研究速報

3D コンテンツの視差量の分析

A Method for Analyzing the Image Disparity of 3D Video

正会員 中村 芳知^{†1}, 工藤 広太郎^{†2}, 竹本 雅憲^{†2},
正会員 窪田 悟^{†2}, 嶋田 淳^{†3}
Yoshitomo Nakamura^{†1}, Koutaro Kudo^{†2}, Masanori Takemoto^{†2},
Satoru Kubota^{†2} and Atsushi Shimada^{†3}

Abstract A method is described for analyzing the image disparity of 3D video. This method was used to analyze the image disparity characteristics of forty 3D movies. The percentage of image disparities that were out-of-range by one degree or more was higher in the convergent direction than in the divergent direction. Characteristics of the image disparity for 3D video are discussed in relation to the results.

キーワード：3Dテレビ，視覚疲労，立体映像，両眼視差，ステレオマッチング，視差量

1. ま え が き

近年，両眼視差を利用した立体映像，いわゆる3D映像コンテンツを一般家庭でもテレビで視聴できる環境が整ってきた。3DコンテンツはBlu-ray Discとして市販されているほか，放送業界ではBS，CS，ケーブル局の有料放送事業者を中心に一部の局で放送が開始されている。

一方，3Dコンテンツの普及には，視覚疲労の軽減が一つの課題とされている。3Dコンテンツの視聴における視覚疲労は，調節と輻輳の不一致という原理的な問題が主因である^{1)～5)}。このことから，我が国の3Dコンソーシアムの安全ガイドライン⁶⁾では，3D映像における飛出と引込の視差範囲は，最も飛出ている部分または最も引込でいる部分と，表示面との輻輳角の差を視差角とした場合，1°以内が快適に視聴できる範囲としている。

しかし，市販されている3Dコンテンツの視差角を分析した例は少なく，さまざまなジャンルの3Dコンテンツにおいて，視差角がどのような分布を成しているかは明らかにされていない。筆者ら⁷⁾は，視差角がほぼ1°以内に制限さ

れた映像でも比較的強い視覚疲労を訴える視聴者もあり，視覚疲労の強さは視聴者の眼調節時間を主として，両眼視力差，水平斜位などの視機能に依存していることを示した。ただし，実際の3Dコンテンツの視差の特徴と視覚疲労との関係は明確にされていない。そこで，まず，一般的に視聴できる3Dコンテンツがどのような視差の特徴を備えているかについて測定分析する必要がある。

本研究では，ステレオマッチングによりフレームごとに画素単位で算出した水平方向の視差のヒストグラムのパーセンタイルから，当該フレームの飛出と引込の視差を求める方法を提案した。そして，さまざまなジャンルから集めた40種類の3Dコンテンツを提案した方法で分析し，各コンテンツの視差の特徴について考察した。

2. 視差量の分析方法

2.1 画素ごとの視差量の計測

3Dコンテンツの視差量の測定には，リーダー電子社製の3DアシストスタジオFS3090を用いた。このシステムは，主として3Dコンテンツの制作時に視差を確認するためのシステムである。本研究では，このシステムをカスタマイズし，画素ごとの視差量をフレーム単位で保存できるようにした。

このシステムでは，3D映像の再生機からフレームパッキング（右眼映像，左眼映像それぞれ1920×1080画素）で出力される映像に対して，480×270画素にリサイズした後，ブロックマッチング⁸⁾により，一方を基準とした水平方向の画素視差を算出する。この処理を1秒あたり約6フレームの頻度で行い，フレームごとにすべての画素の視差量を求めることができる。視差量の測定精度としては，映像を

本研究の一部は，2013年1月25日の情報ディスプレイ研究会で発表した。

2013年4月4日受付，2013年7月15日再受付，2013年8月30日採録

†1 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚本町8-1-1, TEL 06-6497-7595)

†2 成蹊大学 理工学部

(〒180-8633 武蔵野市吉祥寺北町3-3-1, TEL 0422-37-3720)

†3 三菱電機株式会社 デザイン研究所

(〒247-8501 鎌倉市大船5-1-1, TEL 0467-41-2310)

†1 Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

(8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan)

†2 Faculty of Science and Technology, Seikei University

(3-3-1, Kichijoji-kitamachi, Musashino-shi, Tokyo 180-8633, Japan)

†3 Industrial Design Center, Mitsubishi Electric Corporation

(5-1-1 Ofuna, Kamakura-shi, Kanagawa, 247-8501, Japan)

リサイズして処理しているため、4画素単位の処理による誤差が生じ得る。

表1に本研究で分析した40種類の3Dコンテンツのタイトルを示した。

2.2 飛出量と引込量の目視計測

表1の40コンテンツのうち、アスタリスクを付した8コンテンツについては、サンプリングしたフレームの視差量を目視で計測した。これら8コンテンツは、ジャンルに偏りがないように選択した。

まず、選択した3DコンテンツをFull-HDの50型3Dプラズマテレビに表示し、2名の観察者により飛出と引込が比較的大きいと認識されたシーンを飛出側と引込側でそれぞれ30フレームずつ抽出した。そして、抽出したフレームの飛出と引込の視差を目視で計測した。すなわち、飛出が大きいとして抽出したフレームでは、フレームの中で最も飛出して見える部分の水平方向の視差をメジャーを用いてmm単位で測定した。引込が大きいとして抽出したフレームでも同様に測定した。メジャーによるmm単位の計測精度については、1ピクセルが約0.6mmで比較的大きいこと

表1 視差分析を行った40種類の3Dコンテンツ
The 40 3D movies used in the disparity analysis.

No.	Title	No.	Title
* 1	アバター	21	少年マイロの火星冒険記
2	ナルニア国物語 第3章 アスラン王と魔法の島 3D	22	塔の上のラプンツェル
3	アリスインワンダーランド 3D	23	ティム・バートン ナイトメアー・ ビフォア・クリスマス 3D
* 4	パイオハザードIV アフターライフ IN 3D	24	チキン・リトル 3D
5	タイタンの戦い 3D	* 25	ヨギ&ブーバー わんぱく大作戦 3D
6	トロンレガシー	26	ボルト 3D
7	キャッツ&ドッグス 地球最大の肉球大戦争 3D	27	ルイスと未来泥棒 3D
8	スパイアニマル Gフォース 3D	28	怪盗グルーの月泥棒 DESPICABLE ME
9	牙狼<GARO> ～RED REQUIEM～	* 29	ボーラー・エクスプレス 3D
10	マイティ・ゾー 3D EDITION	30	攻殻機動隊S.A.C SOLID STATE SOCIETY
11	グリーン・ホーネット IN 3D	* 31	オープン・シーズン IN 3D
12	バトル・ロワイアル 3D	32	クリスマス・キャロル
13	スフィア～Sphere's rings live tour 2010～FINAL	33	仮面ライダーW FOREVER 天装戦隊ゴセイジャー
14	3D Ayumi Hamasaki ARENA TOUR 2009	34	トリコ 3D 開幕グルメアドベンチャー!!
* 15	IMAX ディープシー 3D	35	ワンピース 3D 麦わらチェイス
16	オーシャンワンダーランド 3D	* 36	シャークス 3D
17	モンスター・ハウス IN 3D	37	IMAX スペース・ステーション 3D
18	くもりときどきミートボール IN 3D	38	ドルフィン&ホエールズ 3D ～素敵な海の仲間たち～
* 19	アイス・エイジ3 ティラノのおとしもの	39	シルク・ドゥ・ソレイユ ジャニー・オブ・マン IN
20	ガフルの伝説 3D	40	ガリバー旅行記 3D

* Disparity of these eight movies was visually measured

と、画像処理による視差分析システムの分析単位が4画素であったため、目視と画像処理結果との相関をとるという目的では充分であると考えられる。

2.3 画素ごとの視差量のヒストグラムからの飛出量と引込量の予測

ステレオマッチングにより求めた画素ごとの水平視差量のヒストグラムから、当該フレームの飛出と引込の視差を予測する方法について検討した。図1は先に述べた視差分析システムにより画素ごとの視差量の1フレーム分のヒストグラムである。「No.1 アバター」のある1フレームの分析結果である。このようなヒストグラムのパーセンタイルから視聴者が当該フレームで最も飛出しているとする部分と最も引込んでいるとする部分の視差量を予測できるか検討した。すなわち、目視計測による飛出および引込の視差と、図1に示したような視差ヒストグラムのパーセンタイルとの相関を求めた。

図2は、図1のヒストグラムの累積ヒストグラムであり、2.5パーセンタイルと97.5パーセンタイルをそれぞれ引込視差と飛出視差と仮定した場合を例示した。目視計測との相

図1 画素ごとの視差量から求めた1フレームの視差ヒストグラムの例
Disparity histogram calculated from single pixel disparities of a single frame.

図2 図1の累積ヒストグラム、2.5パーセンタイルと97.5パーセンタイルを例示

Cumulative histogram of Fig. 1 showing the 2.5-97.5 percentiles.

図3 画素ごとの視差量から求めた視差ヒストグラムのパーセンタイルと目視による視差計測値との関係

Relationship between the percentile of the disparity histogram and the visual measurement of disparity.

図4 画素ごとの視差量から求めた視差ヒストグラムのパーセンタイルと目視による視差計測値との関係を示す単回帰式の寄与率

Coefficient of determination of the linear regression model between the percentile of the disparity histogram and the visual measurement of disparity.

関分析にあたっては、0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 5, 7.5, 12.5 パーセンタイルを引込側に適用し、その逆側の 99.5, 99, 98.5, 98, 97.5, 95, 92.5, 87.5 パーセンタイルを飛出側に適用した。図3はこのようにして求めたパーセンタイルを x 軸、目視計測した飛出視差と引込視差を y 軸としてプロットした図である。いずれも画面上の視差を Full-HD (1920 × 1080 画素) で表示した時の画素数で表している。図3では 1 - 99, 2.5 - 97.5, 12.5 - 87.5 の 3 対のパーセンタイルと、目視計測した飛出と引込の視差との関係のみ示している。

目視計測した 8 つの映像について、図3のようにパーセンタイルごとに単回帰式の寄与率を求めた結果を図4に示す。最も寄与率が高いのは、1.5 ~ 2.5 (98.5 ~ 97.5) パーセンタイルで、いずれの映像でも寄与率が 0.9 を超える。同様に、8 対のパーセンタイルにおける単回帰式の回帰係数

図5 視差量のヒストグラムのパーセンタイルと目視による視差計測値との関係を示す単回帰式の回帰係数

Regression coefficient between the percentile of the disparity histogram and the visual measurement of disparity.

を図5に示した。回帰係数が1に近いのは 1.5 ~ 2.5 (98.5 ~ 97.5) パーセンタイルである。また、定数項がほぼ0になるのも 1.5 ~ 2.5 (98.5 ~ 97.5) パーセンタイルであった。そこで、この条件の中で 8 つの映像の寄与率の平均が 0.96 と最も高かった 2.5 (97.5) パーセンタイルの対、すなわち引込側 2.5 パーセンタイルを当該フレームの引込視差、飛出側 97.5 パーセンタイルを飛出視差とみなして、40 種類の 3D コンテンツを分析した。

3. 結果と考察

図6は、この方法によって 1 秒あたり約 6 フレームの頻度で飛出と引込の視差を求め、当該コンテンツの全体について分布を示した例である。それぞれ、図6 (a) 「No.1 アバター」、図6 (b) 「No.12 バトルロワイアル」、図6 (c) 「No.15 ディープシー」の飛出、引込の視差ヒストグラムを示す。視距離 3H (画面高の 3 倍) で視聴した場合の視差角 1° (Full-HD で 57 画素の視差に相当) の範囲を図中に示した。先に述べたように視差角 1° は、3D コンソーシアムのガイドラインでも快適視差範囲としている視差角の範囲である。

測定した 40 コンテンツすべてについて同様の処理を施し、視差角 1° より大きな飛出および引込があるフレームの割合を求めてプロットしたのが図7である。すなわち、視距離 3H での視聴を想定した場合、視差角 1° 以上の飛出があるフレームの割合を x 軸、視差角 1° 以上の引込があるフレームの割合を y 軸として、40 コンテンツを散布図としてプロットした。分析した 40 コンテンツは、すべて視差角 1° を超えるフレームが存在した。視差角 1° を超えるフレームの割合が、引込側の方が多いコンテンツは 40 コンテンツ中 4 コンテンツのみで、9 割は飛出側の方が多かった。引込側が特に多かったコンテンツは水中のシーンが多い「No.15 ディープシー」と「No.16 オーシャンワンダーランド」であった。逆に 1° 以上の飛出が多かったのは、「No.12 バトルロワイアル」と「No.33 仮面ライダー W」で、いずれも

(a) No.1 アバター [Avatar]

(b) No.12 バトルロワイアル [Battle Royale]

(c) No.15 ディープシー [Deep Sea]

図6 特徴的な視差をもつ三つの3Dコンテンツの飛出と引込の視差ヒストグラム

Disparity histogram of three 3D movies that have distinctive depth characteristics.

15%を超える。これらはいわゆる戦闘もので意図的に飛出の効果を狙ったものと考えられる。

一方、ハリウッド系の実写を主体とする映画は、 1° 以上の飛出が生じるフレームの割合は概ね5%以下であった。

図7 40種類の3Dコンテンツにおける視差角 1° 以上の飛出と引込の割合

Percentage of images with greater than 1° of disparity among the 40 3D movies.

ハリウッド系の実写を主体とする映画の中では「No.1アバター」が 1° 以上の飛出の割合が最も高かったが、それでも7%であった。

これらの結果は、視差角が 1° を超えるフレームの割合で3Dコンテンツの視差を特徴づけたものであるが、図6に示したような飛出と引込の視差ヒストグラムの形状から視差を特徴づけることもできる。図8(a)は、「No.16オーシャンワンダーランド」の飛出と引込の視差ヒストグラムである。図6(c)に示した「No.15ディープシー」と同様に水中シーンが多く引込が多い。この二つの視差ヒストグラムの形状は極めて類似している。また、図8(b)に示した「No.33仮面ライダーW」と図6(b)の「No.12バトルロワイアル」の視差ヒストグラムも類似している。

そこで、ヒストグラム間の類似度を求める際に用いられるバタチャリア係数 (Bhattacharyya Coefficient) を40コンテンツの視差ヒストグラムのすべての対 ($40 \times 39/2 = 780$) で求めた。バタチャリア係数は、式(1)と(2)に示したようにヒストグラムを正規化してからヒストグラムの対応するビンを掛け合わせて算出する。二つのヒストグラムの類似度を表すバタチャリア係数は0から1までの値を取り、正規化した二つのヒストグラムが完全に一致する場合1.0になる。

$$L = \sum_{i=1}^n \sqrt{P_i Q_i} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n Q_i = 1 \quad (2)$$

ここで、 n はヒストグラムのビンの数、 P 、 Q は正規化ヒストグラムである。

先に視差ヒストグラムの類似度の高さを示した図6(c)

(a) No.16 オーシャンワンダーランド [Ocean Wonderland]

(b) No.33 仮面ライダーW [Kamen Rider W]

図8 飛出と引込の視差ヒストグラム
Disparity histograms of two 3D movies.

「No.15 ディープシー」と図8(a)「No.16 オーシャンワンダーランド」のバタチャリア係数は0.97であった。同様に図6(b)「No.12 バトルロワイアル」と図8(b)「No.33 仮面ライダーW」は、0.81であった。

このバタチャリア係数による類似度を距離尺度に変換した上で、40種類の3Dコンテンツを多次元尺度構成法(MDS: Multi Dimensional Scaling)により分類を試みた。ここで距離尺度は、ヘリンガー距離(Hellinger distance)を用いた。ヘリンガー距離 H は、バタチャリア係数 L から以下のように求められる。

$$H = \sqrt{1 - L} \quad (3)$$

図9が40種類の3Dコンテンツの視差ヒストグラムの類似度(ヘリンガー距離)からMDSによって各コンテンツ間の距離を2次元平面上に布置したものである。MDSはIBM SPSS Statistics Ver.20のALSCALを用い、尺度水準を間隔尺度と指定して計算を実行した。図中の番号は、表1に示したコンテンツの番号を表している。図中で近距離に布

置されたコンテンツ同士は視差の付け方が類似していると言える。具体的な視差ヒストグラムの特徴が把握できるように、図中にできる限りヒストグラムの形状を示した。例えば、図の右下の15と16、ディープシーとオーシャンワンダーランドは、すでに述べたように、他の視差ヒストグラムと比較して引込が多く、中心に高いピークがあり分布の裾野が相対的に広いことが判る。また、これもすでに言及した12バトルロワイアルと33仮面ライダーWは、他のコンテンツと比較して、飛出が多く、二峰性の分布を成し、図の右上に布置されている。

このようにして、視差ヒストグラムの特徴を図の全体に亘ってみると、図の横軸は分布の裾野の広がり、縦軸は分布の峰の幅を表しているようである。すなわち、図の左側の分布は裾野が狭いのにに対して、右へ行くほど裾野が広がっている。また、図の上方に行くほど分布の峰が広がり、多峰性を示す傾向が認められる。これらの結果は、市販されている3D映像の視差の特徴を表しているだけであり、制作方法や映像内容との関係が推定できるのは先に述べたごく一部のコンテンツに限られる。ただし、視差の大きさが視覚負担の主因であるという前提では、図の左下にあるコンテンツの負担が軽く、図の右上方向に行くほど負担が大きいコンテンツであるといえる。今後、視覚的不快感との関係を明確にすることによって、これらの分析結果の意義が高まるといえる。

以上の結果は、視差の大きさの出現頻度から分析したものであり、視差の時間的な変化は捉えられていない。視差角が比較的小さい映像であっても奥行き方向の速い動きがあると視覚的不快感や視覚疲労が生じやすいとされている²⁾⁴⁾。したがって、時系列で視差角の変化を記述する必要がある。図10は「No.1 アバター」の5分間のシーンの飛出、引込の時間的な変化をプロットしたものである。実際に映像を視聴して確認したが、各シーンの飛出と引込の変化が的確に表されていた。今後は、このような視差量の時間的な変化についてもコンテンツの特徴を表現する方法について検討していく必要がある。

3D映像の視聴による視覚疲労については、実際のコンテンツを用いて、本研究で示したような視差の大きさと視差の時間的な変化の両面の影響を評価していくことによって、ディスプレイとコンテンツ双方の改善課題を見出すことができると考えられる。

4. む す び

視聴者の見えに対応した3D映像の飛出、引込の視差量の分析方法を提案し、市販の40種類の3Dコンテンツの視差を分析した。

まず、ステレオマッチングによりフレームごとに画素単位で算出した水平方向の視差ヒストグラムのパーセンタイルから視聴者が当該フレームで最も飛出ているとする部分と最も引込んでいるとする部分の視差量を予測する方法に

図9 視差ヒストグラムの類似度に基づき多次元尺度構成法を用いてプロットしたマップ. 1~40の番号は表1のコンテンツ番号を示す.

Similarity matrices of the disparity histograms plotted in a multidimensional scaling ordination. Numbers correspond to those used in Table 1 and indicate the 3D movie.

図10 飛出と引込の視差角の時間的変化 (No.1 アバタの一部)

Disparity changes over time (5 min section of Avatar).

について検討した。

そして、視差ヒストグラムの2.5パーセンタイルと97.5パーセンタイルから、分析対象とした8つの3D映像については、寄与率0.9以上で引込視差と飛出視差が予測できることを示した。

その方法をさまざまなジャンルから集めた40種類の3Dコンテンツの視差量の分析に適用し、以下のような結果を

得た.

- (1) 飛出側と引込側の視差角 1° を超えるフレームの割合からコンテンツによって異なる視差の特徴の一側面を表すことができた。
- (2) いずれのコンテンツも視差角 1° を超える飛出ないし引込があるフレームが存在したが、9割のコンテンツは、飛出側の方が引込側より多かった。
- (3) 飛出と引込の視差ヒストグラムの類似度に基づく多次元尺度構成法により、視差量から見たコンテンツ全体の構造を表すことができた。
- (4) 飛出と引込の視差の時間的な変化から奥行き方向の視差の時系列変化の一例を示すことができた。

本研究で示した視差の分析方法を適用することによって、視聴者の見えに対応した視差の大きさや視差の時系列変化をコンテンツごとに記述することができる。今後は、これらの視差量の特徴と視覚的不快感や視覚疲労との関係について検討していく必要がある。

最後に分析にあたって協力を得た滝沢大貴さんと松本修太郎さんに感謝します。

〔文 献〕

- 1) M. Wöpkig: "Viewing comfort with stereoscopic pictures: An experimental study on the subjective effects of disparity magnitude and depth of focus", Journal of the SID, 3, 3, pp.101-103 (1995)
- 2) 矢野澄男, 江本正喜, 三橋哲雄: "両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因", 映情学誌, 57, 9, pp.1187-1193 (2003)
- 3) K. Ukai, P.A. Howarth: "Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories and observations", Displays, 29, 2, pp.106-116 (2008)
- 4) M. Lambooi, W. IJsselsteijn, M. Fortuin, I. Heynderickx: "Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: A review", Journal of Imaging Science and Technology, 53, 3, pp.030201_1-030201_14 (2009)
- 5) 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明: "3D 立体映像表現の基礎－基本原理から制作技術まで－", オーム社 (2010)
- 6) 3D コンソーシアム (3DC) 安全ガイドライン部会: "人に優しい3D 普及のための3DC安全ガイドライン", 3D コンソーシアム, 2010年4月20日改訂版 (2010)
- 7) 窪田 悟, 工藤広太郎, 竹本雅憲, 嶋田 淳, 中村芳知: "3D テレビの視聴による視覚疲労と視聴者の視機能との関係", 映情学誌, 67, 7, pp.J262-J269 (2013)
- 8) K. Konolige: "Small vision system: hardware and implementation", Robotics Research: the Eighth International Symposium, Japan International Symposium of Robotics Research 1997 (1997)

なかむら よしとも
中村 芳知 1992年, 愛媛大学大学院理学研究科終了。同年, 三菱電機(株)入社。表示装置の開発に従事, 現在, 先端技術総合研究所に勤務, 成蹊大学理工学部客員研究員, 正会員。

くどう こうたろう
工藤広太郎 現在, 成蹊大学大学院理工学研究科在学中。認知工学研究室において3Dディスプレイの人間工学的評価研究に従事。

たけもと まさのり
竹本 雅憲 2001年, 慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業。2006年, 慶應義塾大学大学院博士課程修了。2006年, 奈良先端科学技術大学院大学COE特任助手。2007年, 奈良先端科学技術大学院大学特任助教。2008年～2010年, (株)豊田中央研究所客員研究員。2011年より, 成蹊大学理工学部助教。自動車の人間工学, ディスプレイの人間工学的評価研究に従事。博士(工学)。

くぼた さとし
窪田 悟 1976年, 成蹊大学工学部卒業。現在, 成蹊大学理工学部教授。表示装置の人間工学やユーザビリティに関する研究に従事。博士(工学)。正会員。

しまだ あつし
嶋田 淳 2007年, 成蹊大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 三菱電機(株)入社。現在, 同社デザイン研究所インタフェースデザイン部勤務。情報機器, 家電製品のインタフェースデザインの設計評価に従事。