

松 山 大 学 論 集  
第 31 卷 第 6 号 抜 刷  
2 0 2 0 年 2 月 発 行

モーショキャプチャによる  
立体形状データのリアルタイム処理に関する研究

檀 裕 也

# モーションキャプチャによる 立体形状データのリアルタイム処理に関する研究

檀 裕 也

## 1 は じ め に

現在、ゲームやアニメーションなどマルチメディアコンテンツの映像表現において、3次元のコンピュータグラフィックス（3DCG）を用いた制作手法が普及している。檀（2017）<sup>[1]</sup>は、ニュートン力学に基づく数学および物理によるシミュレーションの計算モデルによって写実的な映像表現を実装する技術を確立した。その研究では無機物を対象にしたものであって、例えばバーチャルヒューマンプロジェクト<sup>[3]</sup>など、今後は3DCGによる人間や動物などの有機物の映像表現について研究・開発が進展していくものと見込まれる。檀（2016）<sup>[2]</sup>の中で取り組んだ研究において Microsoft 社の Kinect for Windows v2 によって人間の動作を RGB カメラや赤外線による深度センサー（デプスセンサー）などで認識し、ある一定の精度において、リアルタイムに立体形状および動作のデータを捉えることに成功している。そこで、より性能の高いモーションキャプチャとして知られている NOITOM 社の PERCEPTION NEURON を導入し、主に人間の動きを記録したモーションデータの取得とともに、リアルタイムの情報処理について着想した。

PERCEPTION NEURON は最大 32 個までのニューロンセンサーを人体に取り付けてリアルタイムでモーションデータを作成することが可能である。PERCEPTION NEURON によるネットワークシステムを構築し、取得したモーションデータの処理時に発生するノイズ除去などの整形および平滑化を通じ

て、自然な 3DCG モデルの動作を表現する技術について明らかにした。すでに、MAYA や 3ds MAX などの 3D モデリングソフトウェア、Oculus などの VR 制作ツール、Unity や Unreal Engine などのゲームエンジンとの互換性が確認されているため、ゲームまたはアニメーションなどマルチメディアコンテンツの制作を通じてモーションキャプチャの性能を明らかにした。

本研究で取り上げる PERCEPTION NEURON はゲームやアニメーションなどの映像作品を制作するために人体のモーションキャプチャに使えることを目的に開発されたものである。しかし、人間に限らず動物や植物など有機体の動作にも対応できる汎用性を持っており、医学や生物学、スポーツには限定されない活用も考えることができる。もちろん、キャラクターの動作を表現する映像作品などの制作といった商業利用にも応用可能である。例えば、人体のモーションデータをビッグデータとして蓄積することによって、関節の可動性といった情報を引き出すことも可能となるため、本研究において基礎的な理論と技術を確立することによって、非常に幅広い分野への波及効果が期待できる。

モーションキャプチャは産業分野で実用化されているデバイスであるが、その動作原理のベースとなる基礎理論に関する研究は多くない。ゲーム開発や映画製作に限らず、医学やスポーツ、生体力学といった汎用性という観点から多くの事例がある中で、数理的なアプローチから基礎理論を確立し、既存の情報処理技術によって一般化を目指したい。

なお、本研究は 2018 年度に交付を受けた松山大学特別研究助成による成果の一部である。その波及効果の一つとして、PERCEPTION NEURON を導入した 3DCG アニメーション映像作品の制作について 2018 年度卒業論文<sup>[4]</sup>にも取り組むことができた。

## 2 研究の方法

本研究において導入する NOITOM 社の PERCEPTION NEURON は 3 軸ジャイロスコープ、3 軸加速度計、および 3 軸磁力計で構成されている汎用のモー

ションキャプチャである。大型の専用スタジオがない環境であってもセンサーを通じてネットワーク越しにデータを出力することが可能であるため、レイテンシの実効値を評価するとともに、フレームレート 60 fps や分解能  $0.02^\circ$  といった性能（測定精度は、ロール  $1^\circ$ 、ピッチ  $1^\circ$ 、ヨー  $2^\circ$  を謳っている）を確認する。また、「組み込みデータ・フュージョン」、「人体ダイナミクス」、および「物理エンジン・アルゴリズム」といった同製品に組み込まれている機能を踏まえて、慣性計測装置（IMU）をベースにした小型ニューロンに対する磁場などの環境ノイズの堅牢性やキャリブレーションの効果について検討する。

出力されるデータ形式（.bvh 形式、.fbx 形式、および .c3d 形式）に応じて、Motion Builder, Maya, 3ds MAX, Oculus, UNiGiNe, C/C++, REALLUSION, Unity, および Unreal Engine といった対応ソフトウェアとの互換性を確認し、そのうち一つを選択して 3DCG アニメーション映像のコンテンツを制作する。また、リアルタイム・モーションデータ・ストリーミングの機能を使って、PERCEPTION NEURON による遠隔操作を通じて画面上の 3DCG モデルを動かすプログラムを開発した。

本研究に関連するマルチメディアコンテンツの事例は、インターネット上の動画共有サービスを通じて多くのものが公開されている。その一方で、学術的な研究の成果は乏しいという背景がある。現時点で PERCEPTION NEURON に関する研究の成果は多くない。Kim ら（2019）<sup>[5]</sup> は外科医研修生の訓練用に行われている甲状腺切除手術シミュレーションに PERCEPTION NEURON を適用し、体の動きとシミュレーションスコアの関係性を評価した。PERCEPTION NEURON は指先の動きまで情報を取得できることから、このような取り組みの有効性は医学分野に貢献している。Sers ら（2020）<sup>[6]</sup> は、首・胸部・肩の上半身で行われる機能的運動の 3 次元解析に PERCEPTION NEURON を用いて、可動域（RoM）の推定値に対する精度を評価した。その結果、系統誤差（バイアス）はほぼすべての部位で最大  $4.5^\circ$  の精度であることを明らかにし、上

半身運動に関する PERCEPTION NEURON の有効性を示した。このレベルの測定精度は、外科医の姿勢を客観的に測定するといった医学的な目的の用途に適していると考えられる。

2018年2月に東映株式会社デジタルセンターを訪問した際、ツークン研究所において光学式モーションキャプチャシステムを採用したスタジオを視察した。その際、スタジオの技術を見学し、バーチャルヒューマンプロジェクトのユニット TERUYUKA を組む石川夫妻に人体モデリングおよびモーションの制作について指導を受けた。



図1. ゼミ旅行で訪問した3DCGアニメーション制作スタジオ

### 3 PERCEPTION NEURON 2.0

2018年2月に発表された PERCEPTION NEURON 2.0 は、ジャイロ스코プ、加速度計、および磁力計を備えた慣性計測装置 (IMU) が内蔵された NEURON (ニューロン) と呼ばれる小型センサー (図2) によって構成されている。ジャイロ스코プとは、角運動量の変化を検出するセンサーである。ニューロンの慣性モーメントおよび角速度の積で表される角運動量の時間に関する2階微分は力のモーメントに等しい。力のモーメントが存在しない場合における角運動量保存の法則に基づき、角運動量に変化が生じたとすれば、そのニューロンが回転したことを示している。3次元空間における回転は、x軸、y軸、およびz軸の方向の組み合わせによって表現することができるため、ジャイロ스코プの原理によってニューロンの回転に関する情報を知ることができる。また、加速度計は、ニュートンの運動方程式 (運動の第二法則) に基づき加速度を求めるセンサーである。地球上では、鉛直方向かつ地球中心の向きに重力加速度が存在することが知られている。回転を伴わないニューロンの並進運動における加速度を求めることは、ニューロンの重心にかかる力を探る



図2. PERCEPTION NEURON 2.0 の小型センサー「ニューロン」

ことに他ならない。ニューロンの加速度は、人体の筋肉の作用であると考えられる。さらに、磁力計とは、微弱な地球磁場を検出できるセンサーである。地球磁場の向きと比較することによって、ニューロンの向きを知ることができる。なお、公式の情報によると、磁気干渉によって誤差が生じるおそれのあることから、磁気干渉の少ない場所で使用するよう注意を促されている。これら3つのセンサーを合わせた慣性計測装置（IMU）は、回転運動および並進運動とともに、ニューロンの向きを知る手掛かりを与えてくれる。

人体の関節など可動部分にニューロンを装着することで、体全体の動き、足や腕の動き、そして指先の動きまでリアルタイムに取得することが可能である。そこで、関節の運動状態について適切に情報を取得できるように、グローブ（図3）やバンド（図4）にニューロンを装着し、人体に固定することができる。グローブには最大で7個のニューロンを装着することが可能で、指先の動きまで詳細なデータを入力させることは他のデバイスには見られない典型的な特徴である。

最大31個のニューロンをメタリックケーブルの有線通信によって体中央部のハブに統合すると、ニューロンの運動状態に関する状態をリアルタイムに計測することができる。これらのデータは、ハブを通して、有線モード（USBケーブル）または無線モード（Wi-Fi）を経由してパソコンに接続される。ファームウェアのアップデートにて、内蔵 microSD スロットによるオンボード記録も可能<sup>1)</sup>である。データ伝送の遅延時間（ハードウェアレイテンシー）は、有線モードで最大8ミリ秒、無線モードで最大23ミリ秒である。さらに、CPU、グラフィックカード、ビデオ出力などの他の要因によって、さらに遅延が生じることもある。なお、有線モードのときにはUSBで給電し、無線モードのときにはモバイルバッテリーを使用することで給電することになる。

PERCEPTION NEURON 2.0の汎用性は、研究者だけでなく、ゲーム開発者

---

1) ただし、2019年9月末現在、公式による発表はない。



図 3. 小型センサー「ニューロン」を指先に取り付けるグローブ



図 4. 小型センサー「ニューロン」を取り付けるバンド

や VR 開発者など、あらゆるニーズに対応できるように設計された哲学にある。BVH ストリーミング、FBX 出力、および Raw データ出力にも対応していることは、そのことを如実に物語っている。



## 4 コンテンツ開発

3DCG アニメーション映像に登場するメインキャラクター DANYUYA は Blender による 3D モデリングによって生成された。アクセサリと合わせて約 45,000 点の頂点数に抑え、MSI GTX 1080 ARMOR を併用したレンダリングによってアニメーション化した。舞台となる樋又キャンパスの 3D モデリングの制作にも工夫が見られるが、詳細については 2018 年度卒業論文<sup>[4]</sup>に委ねる。

PERCEPTION NEURON には、専用のソフトウェア「Axis Neuron」が付属し、各ニューロンから集約されたデータはハブから USB または Wi-Fi を経由して「Axis Neuron」に送られる。「Axis Neuron」内の基本ボーンは得られたデータからリアルタイムにキャラクターの動きを表示することができる。



図 5. PERCEPTION NEURON を装着した (左)  
Axis Neuron を使ってモーションデータを取得している (右)

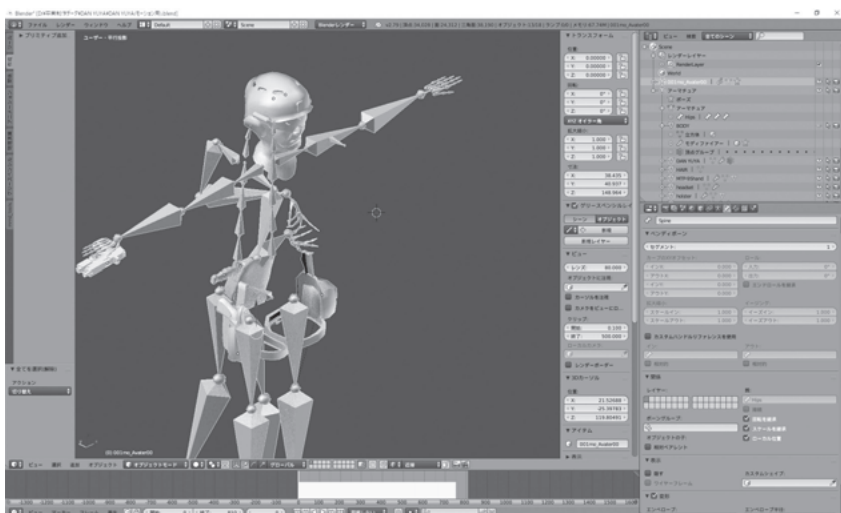


図 6. Blender によるボーン設定

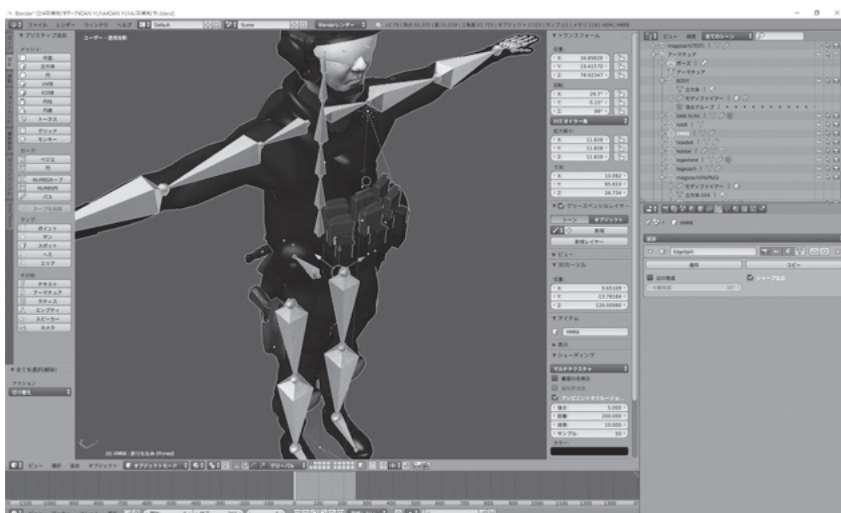


図 7. Blender によるボーンとキャラクター 3D モデルのリンク



図 8. Unreal Engine による編集

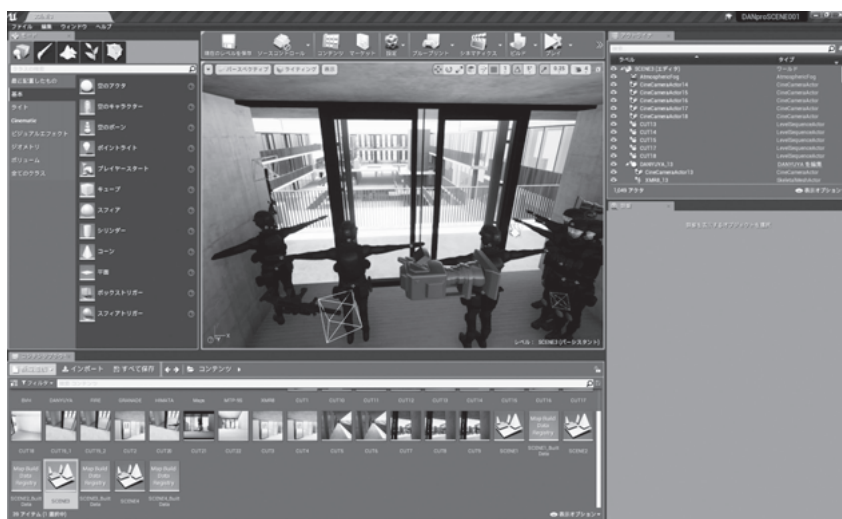


図 9. Unreal Engine によるシーンの制作



図 10. 完成した 3DCG アニメーション作品（その 1）

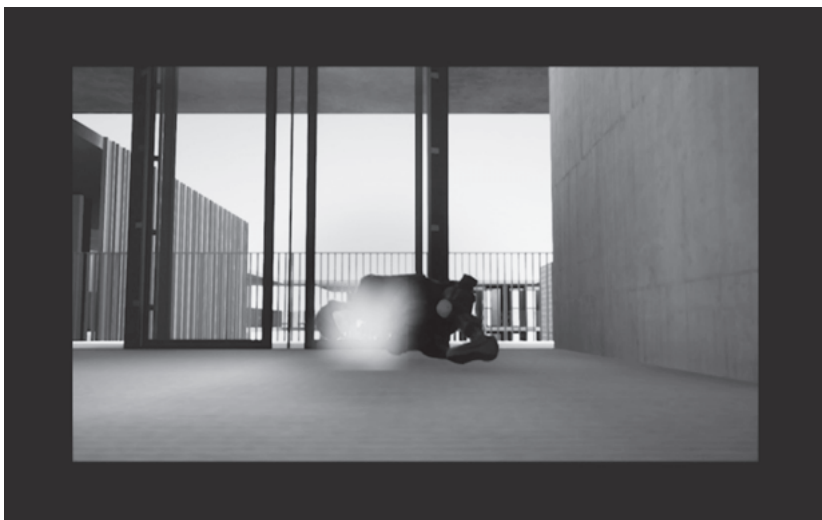


図 11. 完成した 3DCG アニメーション作品（その 2）

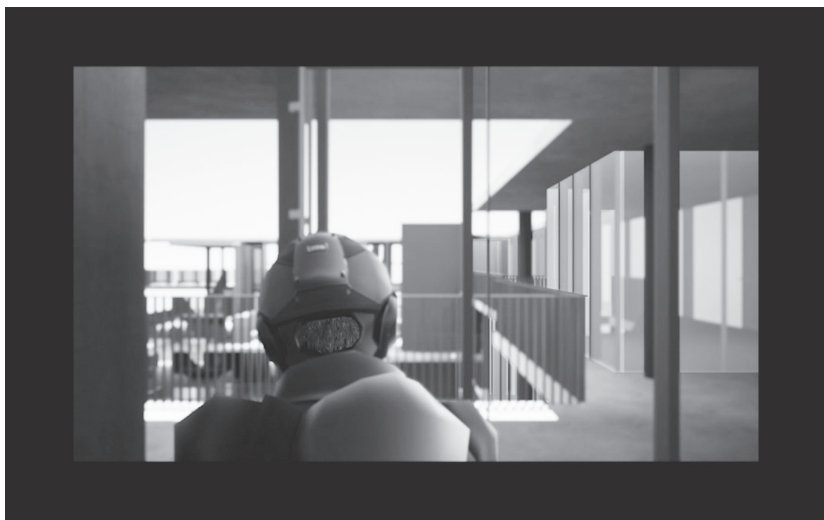


図 12. 完成した 3DCG アニメーション作品（その 3）

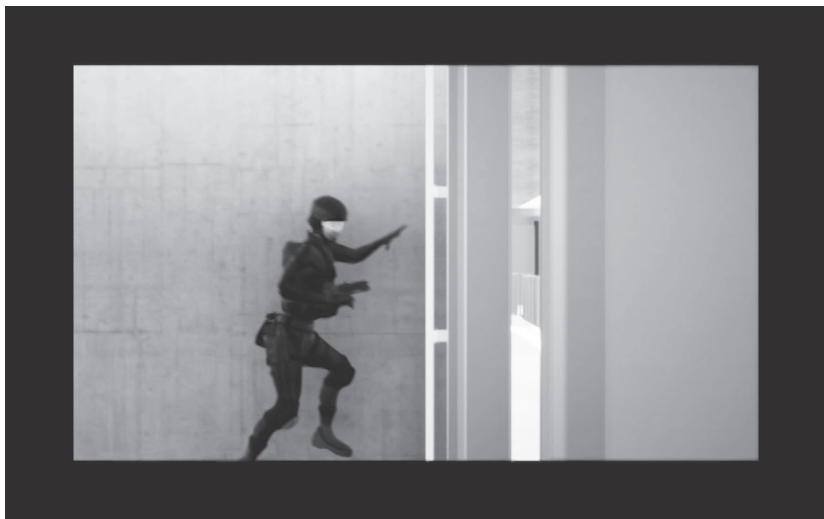


図 13. 完成した 3DCG アニメーション作品（その 4）



図 14. 完成した 3DCG アニメーション作品（その 5）

## 5 考 察

PERCEPTION NEURON 2.0 の各ニューロンから「Axis Neuron」に伝送された信号は、モーションデータ（.bvh 形式）として出力される。BVH 形式とは、米 Biovision 社によるモーションキャプチャデータのファイル形式であって、3D モデルの階層構造（リスト 1）およびモーションデータ（リスト 2）の内容をテキスト形式で収録したものである。

3D モデルの階層構造は、中括弧によるブロックで表現され、オフセット情報とともに、ボーンの端点に当たる関節の位置情報（Xposition, Yposition, Zposition）および回転情報（Xrotation, Yrotation, Zrotation）を定義する。なお、ロール、ピッチ、ヨーの角度は弧度法ではなく度数法によって表示する。

モーションデータは、総フレーム数（Frames）と 1 フレームあたりの時間（Frame Time）を定義した上で、1 行ごとに各フレームが対応し、位置情報お

## リスト1. 3Dモデルの階層構造（抜粋）

---

```
HIERARCHY
ROOT Hips
{
  OFFSET 0.000 83.380 0.000
  CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Yrotation Xrotation Zrotation
  JOINT RightUpLeg
  {
    OFFSET -10.300 -1.590 0.000
    CHANNELS 3 Yrotation Xrotation Zrotation
    JOINT RightLeg
    {
      OFFSET 0.000 -33.000 0.000
      CHANNELS 3 Yrotation Xrotation Zrotation
      JOINT RightFoot
      {
        OFFSET 0.000 -41.100 0.000
        CHANNELS 3 Yrotation Xrotation Zrotation
        End Site
        {
          OFFSET 0.000 -7.690 17.500
        }
      }
    }
  }
  JOINT LeftUpLeg
  {
    OFFSET 10.300 -1.590 0.000
    CHANNELS 3 Yrotation Xrotation Zrotation
    JOINT LeftLeg
    {
      OFFSET 0.000 -33.000 0.000
      CHANNELS 3 Yrotation Xrotation Zrotation
      JOINT LeftFoot
      {
        OFFSET 0.000 -41.100 0.000
        CHANNELS 3 Yrotation Xrotation Zrotation
        End Site
        {
          OFFSET 0.000 -7.690 17.500
        }
      }
    }
  }
}
```

---

(以下、省略)

## リスト 2. モーションデータ (抜粋)

---

### MOTION

Frames : 750

Frame Time : 0.017

```
-13.744098 88.902977 -5.187731 72.434990 3.241706 0.997175 -5.322402
-14.305366 2.776094 8.200798 14.539762 -6.609285 8.738028 -0.402143
7.566088 -3.389379 -3.040547 -0.215133 -7.633116 14.532354 8.762513
-19.851202 -28.208168 -21.903286 10.856318 -0.915789 1.597569
2.721978 -0.273432 0.412306 4.478116 -0.531808 0.675534 -0.897366
0.971285 -0.273488 -0.908764 0.958277 -0.272816 -18.467136 13.556585
-7.192011 -11.165298 -9.531359 2.405203 18.788393 20.203894 93.552643
-55.106735 -64.490196 141.387344 26.070969 -18.685148 -25.557907
23.757450 -0.000000 49.531654 1.518004 -0.000000 -0.381662 6.293320
-0.000000 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 15.000000 -0.000000
4.609255 0.000000 -0.000000 31.911703 0.000000 -0.000000 15.955852
0.000000 -0.000000 0.000000 0.000000 -0.000000 29.761930 0.000000
-0.000000 29.761930 0.000000 -0.000000 29.761930 0.000000 -0.000000
0.000000 -15.000000 -0.000000 40.286083 0.000000 -0.000000 40.286083
0.000000 -0.000000 40.286083 0.000000 -0.000000 0.000000 -25.000000
-0.000000 36.885933 0.000000 -0.000000 36.885933 0.000000 -0.000000
36.885933 -12.934431 -3.344523 1.351764 -30.935272 10.342656
-79.985489 -99.219208 23.026384 6.022393 6.863240 37.315357
-55.948463 -31.489256 -0.000000 -41.250870 21.639465 -0.000000
1.165384 -3.360463 -0.000000 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000
-15.000000 -0.000000 11.956347 0.000000 -0.000000 6.289635 0.000000
-0.000000 3.144818 0.000000 -0.000000 0.000000 0.000000 -0.000000
-34.386547 0.000000 -0.000000 -34.386547 0.000000 -0.000000
-34.386547 0.000000 -0.000000 0.000000 15.000000 -0.000000 -39.046471
0.000000 -0.000000 -39.046471 0.000000 -0.000000 -39.046471 0.000000
-0.000000 0.000000 25.000000 -0.000000 -37.608372 0.000000 -0.000000
-37.608372 0.000000 -0.000000 -37.608372
```

(以下, 省略)

---

よび回転情報を記録している。なお, 1 フレームあたりの時間の単位は秒で, Frame Time=0.017 のとき, 毎秒 60 フレーム (fps) に対応した 0.017 秒 (17 ミリ秒) が記述されている。

PERCEPTION NEURON 2.0 は光学式モーションキャプチャとは異なり, 遮光によるノイズの発生が起きないことから, 磁場の影響がない限り, これらのモーションデータのノイズ平準化などフィルタ処理を行うことなくリアルタイ



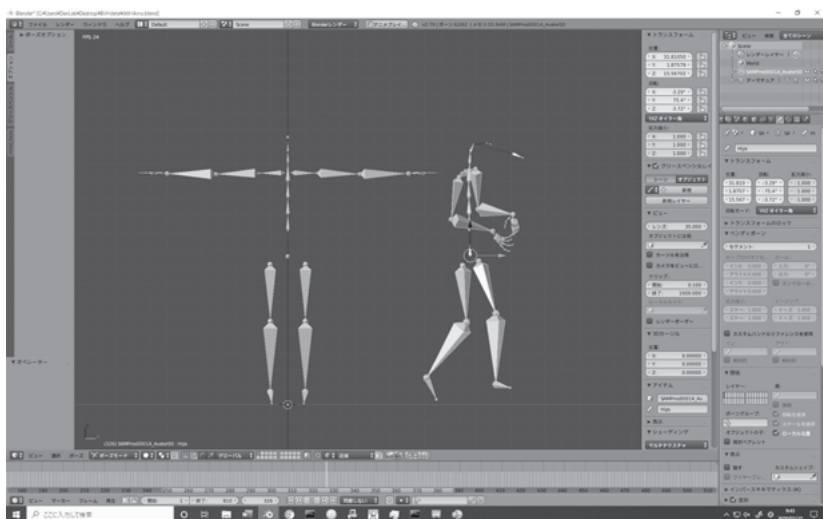


図 15. モーションデータを 3D モデルに適用したアニメーション

ムのモーションキャプチャにそのまま使うことができた。実際の物理的なノイズは、「Axis Neuron」のソフトウェア側で処理されていると考えられる。

最大 32 個のニューロンから位置情報および回転情報（ $6 \times 64$  ビット）を 60 fps の速度で取得する場合、通信遅延を度外視すると、リアルタイムで 720 kbps の通信速度が達成できていればよい。したがって、PERCEPTION NEURON 2.0 はセンサーとして動作するニューロンの性能向上が最も大きな課題であることが理解できる。

## 6 ま と め

本稿は、2018 年度に交付を受けた松山大学特別研究助成「モーションキャプチャによる立体形状データのリアルタイム処理に関する研究」によって、3DCG アニメーション映像作品を制作する過程で PERCEPTION NEURON の性能を評価した。

PERCEPTION NEURON から入力されたモーションデータを使って、バーチャルヒューマン DANYUYA の 3D モデルを動かし、ステージデータと合わせてフル 3DCG によるアニメーション映像に仕上げた。なお、モーションデータの生成場所は、樋又キャンパス 4 階（H4A～H4C の 3 教室およびその周辺）である。

モーションデータの記録時には、最大 23 ミリ秒と公表されていた無線モードの遅延時間（ハードウェアレイテンシー）であったが、半径およそ 10 メートルの撮影範囲において、450 Mbps の通信速度の無線 LAN ルータ（NEC Aterm, WR9300N）を使っただとしても数十秒程度のインターバルではデータ伝送の遅れから発生するモーションのずれは影響が大きかった。すなわち、手術シミュレーションのような場面では問題なくても、例えばスポーツなどある一定の面積のある場所で位置を変えながら動くような環境でのモーションデータの測定には向いていないということが示唆される。実際の撮影では、1 シーンあたり記録時間を 10 秒程度に抑え、最大 8 ミリ秒の遅延時間（ハードウェアレイテンシー）で測定できる優先モードに変更したため、USB ケーブルの長さも制約条件の一つになる。

最後に、本研究に取り組んで得られた最新の成果は、SIGGRAPH を含むトップレベルの国際会議に論文が採択される水準まで研究のクオリティを高めた。そして、2018 年度「卒業論文」におけるハイエンド CG 表現に関する取り組みの中で、檀ゼミ 9 期生の学生たちに感謝するとともに、そのときのアニメーション CG 作品の制作を通じて見出された課題を解決していくことによって本稿が完成に至ることになったことを付記して締めくくる。

## 参 考 文 献

- [1] 檀裕也「WebGL による線香花火の CG シミュレーション」松山大学論集, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 147-179. (2017)
- [2] 檀裕也「ゲーム開発を題材とする情報教育カリキュラムの検討」松山大学論集, 第 28 巻, 第 5 号, pp. 151-176. (2016)

- [ 3 ] TERUYUKA, バーチャルヒューマンプロジェクト Saya, <https://www.telyuka.com/>
- [ 4 ] 碓満喜, 多田隆史, 簗島拓実, 八木洸樹「ハイエンドCG表現」  
2018年度松山大学経営学部卒業論文 (2019)  
<https://drive.google.com/file/d/1zwVRQhYmnwtKTR6zzg1JDPXo6OXL8Idb/view>,  
映像作品 <https://drive.google.com/file/d/1b-ryRthGikxNxv4UYmK8v5MDJ3tBswke/view>
- [ 5 ] Kim, H. S. ; Hong, N. ; Kim, M. ; Yoon, S. G. ; Yu, H. W. ; Kong, H. -J. ; Kim, S. -J. ;  
Chai, Y. J. ; Choi, H. J. ; Choi, J. Y. ; Lee, K. E. ; Kim, S. ; Kim, H. C. ; “Application of a  
Perception Neuron® System in Simulation-Based Surgical Training,” J. Clin. Med. 2019, 8,  
124, <https://doi.org/10.3390/jcm8010124>.
- [ 6 ] Ryan Sers, Steph Forrester, Esther Moss, Stephen Ward, Jianjia Ma, Massimiliano Zecca,  
“Validity of the Perception Neuron inertial motion capture system for upper body motion  
analysis,” Measurement, Volume 149, 2020, 107024, ISSN0263-2241,  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107024>.
- [ 7 ] Epic Games 社 Unreal Engine 4 公式サイト  
<https://www.unrealengine.com/ja/what-is-unreal-engine-4>
- [ 8 ] Noitom 社 Perception Neuron 公式サイト  
[https://neuronmocap.com/ja/products/perception\\_neuron](https://neuronmocap.com/ja/products/perception_neuron)
- [ 9 ] 32Neuron Edition V2 (PERCEPTION NEURON 2.0)  
<https://neuronmocap.com/content/product/32-neuron-edition-v2>
- [10] 松坂幸喜「デジタル映像表現－CGによるアニメーション制作－」[改訂新版]  
公益財団法人画像情報教育振興協会 (2015)
- [11] Tobias Baumann, Tang Hao, Yuanhui He, Rick Shoda,  
Perception Neuron Unity Handbook (2015)  
<https://neuronmocap.com/sites/default/files/Perception%20Neuron%20Unity%20Handbook%200.2.4.pdf>

(以上, URL は 2019 年 12 月 19 日閲覧)