

動画像解析に基づくリアルな頭髪運動再現

福里 司[†] 岩本 尚也[†]
國友 翔次[†] 須田 洋文[†] 森島 繁生[†]

本研究では、CG キャラクタの表現に重要なリアルな頭髪運動の再現を目的とし、多視点動画像を基に3次元頭髪運動データを取得する手法を提案する。

頭髪を複数の短冊状の毛束からなるモデルと捉え、この毛束の骨格位置を動画像より取得する。このため、撮影時には横縞の染色を施したヘアエクステンションを使用し、染色領域の中心を骨格位置と見立て、色相検出を用いこれを求めた。その結果、髪同士の摩擦を含んだより自然な頭髪運動の再現が可能になった。

Realistic Hair Motion Reconstruction based on Multi Views Analysis

Tsukasa Fukusato[†], Naoya Iwamoto[†],
Shoji Kunitomo[†], Hirofumi Suda[†], and Shigeo Morishima[†]

This paper describes a new technique of capturing 3D hair motion based on multi views analysis. We assume that hair is a model of several strips of hair-bundle. Therefore, using hair extensions dyed in horizontal stripes, we define center of colored areas as a skeleton position and capture them by color detection. According to our results, we achieved more realistic hair motion, for example friction among hairs than past techniques.

1. 研究背景

近年、映画やゲーム、テレビCMなど様々な用途で3Dコンピュータグラフィックス(以下CG)が用いられるようになり、その中で登場する人物の印象に対して、頭髪が与える印象は非常に大きい役割を果たしている。特にシーン上で動的な変化に応じたリアルな頭髪運動の表現手法の需要が高まっている。

しかしながら頭髪運動再現という観点において、人間の頭髪の本数の多さや動きの複雑さから頭髪の動きを取得する手法は未だなされていない。また、CGにおける頭髪運動表現は物理法則に基づいて仮想的に頭髪運動表現する手法である。物理シミュレーションでは風が体表面にぶつかって生じる乱流の影響や、頭髪自身が体部と衝突するなどといった効果を計算する必要があるが、人間の頭髪本数が非常に多いため、リアルな頭髪の再現には煩雑な作業と膨大な処理が掛かり、さらに表現できる髪型や髪質などに制約が存在するため、実際の頭髪運動とは程遠いのが現状である。

そこで本稿では実際の頭髪運動を動画像解析に基づいて実測する新たな手法を提案する。頭髪一本一本の動きを厳密に取得することは困難であるため、頭髪を複数の短冊状の毛束からなるモデルと捉え、この毛束の骨格位置を動画像により取得する。撮影時に横縞の染色を施したヘアエクステンションを使用し、染色領域の中心を骨格位置と見立て色相検出を用いて骨格位置を求める。少ない髪の本数でも再現性が高い短冊型頭髪モデルに適用することで自然な頭髪運動の再現が実現している。あくまで一本ごとの頭髪の運動を追跡する訳ではなく毛束を追跡するため、厳密な摩擦といった髪に与えられる物理パラメータの算出は困難だが、物理シミュレーションでは表現が困難な実際の頭髪運動の取得が可能となる。

2. 関連研究

CG上で頭髪の表現手法は「短冊型」「立体型」「ファー型」の3種類に分けられる。「短冊型」とは頭髪を複数枚の結束からなるモデルとして捉え、頭髪のテクスチャを貼り付け、それを多数頭にぶら下げることで髪を構築し、数十本程度の骨組みとなるボーンを当てはめ、ポリゴンを変形させることで頭髪運動を表現する。衝突判定の困難さから髪が頭部や体部にめり込む欠点があるが、利点として少ないポリゴンでも髪を毛らしく見え、ゲームなどのコンテンツで主流とされている。

「立体型」とは頭髪のボリュームをそのままポリゴンで表現し、頭髪運動と比べて髪型の再現性に重点を置かれた手法である。この手法は、ボリュームの変化によって

[†] 早稲田大学
Waseda University

頭髪運動を擬似的に表現することができるが、髪型を重点的に作成されるために頭髪運動を表現するには物理法則による仮想的な表現のほか、クリエイターの手作業が必要となってしまふ欠点が挙げられる。

「ファー型」とは頭髪一本ごとの動き、或いは力場、外力を計算することで頭髪全体を表現する手法である。「短冊型」や「立体型」の手法と比べて頭髪の再現性が高いものの表現できる髪型や髪質などに大きな制約が存在する。

上記の CG 上の頭髪運動表現には物理法則に基づいて仮想的に頭髪運動表現するが、実際の頭髪運動、頭髪の内部における乱流や頭髪同士、頭皮との摩擦、人物の動きを考慮した運動を表現するために、煩雑な作業に膨大な時間が掛かることが欠点として挙げられる。

そのため実際の頭髪運動を取得して再現する手法には CG 上の表現手法の種類に対して様々なアプローチが存在する。石川ら^[1]は頭髪一本一本を測定することが困難であることから、モーションキャプチャによって取得した数十本のデータから「ファー型」の頭髪モデルを構築し、シミュレーションでは表現が困難な動きを可能にした。短所として髪に直接マーカを配置するため、マーカの質量による影響を含んだ運動を取得してしまい、実際の頭髪運動とは異なるものになってしまうことが挙げられる。

一方 Luo ら^[2]は精細な頭髪の 3 次元形状復元手法として、頭髪を 1 つのブロックモデル、「立体型」モデルとして捉え、複数台のカメラを用いて頭髪の形状を求め、3 次元の頭髪の陰影情報を利用することで 3 次元復元を行うことが可能となる。しかし短所として形状復元精度が低い視体積交差法をベースとしているため、最終的な出力形状での再現精度が高くないこと、取得可能な頭髪運動に制限があること、髪の本あたりの動き自体捉えることができないため、実際の頭髪運動とは異なることが挙げられる。



(a) 短冊型モデル (b) 立体型モデル (c) ファー型モデル

図 1 CG 上の頭髪表現手法比較

3. 研究の流れ

本研究では実際の 3 次元頭髪運動のデータ取得のための手法を提案する。まず、頭髪の動きを追うために、重みのあるマーカではなく、染色を施したヘアエクステンション（以下、代表髪）を頭髪に複数個配置し、頭髪を揺らす様子をビデオカメラにて撮影する。次にその染色部位の移動を動画像の色相検出によってトラッキングし、最終的に複数台のカメラで取得したイメージ座標を元に三角測量を行うことで三次元位置座標を推定する。

この手法は、髪の毛の束を元に位置座標を推定する手法であるため、実際の髪の本数と比較して少ないが、第 2 章で挙げた 3 種類の頭髪表現手法の中で、少ない頭髪運動データでも再現性が高い「短冊型」のモデルに適用することで、実物に近い頭髪運動を再現することができる。

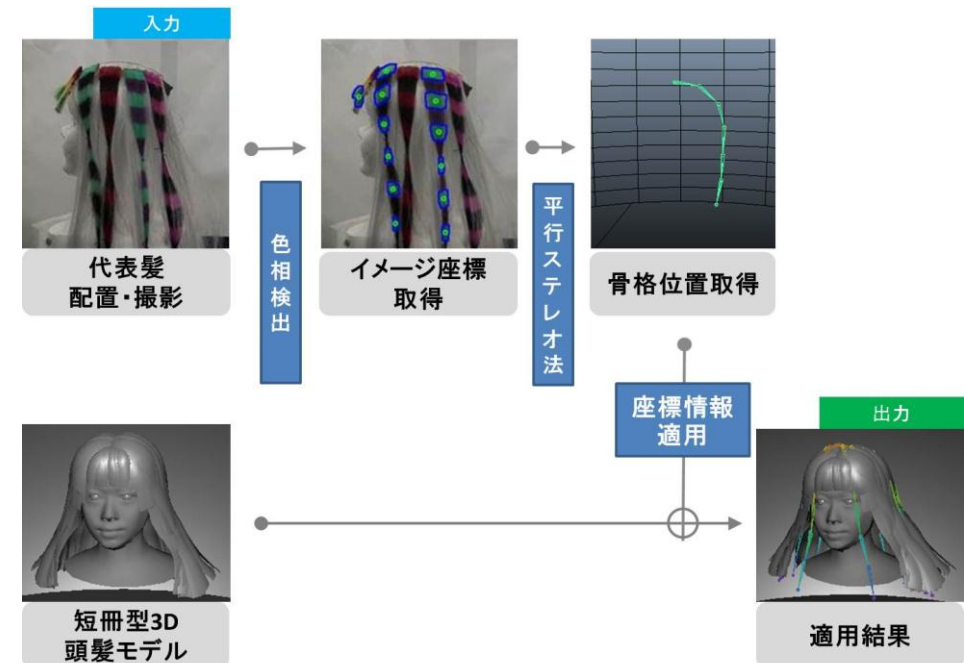


図 2. 本研究の流れ

3.1 代表髪配置

人間の頭髪は約 10 万本あると言われており、一本ごとの動きを追跡するのは困難であるため、本数を間引く必要がある。その際一本のデータを取得するためにその一本以外を間引き配置してしまうと、頭髪全体の摩擦などを考慮した集団的な運動を取ることができない。そこで本手法では石川らが課題であるマーカの質量の影響を改善するために、マーカの代わりとなる横縞の染色を施した人毛の代表髪を頭部に配置し、それらの運動を取得することで実物の頭髪運動を再現することを目指す。配置方法として、再現したい髪型の CG モデルを予め用意し、その髪型に合わせて配置する。



(b) 代表髪 (a) 代表髪を配置したモデル
図 3 代表髪と配置後のモデル

4. 頭髪運動データ取得

本章では頭髪運動データを取得するための手法の説明をする。まずビデオカメラにより撮影した各フレームにおいて髪骨格位置となる特徴点を検出し、各検出領域のイメージ座標を得る。次に検出された部位に自動ラベリング識別処理を施し、その対応関係により平行ステレオ法を用いて各染色領域の世界座標を得る。

4.1 測定環境

動画の撮影において、被写体の周囲を撮影するために被写体の周りに 8 台のカメラを円周上に設置する。周囲に白い布を張り、背景が白くなるようにして、第 4 章で述べる染色領域を色相検出する処理の誤差が軽減される。カメラの撮影領域は頭部が収まるように設定した。撮影に用いたカメラは SONY 製 HDR-SR12、画像サイズは

1920×1080pixel、フレームレートは 29.97fps である。カメラの時間的同期は外部から信号を与えることにより設定した。これにより 1 フレーム以下のずれの精度で同期を取ることができる。カメラパラメータは Zhang の手法^[6]によりあらかじめ内部パラメータを求めておき、さらに既知の世界座標とイメージ座標の対応点を取ることで、外部パラメータを求める。ホワイトバランス、カラーバランスは全てのカメラで統一しておき、フォーカスも最適な距離で固定しておく。

撮影対象として 6 箇所の横縞、幅 4cm ごとに染色を施した代表髪を 13 本使用する。撮影状況としては従来の手法で測定が困難であると予想される人為的に送風した際の毛束の挙動を測定する。図 4 に撮影環境を示す。

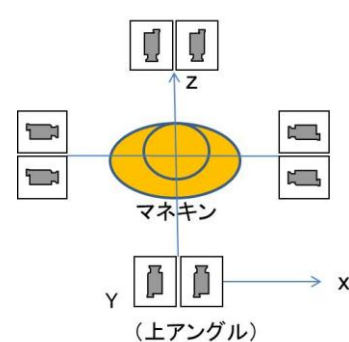


図 4 撮影環境

4.2 染色部位のイメージ座標取得

撮影した動画の各フレームから、被写体の染色部位を検出する。

4.2.1 RGB 分割と二値化

代表髪の染色領域を検出するために、撮影画像を RGB 成分ごとに分離する。その際、照明環境に対応するために前処理として各ピクセルの RGB 値を算出しておく。この時に検出したい部位の色相の値をもとに各成分の画像を二値化する。この際、二値化の閾値は一定に決定するのではなく各ピクセルに対する染色部位の RGB 要素の値を調べ、RGB の各成分要素の比率を閾値とし、一定以上の比率領域の論理和を取る。なお検出が容易な赤、緑、青色で染色された代表髪を使用することで染色領域の検出を容易にする。

4.2.2 ノイズ除去

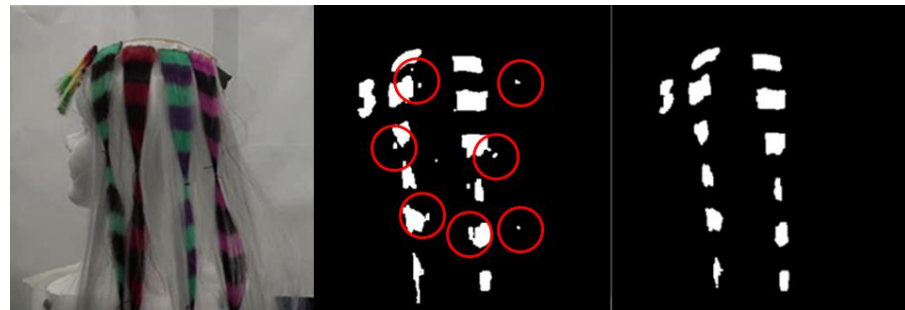
撮影画像から被写体以外のノイズを除去するために、被写体の色相に着目する。まず検出画像を作成するために背景差分を用いる。得られた検出画像には撮影時のノイズなどにより検出部位の中心部位がずれる原因となってしまうピクセルが存在する。それらを自動修正するための処理として、膨張と収縮、メディアンフィルタ処理、及びラベリングを行う。

膨張と収縮とは、撮影時のノイズによって染色領域の検出画像に出てしまう砂塵ノイズを除去するのに有効な手段である。膨張とは設定したある画像サイズ分だけ検出領域を大きくする処理であり、収縮とは逆に設定したある画素サイズ分だけ検出領域を小さくする処理である。膨張により検出領域の途切れた線分をつなげることができ、収縮により数ピクセル単位で出現したノイズを除去することができるため、これらを組み合わせることでノイズを除去することができる。

メディアンフィルタとは、画像の $n \times n$ の局所領域における輝度値を小さい順に並べ、画像の中央にくる領域中央の画素の出力輝度とする処理で、平滑化と異なりエッジがそのまま残りノイズを除去する処理である。これにより収縮と膨張で除去しきれなかったノイズを除去する。

ラベリングとは検出画像のつながった一つの領域ごとにラベルを割り振る処理である。これにより、ピクセルごとにどの領域に属するか、その領域のピクセル数、すなわち面積が分かり、面積を閾値とすることで、膨張、収縮、メディアンフィルタでは埋めきれなかったノイズを除去することができる。

以上、三つの処理を組み合わせることで、よりノイズの少ない色相検出画像を得ることができる。以上の手順で検出した結果を図 5 に示す。



(c) 撮影画像 (b) ノイズ除去前 (a) 色相検出結果

図 5 色相検出結果

上図(b)に赤丸に示した部分にノイズがのっているが、(c)からノイズを正しく除去されていることがわかる

4.2.3 染色部位識別

検出された各染色部位は、各カメラ、各フレームにおいて、部位の対応を知る必要がある。そのため、各カメラにおける同一フレームにおいてラベリングの識別処理を行う。まず各カメラの 1 フレーム目に検出された全特徴点について手動で名前を与え、2 フレーム以降は前フレームとの最近傍座標を取ることで全フレームの自動ラベリング識別処理を施す。その際、誤検出及び自動ラベリング識別処理が失敗した場合のみ手動で修正を行う。

4.2.4 特徴点検出

検出領域の重心 (x_g, y_g) を頭髮骨格位置の中心 (以下、特徴点) と定義する。イメージ座標取得のために画像に対してピクセル座標 (x, y) において二値化した際の閾値以上を 1、閾値以下を 0 と取る関数 $f(x, y)$ とすると、重心 (x_g, y_g) は以下の式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} = \frac{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} * f(x, y)}{\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^m f(x, y)} \quad (1)$$

検出した領域のピクセル数に閾値を設定することで、染色領域の部位のみの重心座標を取得する。以下の手順で特徴点を算出した結果を図 6 に示す。



(a) 撮影画像 (b) 特徴点算出結果

図 6 代表髪の撮影画像と特徴点算出結果

上図の緑丸で示された位置が特徴点の座標となる

4.3 ワールド座標取得

カメラキャリブレーション(Zhang 法^[6])により内部パラメータ (焦点距離 f , 歪み係数) を予め求めておき, 平行ステレオ法によって骨格位置のワールド座標を取得する. 平行ステレオ法とは人間の目のように二つの視点から見た画像上の物体の位置の視差により, 物体の奥行きを求める方法である. なお撮影画像における染色部位の面積はカメラの角度によって異なってしまふ可能性があるため, カメラを平行に設置することで, 2 台の撮影画像の染色部位のピクセル数 (面積) をほぼ一致させることができ, 各カメラで捉えた重心座標が一致する. 2 台のカメラで捉えた染色部位のイメージ座標を (u, v) (u', v'), カメラ同士の間隔 b とした際, ワールド座標は以下の式で求めることができる.

$$X = \frac{bu}{u - u'} \quad Y = \frac{bv}{u - u'} \quad Z = \frac{bf}{u - u'} \quad (2)$$

ここでイメージ座標を (u, v) (u', v') を 2 つのカメラから対応付けされた重心座標とみなすことで, 代表髪の特徴点ワールド座標 (X, Y, Z) が求まる.

4.4 特徴点補間

平行ステレオ法によって 2 台のカメラで検出された全ての特徴点のワールド座標が求まるが, あるフレームにおいて少なくとも 1 台の画像から検出されなかった特徴点はワールド座標を求めることはできない. そこで特徴点が検出されなかったフレームは, 正しく検出された前後のフレームにおける特徴点の位置座標を基に線形補間を行う. 但し 5 フレーム以上検出されなかった場合は前フレームの座標を適用することで各特徴点の時系列上のデータとする.

5. 頭髪モデルへの運動データ適用

本章では取得した頭髪運動データを CG モデルに適用する前処理として, ワールド座標推定の際, 頭髪の根元の固定された位置の時系列上のずれや特徴点に補間を施したときの微小誤差によって矛盾した頭髪運動を軽減, 及び取得本数の補間をする方法について説明する. 推定結果の特徴点ベクトル同士の距離と角度に各々の閾値を設定し, 短冊型モデルの頭髪本数と比較することで, 取得した本数が不足している分を, 隣り合う頭髪同士を線形補間, 内側の頭髪は表面の運動が線形減衰をすると仮定することで取得した本数を増築する.

5.1 時系列上座標データ補間

本研究では代表髪の得られた頭髪運動データの根元部, 中間部, 先端部の運動データをなめらかに表現するために各フレームの特徴点間のベクトルに着目する. 隣り合った 2 つのベクトルの内積から成す角度を求め, その際の角度の閾値を設定し, 閾値を超えた場合前フレームの座標を適用する. ベクトルの成す角の余弦から角度 θ は以下の式で表される.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|} \quad (4)$$

次に代表髪の染色幅に注目する. 代表髪の染色幅を均等に施したものを使用し, 位置推定した特徴点間のベクトルの距離を, 予め測定した染色幅の距離に統一する.

次に代表髪の得られた頭髪運動データを 3 次スプライン関数で補間する. 3 次スプライン関数とは以下の式で表される.

$$S_i = a_i(x - x_j)^3 + b_i(x - x_j)^2 + c_i(x - x_j)^1 + d_j \quad (5)$$

以上の手順によって, 取得した頭髪の特徴点座標を均等に分割しモデルに適用する際のポリゴン変形時の視覚的矛盾を軽減させる.

5.2 頭髪運動データの線形補間

取得データを短冊型の頭髪ポリゴンの骨格データに適用する. 取得本数が少なく, 頭髪内部の動きは取得が困難である為実際のポリゴンデータとして適用させる際に本数の補間が必要となる. その方法として, 表面上の隣り合う頭髪と内部の頭髪ベクトルの線形補間を施す.

- (1) 取得した頭髪運動データについて隣り合う 2 本の頭髪どうしの中で内分比を用いて頭髪となる点郡を新たに作成する. 増築する本数を d , 頭髪特徴点ベクトルを \vec{a}_n , \vec{b}_n とし, 式(6)に示す.

$$\vec{T}_{n1} = \frac{(d-n)*\vec{a}_n + n*\vec{b}_n}{d} \quad (6)$$

- (2) 2本の頭髪のベクトルの内分比を用いて頭髪内部の根元から毛先に向けて頭髪を生成する。その際、測定が困難な頭髪内部の運動を表面上の取得運動から保管を施すことによって擬似的に表現する。頭髪運動が表面から頭皮の距離に比例して減少していくと仮定し、取得した表面上の頭髪運動データを内部の線形的に減少させることで内部の頭髪運動を表現する。短冊型CG頭髪モデルに積層させたポリゴンの枚数 m 枚として r 枚目のポリゴンに適用させる補間式を(7)に示す。

$$\vec{T}_{n1} = r * \frac{(d-n)*\vec{a}_n + n*\vec{b}_n}{m*d} \quad (7)$$

6. 再現結果と考察

以上の手順で、撮影画像と本手法で実物の頭髪から取得した運動データ、短冊型ポリゴンの骨格位置として適用した結果を図5、図6に示す。なおレンダリングにはAutodesk社のMAYAを使用した。従来の頭髪運動取得手法において課題となっていた頭髪に直接添付したマーカ自体の影響がない頭髪運動を取得すること。また図より、撮影画像から送風した際の自然な頭髪運動が再現されていることを確認することができる。さらに位置推定した結果と撮影画像の代表髪の染色領域を図を比較すると一致していることが分かる。

しかし各代表髪の染色部位の重なり、あるいは代表髪の毛束がばらけることで色相検出による測定自体が困難になってしまうこと、また取得できる頭髪の本数が少ないことにより、測定に失敗した頭髪領域を前フレームや隣り合った頭髪運動データから補間、表面部から内部の補間することによって実際の頭髪の動きとは異なる頭髪運動になってしまうことが問題点として挙げられる。

7. まとめと今後の課題

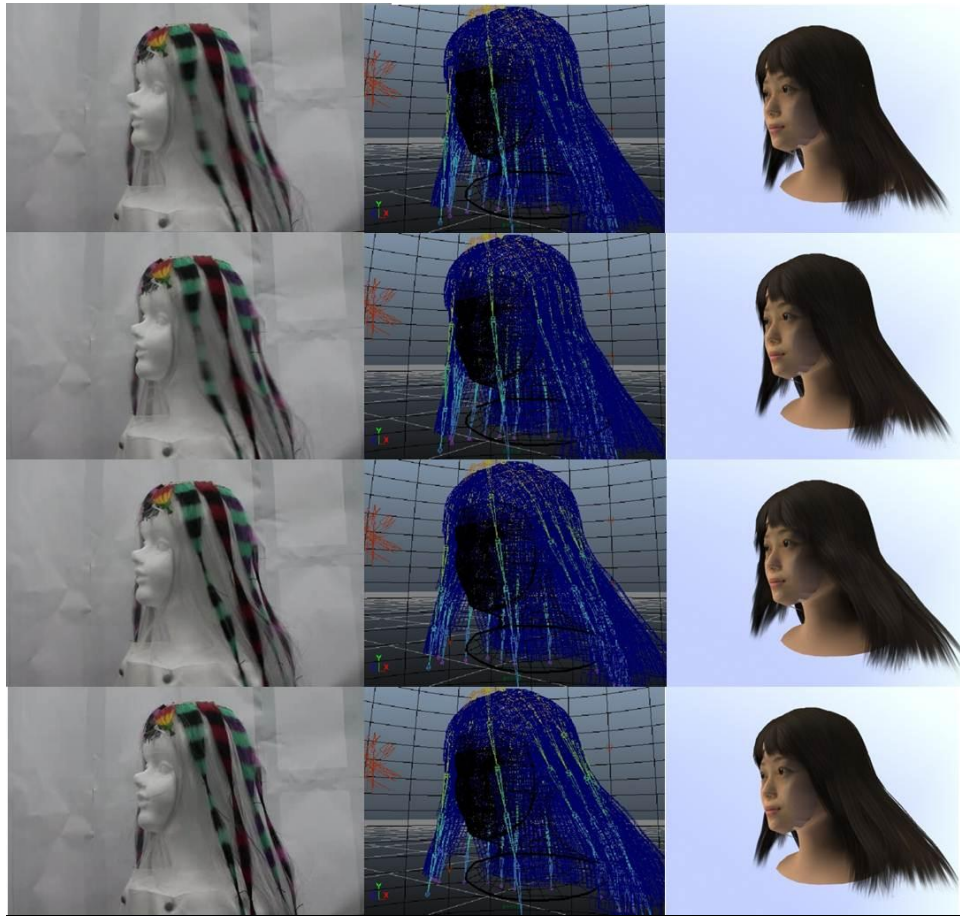
本研究では頭髪を複数の短冊上の毛束と捉え、実写の頭髪運動を色相検出と多視点画像によって推定する新たな手法を提案し、CG上の頭髪表現手法の一つの短冊型頭髪モデルに適用することで、少ない頭髪運動データから自然な頭髪運動アニメーションの再現を可能にした。

今後、髪型や髪質または代表髪の配置方法などの条件を変えて頭髪運動データを取得し、再現が可能かの検討が必要である。また物理シミュレーションで作成した頭髪モデルとの比較を行うことで、より本手法の有用性を示す必要がある。さらに本研究では頭髪運動データが頭髪表面部に限られてしまうため頭髪内部の頭髪運動の取得、

補間方法、撮影環境の再検討が課題として挙げられる。

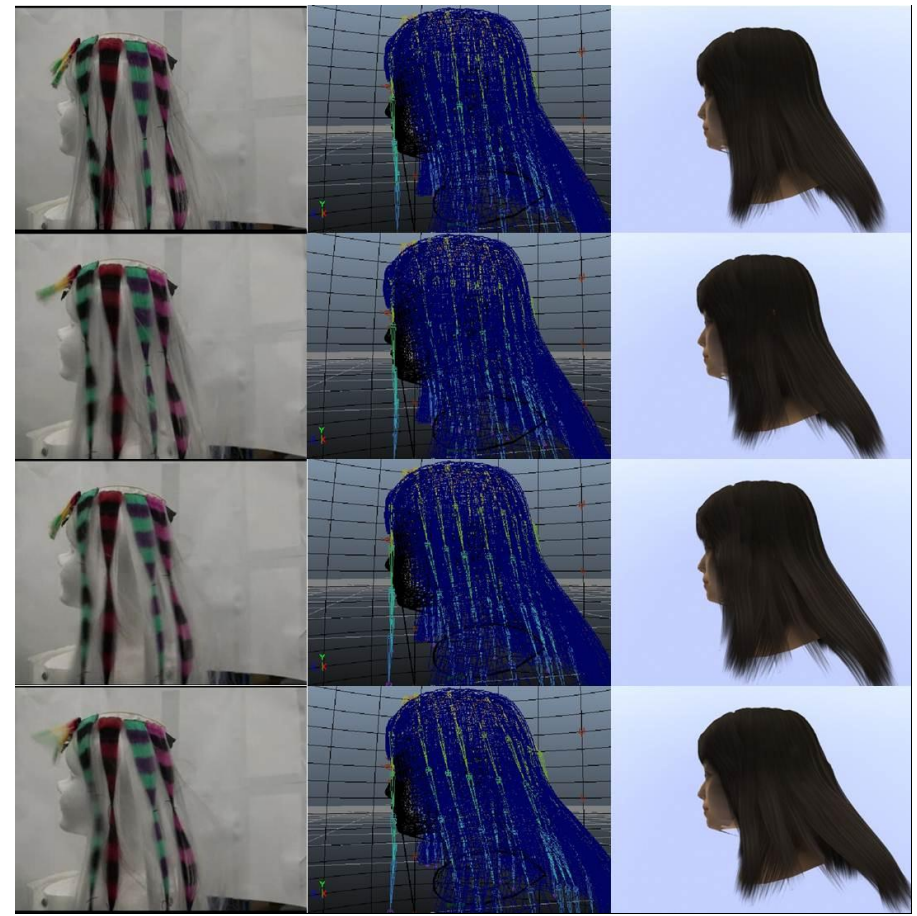
参考文献

- 1) Takahito Ishikawa, Yosuke Kazama, Eiji Sugisaki, and Shigeo Morishima, "Hair Motion Reconstruction using motion capture system", In ACM SIGGRAPH 2007, posters.
- 2) Linjie Luo, Hao Li, Thibaut Weise, Sylvain Paris, Mark Paunly, Szymon Rusinkiewicz "Dynamic Hair Capture", Technical Report TR-907-11, Princeton University, August 2011
- 3) Stephane Grabi, Francois X sillion, R. Marschner, Jerome E. "Imaged-Based Hair Capture by Inverse Lighting", Proceeding of Graphics Interface, pp51-58, 2002.
- 4) Yichen Wei, Eyal Ofek, Long Quan, Heung-Yeung Shum, "Modeling Hair from Multiple Views", In ACM SIGGRAPH 2005 papers,
- 5) Cem Yuksel, Scott Shaefer, John Keyser, "Hair Meshes", In ACM SIGGRAPH Asia 2009, papers.
- 6) Zhengyou Zhang, "A flexible new technique for camera calibration" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):pp1330-1334, 2000.



(a) 撮影画像 (b) 骨格位置推定結果 (c) 再現結果

図 7 再現結果比較 (前方)



(a) 撮影画像 (b) 骨格位置推定結果 (c) 再現結果

図 8 再現結果比較 (側面)