、長棒の操作 組立て作業の基本動作
休息系	座り(椅子2種)、もたれ、寝転び
その他	関節の曲げ限界測定(腕部、脚部、腰背骨)

表 1. 計測動作項目

(3) 動作データの XML 化とその表示

XML 形式で記述された動作データを、DOM(Document Object Model)のインタフェースを用いて読み込む機構を開発した。また、BVH データに含まれる人体骨格データ

部を XML 形式の文書に変換し、その文書情報から仮想人間の外観を描画するための VRML データを自動生成する機構を開発した。Web3D ブラウザでの仮想人間と環境物体の表示の制御には、HTML 文書から呼び出される Applet を Java によって制御する共通インタフェースである EAI(External Authoring Interface)を用いた。

(4) 動作のシミュレーション機構

行動シミュレーションのために仮想人間の動作を制御する規則を XML 文書の形式で記述し、その内容に基づいて動作データを知的に処理する機構を開発した。

行動を制御するために XML のタグとして定義される主要な要素を以下に列挙する。

- **Resource:** 動作データを含むファイルと、使用するフレーム範囲を指定する。
- **Human:** 人体骨格のデータファイル、初期行動、および初期位置を指定する。
- **Sensor:** 感知器に関するクラスを指定する。
- **Manipulation:** 物体操作に関するクラスを指定する。
- **Behavior:** 動作データの再生順を入れ子構造で記述し、仮想人間の行動様式をモジュール化する。
- **Motion:** 動作データの再生範囲と拘束条件に対する制御機構 (Controller) を指定する。
- **Controller:** 状態検出機構から送られてくるデータに基づく拘束条件から動作を自動変形する。

この XML 文書を解析するツールは JAXP (Java API for XML Processing) を用いて開発した。また、動作データを切り替える際の人体の中心位置と向きを補正、および関節運動の補間は、簡略な重み関数を用いた方法によって計算させる。

(5) 動作の運動学的変形機構

逆運動学を用いて動作データを変形する機構[8]をクラスライブラリとして開発し、シミュレーション制御部から呼び出せるように実装した。また、感知器からの情報を基に拘束条件を計算し、終端効果器の軌道を決定する機能を実装した。

(6) 動作の動力学解析ツール

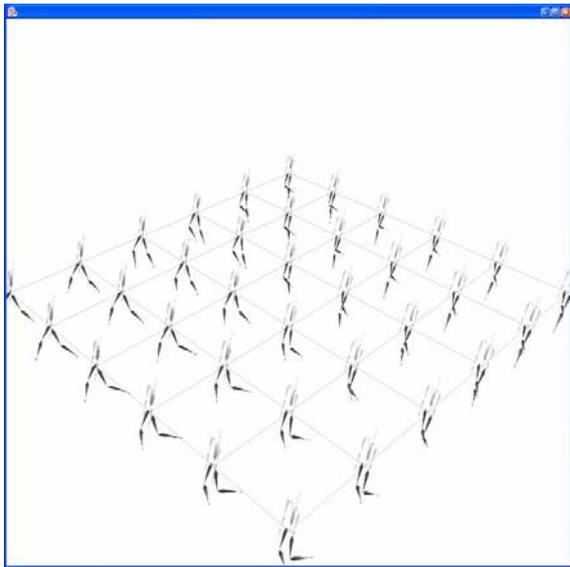
人体の姿勢から動力学的可操作性[9]を計算するモジュールを C++ 言語で開発し、Java ネイティブインタフェースにより動作解析ツールとしてシミュレーション制御部からの呼び出しを可能とした。

(7) 動作データ群の可視化ツール

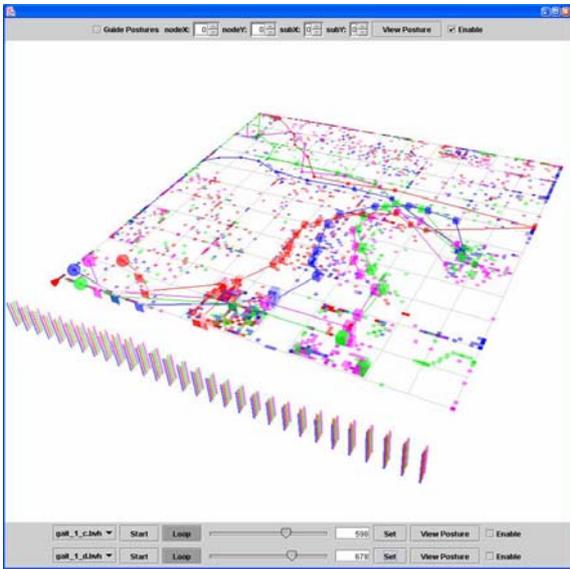
自己組織化マップ(Self-Organizing Maps) [10]を用いた動作データ群の可視化機構を実装した。実際に複数の歩行動作に関して多種の表示パターンを生成し、その有効性を検証した。図 2 に 5 名の被験者の歩行動作に対して自己組織化マップを計算した後、動作データを曲線軌道として表示したものを示す。

(8) その他ツール

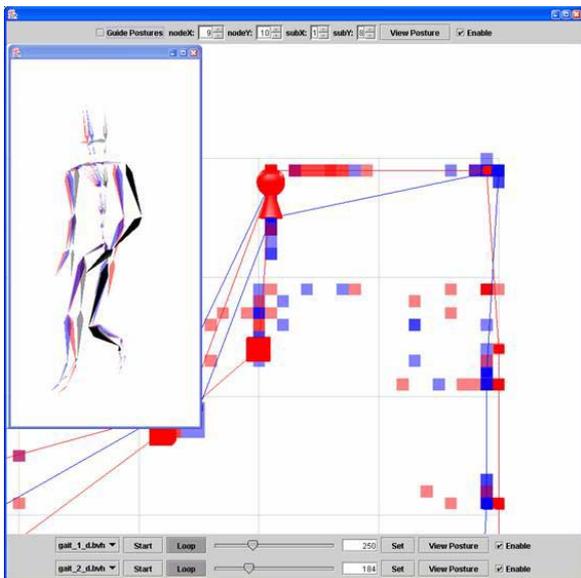
その他に、複数の障害物を回避するように、A*アルゴリズム[11]を用いて計画した移動パスに沿って自然歩行する動作を、データ群から自動抽出して最適に遷移させる機構を開発した。



(a) 自己組織化マップの形成



(b) 歩行曲線の表示



(c) 特定箇所での姿勢の相違の拡大表示

図 2. 被験者 5 名の自己組織化マップ上の歩行軌跡

6. 行動シミュレータの設計仕様

シミュレーション機構の実装に関して以下に詳説する。

(1) 基本構成

- シミュレータの主要構成要素は、仮想人間、リソースおよび行動規則とする。
- シミュレータはインタープリタ方式で行動を逐次的に呼び出し実行する。
- 仮想人間の行動規則とは、動作データを逐次呼び出す行動の集合とする。

(2) 行動および動作データの扱い

- 各行動は、指定した動作データの変形と再生を実行する。
- 行動規則は別名の呼び出しにより再利用できるようにする。
- 行動での動作は、リソースとして読み込まれる動作データのフレーム数の範囲を指定する。
- 動作データは、感知器から送られてくる情報に基づき制御器を用いてその値を自動的に変形する機構を有する。
- 動作データは、事前のデータの人体中心位置に関する状態から、中心位置の次の動作での状態を自動的に調節する。

(3) 感知器と操作器の構成

- 仮想人間は各々独立して仮想空間（すなわち、VRML で構成された表示対象の 3 次元空間）の情報を読み取る感知器を有し、その値から指定した状態を検出する機構を複数個保有する。
- 感知器の情報に基づき、次の行動の選択や物体を操作するものとする。
- 感知器、制御器、および物体操作機構はユーザによる拡張が可能なように基底クラスを設計する。
- 感知器と行動規則は仮想人間と独立の単体として記述させることにより、その機構のモジュール性と再利用性を高める。

(4) VRML データの操作

- 仮想環境内の物体は VRML データにより、任意に設定可能とする。
- 仮想環境内の物体データは複数の仮想人間によって共有される。
- 各物体に対する制御は物体を記述する VRML データに対して設けられる状態変数の値を介し、その状態変数によって複数の仮想人間に対する協調行動を実現する。
- ブラウザが用いる VRML データの値の EAI を介した更新は、一つの Java クラスを用いて集中的に処理させる。
- 仮想人間の動作の状態は独立して管理され、他の仮想人間からは VRML データの値を参照することによってのみ、その状態を検出させる。

ブラウザに対するデータの更新タイミングは集中的に管理し、表示シーン全体の同期を保つことにより、描画時のちらつきやずれを軽減させる。また、使用機器の性能に適応した表示速度を保つ。

7. シミュレーション表示例

図3に自動車の組立作業のシミュレーション結果を示す。実際の組立工場での作業者の動作データを、与えられた環境に合致するように変形・調整している。また、図4に複数の人間による荷移動に関する協調作業の動作をシミュレーションした結果を示す。ただし、図3と図4は ParallelGraphics 社が無償配布するブラウザを用いて描画したものである。

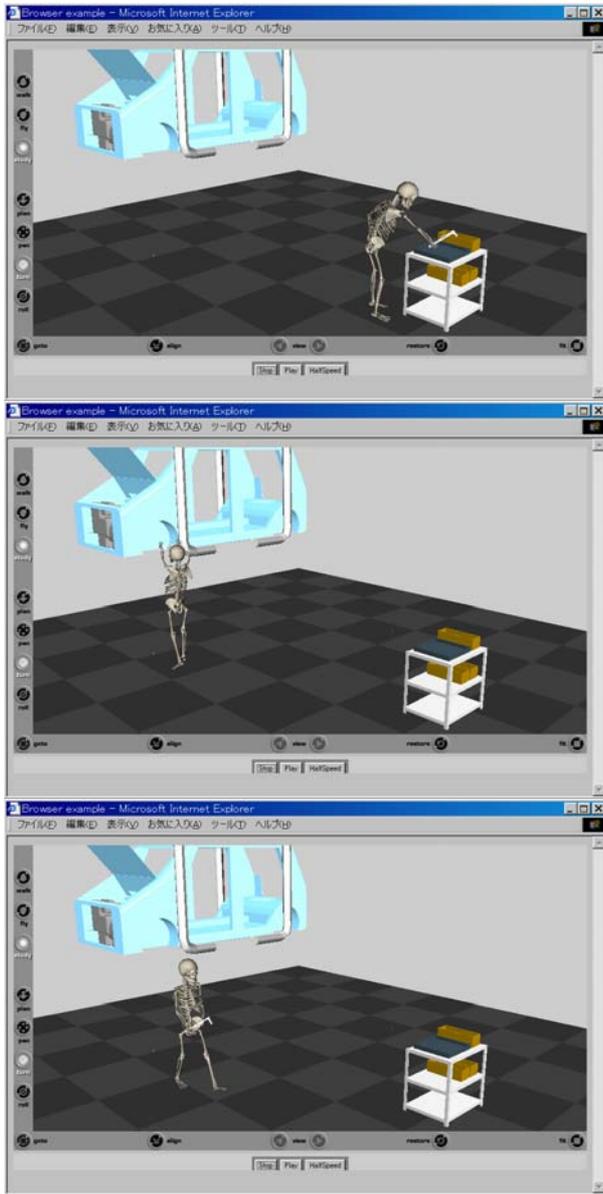


図3. 自動車の組立作業シミュレーション

8. まとめと今後の拡張

本プロジェクトでは、多くの被験者に対して計測した多種類の動作データから、高品質かつ大規模なデータベースシステムを構築し、自然な作業動作の自動生成機構をシミュレーション・ミドルウェアとして開発することができた。本システムは、商業店舗やオフィス等の工場以外の環境でのシミュレーションも視野に入れて開発されているが、今回構築した動作データベースをそのような環境に対してどれだけ有効に用いることができるかを今後検証していく。また、動作のシミュレーション機構に対して行動規則の文書例を多く作成し、その動作

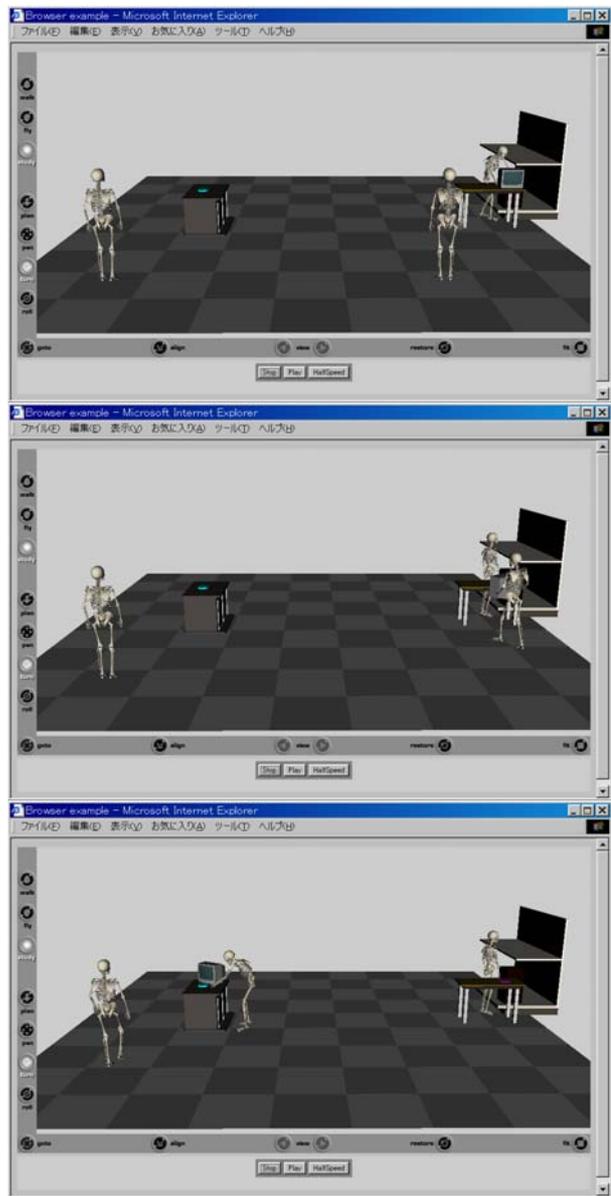


図4. 荷移動の協調作業シミュレーション

によりシステム全体の性能を評価する。さらに、動作制御に関する記述形式の妥当性を検証し、作業動作に特化したシミュレーション・ミドルウェアとしての有用性、再利用容易性、および拡張性などを評価していく。

今後を開発を継続していく項目の候補を以下に列挙する。

- データベースの規模と機能の継続的な改良と拡張
- 行動規則 XML 文書の自動生成
行動規則を自動的に生成する、より高次の記述形式または入力インタフェースに関して検討する。
- 独自の X3D ブラウザの開発
現時点では無償配布されている VRML ブラウザと、Java3D によって開発されたブラウザを併用しているが、実用的にはブラウザ環境を統合する。
- 動作データの XML 文書化の拡張
動作データベースには、より詳細な動作記録が可能な HTR 形式も保有しており、その形式を XML 文書に変換する機構を開発する。
- 異なるスケルトン構造と命名法への対応

ミドルウェアは特定の人体スケルトン構造と人体の部位の命名法 (H-Anim1.1) に準拠して開発されているので、人体構造や部位名が異なるデータを使用する際の、それらの自動変換機構を開発する。

- 仮想人間の概観データのカスタマイズ機能
仮想人間の概観を表す VRML の編集は現段階では特別な知識を必要とするので、基本的なデータセットの組み合わせで可能なカスタマイズ機能を開発する。
- 環境データの自動生成機能
仮想人間と同様に、環境もミドルウェアの要求する形式に準拠した VRML でデータ作成する必要がある
ので、その入力インタフェースを充実させる。また、
環境に対して物理的なシミュレーションを計算するた
めのミドルウェアを開発する。

9. 参加企業及び機関

企業名：スズキ㈱

契約件名：仮想人間モデルを使用した組立シミュレーション技術の開発

契約期間：平成14年度～15年度

10. 参考文献

- [1] N.I. Badler, C.A. Erignac, and Y. Liu : Virtual Humans for Validating Maintenance Procedures, Communications of the ACM, Vol.45, No.7,pp.57-63 (2002)
- [2] J. Funge, X. Tu, D. Terzopoulos : Cognitive Modeling: Knowledge, Reasoning and Planning for Intelligent Characters, Proceedings of SIGGRAPH 99. pp. 29-38 (1999)
- [3] M. Gleicher : Comparing Constraint-Based Motion Editing Methods, Graphical Models, Vol. 63, No.2, pp.107-134 (2001)
- [4] J. Lee, J. Chai, P. S. A. Reitsma, J. K. Hodgins, and N. S. Pollard : Interactive Control of Avatars Animated With Human Motion Data, ACM Trans. on Graph., 21 (3), pp.491-500 (2002)
- [5] L. Kovar, M. Gleicher, and F. Pighin : Motion Graphs, ACM Trans. on Graph., 21 (3), pp.473-482 (2002)
- [6] 脇田玲 : Web3D の最前線”,情報処理 42 巻 2 号,pp.167-172 (2001)
- [7] A. Menache : *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*, (2000)
- [8] 按田和幸, 栗山繁, 金子豊久 : 隠れ構造を用いた動作データの変形法”, 情処学グラフィクスとCAD研究報告, Vol.2002, No.77, pp.31-36 (2002)
- [9] T. Yoshikawa : Dynamic manipulability of robot manipulators, *The International Journal of Robotics Research* (1985)
- [10] T Kohnen : Self-organized formation of topologically correct feature maps, *Biological Cybernetics* 43, pp. 59-69 (1988)
- [11] M DeLoura : Game Programming Gems, pp.254-262 (2000)
- [12] 佐久間,栗山,金子 : 動作データに基づく衝突回避歩行の自動生成, 情報処理学会第65回全国大会講演論文集(4) pp.101-102 (2003)
- [13] 栗山, 向井, 入野, 按田, 花村 : 大規模な動作データに基づくシミュレーション・ミドルウェア, 情報処理学会第65回全国大会講演論文集(5) pp.419-422 (2003)