2.5億画素-19K 超高解像度カメラを用いた高精細大画面映像表現

High Definition Large Screen Image Representation using 250 M-pixel-19K Ultra-High-Resolution Camera

学生会員 小川 勝久^{†1,†2}, 森 健太郎^{†3}
Katsuhisa Ogawa^{†1,†2} and Kentaro Mori^{†3}

あらまし 近年、解像度12K以上の高精細大画面映像視聴環境が整い、映像制作の現場では8K解像度以上の超高解像度映像撮影・制作のニーズが存在する。本論文では、カメラ1台で、高精細大画面映像撮影可能な19K超高解像度カメラレコーダを提案する。撮像素子に、2.5億画素CMOSイメージセンサを使用、本センサ解像限界の空間周波数333 [lp/mm]で、被写体コントラストを再現する超高解像度広角レンズを開発した。「タイムラプス」と「秒5コマ連写」モードで撮影した19K13K-Raw非圧縮連番画像から仮想カメラワーク手法を用いて12K2K映像を制作し、試写評価を行った。画質劣化のないズーム、パン、ティルト効果を加えた臨場感の高い高精細大画面映像が、本カメラ撮影映像から制作できることを、12K2Kマルチディスプレイ・高精細ワイド画面で確認した。

キーワード：高解像度イメージセンサ、高解像度レンズ、高精細大画面、臨場感映像、高精細映像表現、仮想カメラワーク

1. ま え が き

近年、映像機器の高解像度化が進み、パブリックビューイング、デジタルサイネージ、デジタルアート表現等に高精細大画面映像が利用されている。8Kスーパーハイビジョン映像機器^{1)~3)}による大規模イベントのパブリックビューイング⁴⁾⁵⁾が成功を収める中、3台の4Kプロジェクタ映像をブレンド表示した12K2K大型ワイドスクリーン⁶⁾、576個のマイクロLEDユニットをタイル状に敷詰めた15K4K LEDディスプレイ⁷⁾等の8K以上の超高解像度画面による高精細映像視聴サービスが行われている。

一方、カメラの解像度は、動画では8K4K、静止画では、デジタル一眼レフカメラの普及で8K6K(≒5,000万画素)と高解像度化が進んでいるが、8Kを超える高精細大画面映像の撮影は、既存のカメラ1台では解像度が不足する。

そこで、複数のカメラで分割撮影した映像を、後処理で合成し所望の解像度映像を生成するマルチカメラが使用される。マルチカメラによる超高解像度映像撮影事例として、8K4Kカメラ3台で撮影した12K8K空撮映像⁸⁾、4K2Kカメラ27台で撮影した16K4Kサラウンド映像⁹⁾等がある。マルチカメラ撮影では、複数のカメラで分割撮影したオーバーラップ領域のある画像を張り合わせるイメージスティッチ

ング処理¹⁰⁾¹¹⁾によって、1枚の高解像度画像を生成する。しかしながら、マルチカメラによる撮影には、カメラ台数増加に伴う撮影システムの大規模化、撮影の手間、イメージスティッチングによる映像処理時間の増加といった実用面での課題がある。

また、映像撮影・制作の省力化手段として、カメラ位置固定で撮影した高解像度映像の一部をトリミングし、新しい構図の低解像度映像を制作する仮想カメラワーク手法^{12)~14)}が提案されている。撮影済み映像から新しい映像コンテンツを制作する有力な手段だが、高精細大画面映像制作に、仮想カメラワークを利用する場合、表示画面解像度以上の映像を撮影できる超高解像度カメラが必要になる。トリミング画像の解像度が表示画面解像度より低い場合、拡大処理が必要で、画素等倍表示とはならず、画質が劣化する。画質を落とさない仮想カメラワーク高精細映像を制作するためには、表示画面解像度以上の撮影済み映像が必要である。8K映像からトリミングにより新しい4K映像を制作する提案¹⁵⁾はあるが、8K以上の表示画面では使用できない。マルチカメラを使用した仮想カメラワーク手法¹⁶⁾¹⁷⁾の提案があるが、マルチカメラ撮影には、前述した実用面での課題がある。特に、高精細大画面に対応した仮想カメラワークで使用する超高精細映像をマルチカメラで撮影することは、非常に困難である。そこで、筆者らは、8K以上の大画面でも仮想カメラワークが行えるように16K以上の超高解像度カメラの実現に向け、超高解像度撮像コンポーネントである撮像素子とレンズの研究を行った。

本論文では、高精細大画面映像撮影を可能にする19K超高解像度カメラレコーダを提案する。撮像素子には、2.5億

2020年8月4日受付、2021年1月11日再受付、2021年2月4日採録

†1 立命館大学 大学院情報理工学科知的画像処理研究室

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1, TEL 077-566-1111)

†2 キヤノン株式会社 R&D本部

(〒146-0085 大田区下丸3-30-1, TEL 03-3758-2111)

†3 キヤノン株式会社 宇都宮光学技術研究所

(〒321-3292 栃木県宇都宮市清原工業団地20-2, TEL 03-3758-2111)

画素CMOSイメージセンサを使用，一般のレンズでは，センサ解像力を引き出すシャープな光学像が結像できないため，2.5億画素センサ解像限界の空間周波数333 [lp/mm] で被写体コントラストを再現する超高解像度広角レンズを開発した．レコーダは，画像細部の高周波成分ロスのない非圧縮形式で，19K13K-RAW 連番画像を録画する．本カメラの評価装置として，12K2K 仮想カメラワーク映像表示装置を制作し，高精細大画面映像の撮影・制作・評価を行い，本カメラの有効性を検証した．

本稿では，2章で超高解像度撮像コンポーネント，3章で19K 超高解像度カメラレコーダ，4章で評価装置の構成，性能を述べ，5章で実験結果を報告し，6章で本研究の総括と今後の展望について述べる．

2. 超高解像度撮像コンポーネント

2.1 2.5億画素CMOSイメージセンサ

本研究の撮像素子として開発した2.5億画素CMOSイメージセンサ¹⁸⁾の仕様を表1に，外観写真を図1に示す．水平画素数19,712 (≒ 19K)，垂直画素数12,752 (≒ 13K)，総画素数2.514億画素 (≒ 250M)，光学フォーマットAPS-Hの超多画素大判イメージセンサである．画素サイズは1.5 μmで，画素上部に，Bayer配列カラーフィルタが積層されており，19K13K-RAW 画像を，フレームレート5fpsで出力する．

本センサ解像限界時の画素とラインペア画像の関係を図2に示す．センサの解像力は，1 mm当たりの識別可能なラインペア画像 (a) のペア数である空間周波数で表され，単位は，[lp/mm] となる．1.5 μm ピッチで配置された画素 (b) は，1 mm幅に，666.66画素の標本化点を形成する．

標本化周波数の1/2，ナイキスト周波数 f_n が解像限界となり，画素サイズをPsizeとすると本センサのナイキスト周波数 f_n は，式 (1) より，333 [lp/mm] と算出される．

表1 2.5億画素CMOSイメージセンサ仕様

光学フォーマット	APS-H
イメージサイズ	30.2mm x 16.7mm
画素数	251.4M pixels ≒ 250M
水平方向画素数	19,712 pixels ≒ 19K
垂直方向画素数	12,752 pixels ≒ 13K
画素サイズ	1.5 μm
ナイキスト周波数	333.3 lp/mm
フレームレート	5fps max
カラーフィルタ	ベイヤー配列

図1 センサ外観写真

図2 2.5億画素センサ解像限界

$$f_n = \frac{1\text{mm}}{2 * Psize} = \frac{1\text{mm}}{2 * 1.5\mu\text{m}} = 333 \text{ [lp/mm]} \quad (1)$$

2.5億画素センサ解像力を活かした超高解像度撮影が行える空間周波数333 [lp/mm] で，被写体コントラストを再現できる超高解像度レンズを開発したので，次節で報告する．

2.2 超高解像度広角レンズ

試作した超高解像度広角レンズの仕様を表2に，図3に外観写真を示す．本研究では撮影対象を風景や建造物等に定め，高精細大画面で臨場感あふれる映像表現を目指した．したがって，本試作レンズの焦点距離は28 mm，半画角32.4度の広角レンズとした．広角レンズは被写界深度の深い撮影が可能である．パンフォーカス撮影によれば，画面全体にピントが合うため高精細映像表現に適している．

2.5億画素CMOSイメージセンサの光学フォーマットはAPS-Hであるため，図4に示すようにセンサ受光面で結像される最大像高 (10割像高) は17.76mmである．本センサの解像力を活かすために，本試作レンズは画面中心から周辺部まで333[lp/mm]の空間周波数を解像することが求められる．われわれは解像していると判定可能なMTF値を0.2以上と定め，軸上 (像高0 mm) から7割像高 (像高12.4 mm) まで，333 [lp/mm] のMTF値が0.2以上であることを設計目標とした．

表2 レンズ仕様

焦点距離	28mm
半画角	32.4度
像高	17.76mm
Fナンバー	2.8
バックフォーカス	10.25mm
レンズ全長	136.1mm
最大有効系	47.2mm

図3 レンズ外観写真

図4 センサ受光面上の光学像サイズ

図5 本試作レンズの光路図

光学系が大型になり過ぎずかつ製造可能であり、収差を理想光学系（収差のない光学系）近くまで補正できるFナンバーを検討した。設計および収差解析の結果、Fナンバー2.8で設計目標を達成できる光学系を見出した^{20) 21)}。その光学系の光路図を図5に示す。

この光学系のバックフォーカスは10.25 mmでありレンズ全長は136.1 mm、最大有効径は47.2 mmである。バックフォーカスは光学系の最も像側の屈折面からセンサまでの距離である。レンズ全長は最も物体側の屈折面からセンサまでの距離であり、最大有効径は光線が通過する屈折面の最大径である。理想光学系にほとんど近い収差補正を実現するために、ミラーレスカメラ同様にバックフォーカスを短くし、レンズ配置の自由度を上げることで収差補正が容易な構成としている。図5に示した超高解像度広角レンズの構成を、一眼レフカメラとして一般的に知られているFナンバー2.8程度の広角レンズ²²⁾の構成と比較して説明する。一般的な広角レンズの光路図を図6に示す。

一般的な広角レンズは負の屈折力（焦点距離の逆数）の第1レンズ群L1と正の屈折力の第2レンズ群L2から構成されている。L1の焦点距離 f_1 は-43.9 mmであり、L2の焦点距離 f_2 は27.4 mmである。バックフォーカスを確保するために、L2は強い正の屈折力となっており、絞りに対して略対称的なレンズ構成となっていない。このような構成では、特に軸外光線の光線傾角の変化を少なく抑えることができず、理想光学系に限りなく近い収差補正は困難であった。

一方、本試作レンズは負の屈折力の第1レンズ群L1と正の屈折力の第2レンズ群L2、負の屈折力の第3レンズ群L3から構成されている。L1の焦点距離 f_1 は-31.4 mmであり、L2の焦点距離 f_2 は43.9 mmであり、L3の焦点距離 f_3 は-62.2 mm

図6 一般的な広角レンズの光路図

図7 MFT像高特性 サジタル方向

図8 MFT像高特性 メリジナル方向

である。絞りはL2の中心付近に配置され、全体として絞りに対して略対称的なレンズ構成になっている。したがって、軸外光線の光線傾角の変化を少なく抑えることができ、理想光学系に限りなく近い収差補正が可能となった。また、L1を低分散ガラス2枚で構成していること、L3に非球面レンズを配置していることも、色収差の低減と各種単色収差補正に効果的に寄与している。

本試作レンズと理想レンズ、一般的な広角レンズの空間周波数333 [lp/mm]におけるMTFの像高特性を図7、図8に示す。図7がサジタル方向、図8がメリジナル方向のMTFである。ここで、理想レンズとは本試作レンズが

無収差であると仮定して計算したものである。図7から、本試作レンズはサジタル方向で像高16mm付近まで、図8よりメリジオナル方向で7割像高まで0.2以上確保できており、2.5億画素CMOSイメージセンサの解像力を活かす設計目標を達成できていることがわかる。本試作レンズと理想レンズを比較すると、サジタル方向は像高13mmまで、メリジオナル方向は最大像高までMTFの差は0.05以内である。したがって、本試作レンズは理想レンズにほとんど近い解像力を持っているといえる。一方、一般的な広角レンズのMTFは全像高で0.2未満であり、センサの解像性能を発揮できる光学系ではないことがわかる。

3. 19K超高解像度カメラレコーダ

3.1 ハードウェア構成

カメラヘッドと映像録画装置から成る19K13K超高解像度カメラレコーダの構成を図9に示す。超高解像度広角レンズで集光された光学像は、カメラヘッドに搭載した2.5億画素センサ受光面に結像し、画素部で画像信号に変換され、デジタルフロントエンド(DFE)に送信される。DFEはセンサ固有のノイズ除去を行った後、19K13K-Raw画像を4chシリアル非圧縮信号として映像録画装置へ出力する。

カメラ出力インタフェースには、産業カメラ出力規格CoaXPress¹⁹⁾を使用した。図10(a)が、カメラヘッドの外観写真である。ハンディカメラ用三脚に装着可能な外形サイズとした。映像録画装置のキャプチャ部(Capture)で受信した19K13K-Raw非圧縮画像は、記録容量2TBの内蔵

図9 19K13K超高解像度カメラレコーダの構成

図10 19K13K超高解像度カメラレコーダの外観写真

ストレージ(SSD-1)に録画される。連写撮影時、最大6600フレームの19K13K-Raw連番画像(300MB/frame)を録画する。SSD-1の録画データは、画像処理部(Image Processor)の現像処理により、19K13Kカラー連番画像(24bitカラービットマップ)に変換後、外部ストレージ(SSD-2)に保存される。撮影録画モードは、「秒5コマ連写」と「タイムラプス」があり、映像録画装置からリモート制御で切替わる。秒5コマ連写撮影モードでは、最大22分の連写録画が可能である。タイムラプス撮影モードは、設定したインターバル時間で自動撮影・録画が行える。Captureで受信した19K13K-Raw非圧縮画像は、ダウンコンバーターで縮小後、カラー映像としてディスプレイにライブビュー表示される。撮影者は、ディスプレイで映像を確認しながら、構図決定、フォーカス調整作業を行う。図10(b)が映像録画装置の外観写真である。

4. 評価装置

本章では、本研究で制作した高精細大画面映像の試写評価装置の構成、機能について述べる。

4.1 12K2K仮想カメラワーク映像表示装置

12K2K仮想カメラワーク映像表示装置の構成を図11に、外観写真を図12示す。表示部は、4K2Kディスプレイ(46inch)3台で構成した12K2Kマルチディスプレイであり、外形サイズは幅3.3m x 高さ0.75mである。映像処理装置の仮想カメラワークレンダリング処理部は、SSD-2から19K13Kカラー連番画像を受取り、予めプログラムされた構図を持つ12K2K非圧縮映像ファイルを作成し、画面描画

図11 12K2K仮想カメラワーク映像表示装置の構成

図12 12K2K仮想カメラワーク映像表示装置の外観写真

図13 仮想カメラワークレンダリングフローチャート

データ格納ストレージ (SSD-3) に保存する。仮想カメラワークレンダリング処理部の詳細は、次節で報告する。グラフィックボードは、SSD-3から12K2K非圧縮映像ファイルを読み出し、12K2Kマルチディスプレイを描画する。映像処理装置の外形寸法は(幅: 177 mm × 高さ: 483 mm × 奥行523 mm)と小型かつ1台で12K2K映像表示が可能であり、運搬・設置が容易で、外部公開実験を行うことができた。

4.2 仮想カメラワークレンダリング処理

図13が、仮想カメラワークレンダリング処理のフローチャートである。12K2K画面に表示する19K13Kカラー連番画像(S1)の部分画像を、表示領域選択(S2)で指定する。選択条件は、画面と同じアスペクト比48:9、解像度は、最大で19K3.6K、最小12K2Kとし、拡大表示による画質低下を防止する。トリミング(S3)で指定領域の画像を切り出す。トリミング画像の解像度が12K2Kの場合(S4→YES)、画像等倍のまま、12K2K以上の場合(S4→No)、ダウンコンバート(S5)の縮小処理で12K2Kカラー連番画像(S6)が制作される。すべての連番画像に対しS1～S6の処理が終わると(S7→Yes)、S6の連番画像は、12K2K非圧縮映像ファイル(S8)にエンコードされ、SSD-3に保存される。レンダリング処理の所要時間は、1フレーム当たり約0.7秒である。

図14～図16は、19K13K連番画像から制作した12K2K仮想カメラワーク映像の画面表示イメージである。図14は、仮想ティルト映像である。(a)は19K13K連番画像で、表示選択領域は、P1、P2、P3の順で、映像上部より垂直方向にスクロールダウンし、ティルト撮影映像表現を演出している。選択枠の解像度は19K3.6Kに設定しており、トリミングされた画像は縮小倍率63%で、ダウンコンバートされ12K2K画像に変換される。(b)はP1、(c)はP2、(d)は

(a) 19K13K連番画像と表示選択領域

(b) 12K2K画面表示イメージ (P1)

(c) 12K2K画面表示イメージ (P2)

(d) 12K2K画面表示イメージ (P3)

図14 12K2K 仮想ティルト画像

(a) 19K13K連番画像と表示選択領域

(b) 12K2K画面表示イメージ (P4)

(c) 12K2K画面表示イメージ (P5)

(d) 12K2K画面表示イメージ (P6)

図15 12K2K 仮想パン画像

P3の12K2K画面表示イメージである。

図15は仮想パン映像である。(a)は19K13K連番画像で、表示選択領域は、P4、P5、P6の順で、水平方向にスクロールシフトすることでパン撮影映像表現を演出している。選択枠の解像度は12K2Kに設定しており、画素等倍で12K2K画像が制作される。(b)はP4、(c)はP5、(d)はP6の12K2K画面表示イメージである。

図16は仮想ズーム映像である。(a)は19K13K静止画で、表示選択領域(b)は、P7からP8に向かって縮小しながら移動することで、ズーム撮影映像表現を演出している。選

撮枠の解像度は P7が19K3.6K, P8が12K2Kに設定しており, 選択枠解像度の変更に伴い縮小倍率68%(P7)~0%(P8)で12K2K画像に変換される。(c)はP7,(d)はP8の12K2K画面表示イメージである。

5. 実験結果

5.1 カメラ解像力評価

本カメラシステムを用いて撮影実験を行い, 総合MTF測定と広角実写撮影で解像度性能を評価した。

5.1.1 総合MTF測定

2.5億画素CMOSイメージセンサ, 超高解像度広角レンズ, 後段の映像処理を含む本カメラシステム全体の総合MTF測定は, ISO12233規格²⁵⁾のSlanted-edge法で行った。Slanted-edge法^{26) 27)}は, 僅かに傾いたエッジチャート撮影画像からエッジスプレット関数を求め, その微分である線広がり関数をデジタルフーリエ変換することで定量的にMTF曲線を求めることができる。さまざまな周波数の矩形波パターンを含むインメガサイクルチャートによるMTF測定は, 広角レンズを使用した本カメラシステムの場合, 19K解像度を正確に測定するための大きなチャートは準備できず, 既存のインメガサイクルチャートによる撮影実験では, 撮影画角に対するチャートの位置合わせが難しく, 僅かな撮影画角の違いで, 測定したMTF値に変動が生じた。したがって, 本実験ではチャートの撮影画角に依存しないSlanted-edge法により総合MTF測定を行った。図17(a)はISO12233チャート撮影画像, (b)はMTF測定に使用したエッジチャート部の画像である。本実験では, 画像中央部の総合MTF特性を測定した。図18は, 図17(b)のエッジチャート画像から求めた総合MTF特性である。Slanted-edge法で算出されるMTF曲線の横軸は空間周波数で, 単位はcycle/pixelとなる。0.5cycle/pixelはナイキスト周波数であり, 2.5億画素CMOSイメージセンサ解像限界であるナイキスト周波333lp/mmと一致している。

図17 実験結果ISO12233チャート撮影

図18 総合MTF特性

実測したMTF曲線より, ナイキスト周波数0.5cycle/pixelで, MTFの変調度が20%以上あり, 本カメラシステムが撮像素子として使用した2.5億画素CMOSイメージセンサ解像限界までの解像力のある19K13K映像を取得できることを確認した。

5.1.2 広角実写撮影実験

本撮影実験は, 横浜ランドマークで行った。図19は, 本カメラと一般的な8K6Kカメラ(5,000万画素)で撮影した画像の解像力比較結果である。(a)は, 本カメラで撮影した全体画像, (b)-1は, 像高7割の画像の拡大表示である。(b)-1の画素数は, 1万画素(100画素×100画素)である。(c)は, 一般的な8K6Kカメラの撮影画像から, (b)-1と同じ領域を拡大した画像である。(c)の画素数は, 1,764画素(42画素×42画素)である。比較すると(b)-1は, 評価対象のエッジ情報が保存・再現され, 文字が認識できる。(c)はエッジ部がぼけ, 情報が欠落がある。文字は認識できない。異なる像高の本カメラ拡大画像を(b)-2~(b)-5に示す。(b)-2は軸上, (b)-3は像高3割, (b)-4は像高5割, (b)-5は像高10割の拡大画像である。(b)-2~(b)-5の拡大画像が, 被写体の特徴を捉えた解像力のある画像であることを確認した。(b)-5は, 幾分かエッジ情報の欠落があるが, 撮影対象の特徴を失わない画像であることを確認した。また, カメラと注目被写体までの撮影距離は, (b)-1が550m, (b)-2が500m, (b)-3が1.2km, (b)-4が1.6km, (b)-5が150mであり, 試作した被写体深度の深い超高解像度広角レンズで, 撮影距離150m~1.6kmの範囲で, ピントが合った鮮明な画像が撮影できることを確認した。本研究の超高解像度コンポーネントで

図19 実験結果 広角実写撮影

ある2.5億画素CMOSイメージセンサと超高解像度広角レンズを用いることで、高精細大画面全体に表示する超高解像度画像が本カメラで鮮明に撮影できることを確認した。

5.2 12K2K仮想カメラワーク映像評価

本研究で制作した12K2K仮想カメラワーク映像の評価は、外部の映像技術・制作関係者、一般ユーザに映像を公開し、主観評価による採点と評価コメントを収集する形式で行った。

5.2.1 評価用12K2K公開映像

外部公開した12K2K仮想カメラワーク映像コンテンツ一覧を表3に、プレビュー動画を図20に示す。図20の動画は12K2K映像(≒2,400万画素)を、1920画素×320画素(≒61万画素)にダウンコンバートしたPC環境で再生可能な縮小版プレビュー動画である。

制作した仮想カメラワーク映像は、ティルト、パン、ズーム(イン・アウト)のカメラワークアクションの組合せにより制作しており、表3の仮想カメラワークモード欄に、映像制作時に使用したカメラワークアクションを、実行順に番号を付け表記した。例えば、コンテンツ番号C2は、19K超高解像度カメラレコーダのタイムラプスモードで撮影した被写体「富士山」の1913Kカラー連番画像を使用して、最初は、①ティルト、次には、②ズームイン、最後に、③ズームアウトと、時間の経過とともに仮想カメラワークレンダリング処理の内容を変更し、12K2K仮想カメラワーク映像を制作していることを示している。コンテンツ番号C1～C3、C5、C7の「風景」映像は、カメラ固定撮影の映像にも関わらず、ドローン空撮撮影に近い表現力のある映像表現を目指し制作した。コンテンツ番号C6は、図16のズー

表3 12K2K仮想カメラワーク映像コンテンツ一覧(外部公開)

番号	被写体	撮影モード	仮想カメラワークモード	備考
C1	紅葉台	タイムラプス	①ティルト ②ズームイン	
C2	富士山	タイムラプス	①ティルト ②ズームイン ③ズームアウト	
C3	横浜みなとみらい	タイムラプス	③ズームアウト	
C4	伊豆・花の都公園	秒5コマ連写	①パン	CG合成・蝶々
C5	日光・中禅寺湖	タイムラプス	①ティルト ②ズームイン ③ティルト	
C6	大型ステンドグラス ステンドグラス美術館	静止画	①ズームイン ②ティルト	
C7	日光・明知平	タイムラプス	①ティルト ②ズームイン ③ティルト	テロップ挿入
C8	高野山(世界遺産) 丹生都比売神社	秒5コマ連写	①ティルト	CG合成・落葉 テロップ挿入

図20 実験結果 12K2K公開映像(動画)

本論文電子付録として、以下のURLで本動画を公開

視聴先URL: https://www.youtube.com/watch?v=uz2dc_PZJII

ム撮影表現映像である。表3の備考欄は、実写の12K2K仮想カメラワーク映像にテロップやCG映像を重ね合わせたことを表記している。コンテンツ番号C4は、秒5コマ連写撮影した19K13Kカラー連番画像から制作した実写・仮想パ

ン映像に、CG映像の蝶々をオーバーレイ処理により重ね合わせている。花畑全景の高精細実写映像を背景に、多くの蝶々が飛び回る優雅な映像表現を演出した。コンテンツ番号C8は、「高野山・丹生都比売神社」を、秒5コマ連写撮影した19K13Kカラー連番画像から仮想ティルト映像を制作し、「高野山」のテロップとイチョウ、モミジの落葉舞い散るCG映像を重ね合せ、Well Came Japanをコンセプトにインバウンド向けデジタルサイネージ映像表現を想定して制作した。

5.2.2 主観評価実験

外部の映像技術研究者12名、映像コンテンツ制作者18名、一般ユーザ33名の合計63名の被験者を招き、12K2K仮想カメラワーク映像の臨場感評価を劣化尺度による主観評価法²³⁾で行った。「臨場感」は心理因子名としては上位概念の評価語であるので、表4(a)に示す4つの評価語を設定し、被験者による評価基準のバラツキを極力抑えた。

特に「現実感」は、「カメラを移動する実際のカメラワークで撮影した映像と思うか?」と評価指標をより具体的に絞り込み、本研究の仮想カメラワーク映像の視聴効果の有効性の確認を行った。表4(b)は、本評価の5段階劣化尺度である。観視距離は、誘導視野²⁴⁾範囲100°を12K2K画面(幅3.3m)で覆い、可能な限り画面に接近し解像度の違いが明確に認識できる1.4mとした。室内の照明は落とし、試写評価を実施した。コンテンツ番号C1～C8の各評価語に対する平均スコアを図21のレーダーチャートに示す。表5は、各評価語におけるすべてのコンテンツの評価結果の総合平均スコアとその標準偏差である。「現実感」の総合平均スコアは、4.38($\sigma=0.52$)であり、本研究の仮想カメラワーク映像が、現実のカメラワーク撮影の映像表現に非常に近いことが確認できた。「解像感」の総合平均スコアは、4.44($\sigma=0.62$)であり、拡大表示のない19K超高解像度カメラ撮影画像を使用した高精細映像表現の有効性が確認できた。「没入感」、「迫力感」のスコアにバラツキが見られるのは、コンテンツの内容により、被験者の嗜好感性の違いと秒5コマのフレームレートの遅い映像(C4, C8)によるスコアの伸び悩みが原因と思われる。この主観評価実験により「現実感」と「解像感」が非常に優れた12K2K仮想カメラ

図21 主観評価結果 レーダーチャート

表5 各評価語の統計値

	平均値 μ	標準偏差 σ
現実感	4.375	0.5175492
解像感	4.4375	0.6232117
迫力感	4.125	0.4225771
没入感	3.90625	0.265165

ワーク映像が19K超高解像度カメラを使用して制作できることを確認した。

加えて、この主観評価で高スコアを獲得した「現実感」の評価結果の主因が、本カメラ撮影画像にあることを検証するため、本カメラと解像度が低い8K6Kカメラで撮影・制作した12K2K映像を対比させた比較主観評価実験を行った。図22は本実験映像である。本カメラ撮影の19K13K画像(a)から表示選択領域P9の画像(画素数12K2K)を抽出し、12K2K映像を制作した。(b)は12K2K画面表示イメージである。表示選択枠P9を上下に移動することで12K2K仮想ティルト映像を制作した。(b)の画角に合わせて比較用8K6K画像からも表示画像を抽出し、拡大倍率238%で

(a) 19K13K画像

(b) 12K2K画面表示イメージ (P9)

(c) 8K6K画像拡大表示

(d) 19K13K画像拡大表示

図22 比較主観評価 実験映像

表4 12K2K仮想カメラワーク映像の評価語と評価尺度

評価語	評価尺度	
	5	1
現実感	カメラが移動撮影	移動していない (仮想カメラで制作)
没入感	自分が動いている	動いていない (動いているは映像)
解像感	解像度が高い	解像度が低い
迫力感	迫力がある	迫力がない
実物感	実物である	映像である

(a)

(b)

アップコンバートすることで同じシーンの12K2K映像を制作した。(c)は8K6K画像、(d)は19K13K画像から制作した12K2K映像の拡大表示である。被写体である「ミミズク」の毛先の画質を比較すると画像等倍表示の(d)は、拡大処理を行った(c)より、エッジ部の情報欠落が少なく、空間周波数の高い画像であることが確認できた。評価尺度5を「19K13K画像から制作した12K2K映像の方が、より現実感が高い」と定義し、表4(b)の5段階劣化尺度を用いて、被験者6名(映像制作関係者)による比較主観評価実験を行った。観視距離は先の主観評価実験と同じく、誘導視野範囲100°を12K2K画面(幅3.3m)で覆い、可能な限り画面に接近し解像感の違いが明確に認識できる1.4mとした。被験者6名による採点結果は、平均スコア3.83($\sigma=0.75$)であった。この結果より12K2K仮想カメラワーク映像から「現実感」を感じる主因として、本カメラ撮影の19K13K画像の占める割合が大きいことを確認した。

5.2.3 一般公開、評価コメント収集

前節の主観評価実験とは別に、映像技術研究者、映像機器メーカー関係者、映像コンテンツ制作者および一般ユーザー含め、延べ、約2,600人に本映像を一般公開した。一般公開した展示会、研究会を以下に示す。

(1) Inter BEE 2017展示会

会場：幕張メッセ、実施日2017年11月15日～17日

(2) 次世代画像入力ビジョンシステム部会定例会

会場：東京理科大学、実施日2018年11月18日

(3) 映像表現・芸術科学フォーラム2019

会場：早稲田大学、実施日2019年3月12日

(4) 大阪芸術大学オープンキャンパス

会場：大阪芸術大学、実施日2019年3月10日

約2,600人の見学者のうち、ランダムに180人から12K2K仮想カメラワーク映像の高精細大画面映像表現の有効性・課題を含む評価コメントを集めた。観視条件が一様ではないが、12K2K仮想カメラワーク映像表現に対する主なコメントは「実際にカメラが移動して撮影した映像に見える(現実感が高い)」,「画面のそばで視聴しても、ズーム映像なのにキメ細かい(解像感が高い)」と、主観評価結果と一致した評価コメントを多数集めることができた。映像制作分野の専門家からは、本研究の課題・短所として「連写撮影速度が、秒5コマと遅い。タイムラプスや静止画の表現はいいが、最低24psの超高解像度動画素材があると、さらに臨場感の高い仮想カメラワーク映像が制作できると思う」,「この仮想カメラワーク映像の現実感をさらに上げるためには表示階調の高画質化：HDR技術の導入を検討すべき」等の今後の研究課題を設定する貴重なコメントも集めることができた。一般ユーザー(高校生を含む)からは、「映像ではなく、自分が動いているように感じる」,「もっと大きな画面で見たい」,「HMDよりも見やすい」,「映像の見る位置を自分で変更できるといいと思う」等のユーザー視点の率直なコメントも集めることができた。

図23 本研究成果の一般公開の様子

この一般公開では、ランダムな見学者の評価コメントから、19K超高解像度カメラを使用した高精細大画面映像表現の有効性と今後の研究課題を確認することができた。一般公開における12K2K仮想カメラワーク映像表示装置展示の様子を、図23に示す。

6. む す び

本論文では、カメラ1台で、高精細大画面映像撮影可能な19K超高解像度カメラレコーダを提案した。本カメラレコーダで撮影録画した19K13K連番画像から仮想カメラワーク映像を制作し、12K2Kマルチディスプレイを用いて試写評価実験を行った。カメラ位置固定で撮影した超高解像度映像から、画質劣化のないズーム、パン、ティルト効果を加えた新しい構図の高精細大画面映像表現を、高い臨場感を持って制作できることを確認した。

今後は、カメラレコーダ撮影録画速度の高速化、仮想カメラワークレンダリング処理速度の高速化、12K2K以上の超高解像度ディスプレイによる効果確認、本提案手法を用いた超高解像度映像ビジネス創出の検討を行う。

謝辞 本論文の作成にあたり、終始適切な助言を賜ったキヤノン(株)R&D本部 井上本部長、2.5億画素CMOSイメージセンサを提供頂いたデバイス開発本部 市川本部長、譲原副本部長、櫻井所長、一般公開実験を行って頂いた桃井部長、デバイス企画推進課各位、超高解像度広角レンズ試作において設計指導頂いた光学技術研究所 浜野所長、横山主任、本論文の校正指導を賜ったR&D本部 新庄副本部長、奥田上席、坂口上席に感謝の意を表します。本研究の映像撮影に協力頂いた高野山・丹生都比売神社 丹生宮司、和歌山大学観光学部 尾久土教授に感謝の意を表します。本研究の主観評価実験に参加頂いた映像技術研究者、映像コンテンツ制作に携わる関係各位、本研究の一般公開において貴重なコメント頂いた東京大学 相澤教授、次世代画像入力ビジョンシステム部会関係各位、東京都市大学 向井教授、早稲田大学 森島教授、尚美学園大学 春口教授、奈良先端科学技術大学院大学 久保客員准教授、映像表現・芸術科学フォーラム2019参加者各位、大阪芸術大学 赤木教授に感謝の意を表します。

〔文 献〕

- 1) 北村, 添野, 安江, 山下, 島本: “フルスペック8Kスーパーハイビジョンリファレンスカメラの開発”, 映情学冬大, 7-5 (2014)
- 2) 梶山, 菊地, 小倉, 宮下, 鉄地川原, 渡瀬, 長井, 高島: “フルスペック8Kスーパーハイビジョン圧縮記録装置の開発”, 映情学誌, 72, 1, pp.41-46 (2018)
- 3) 石井, 薄井, 斎藤, 清水, 関, 石橋, 野口, 古谷, 山下, 村井: “スーパーハイビジョン用プラズマディスプレイの開発”, 映情学誌, 68, 1, pp.41-46 (2014)
- 4) 鹿喰, 加藤: “スーパーハイビジョンによるロンドンオリンピックパブリックビューイング”, 映情学誌, 66, 12, pp.1023-1 (2012)
- 5) 山名: “FIFA ワールドカップ・ブラジル2014～8Kスーパーハイビジョン制作・現地パブリックビューイング報告”, 映情学誌, 69, 1, pp.24-29 (2015)
- 6) “世界初: 12 Kワイド映像と照明を同期した未来型ライブビューイングを実施”, 映像配信高度化機構, <https://nexcdi-f.jp/wp-content/uploads/2019/10/1dee03c8d9240da37d277028b2558001.pdf> (May 2019)
- 7) 琵琶, 土居, 安田, 門田: “マイクロLEDを用いた高画質でスケラブルなCrystal LEDディスプレイシステムの実用化”, 映情学誌, 63, 12, pp.174-179 (2020)
- 8) "This 12K NYC flyover video was captured with three 8K RED Weapon Monstro VV cameras ", DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW, <https://www.dpreview.com/articles/3967477458/this-12K-nyc-flyover-video-was-captured-with-three-8K-red-weapon-monstro-vv-cameras> (Aug. 2020)
- 9) 山口, 佐藤, 小野, 外村, 難波, 菊地, 星出, 森住, 小野, 南: “高臨場感ライブビューイングサービスのためのサラウンド映像合成・同期伝送システム”, 映情学誌, 74, 2, pp.402-411 (2020) :
- 10) M. Brown and D. Lowe: "Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features", International Journal of Computer Vision, 74, pp.59-73 (2007)
- 11) P. Zhou, X. Luo: "An Efficient Multi-view Image Stitching Algorithm Based on CSIFT Features", Future Communication, Computing, Control and Management, 2, pp.407-413 (Jan. 2012)
- 12) 篠木, 藤吉: “高解像度映像からの視聴者の注目点を考慮した講義映像の自動生成”, 映情学誌, 62, 2, pp.240-246 (2008)
- 13) 大西, 泉, 福永: “デジタルカメラワークを用いた自動生成”, 画像の認識・理解シンポジウム, pp.I-332-I-336 (Jul 2000)
- 14) 船津, 塚本, 今村, 山下, 三谷, 野尻: “スーパーハイビジョン映像を用いた実時間ハイビジョン電子ズーム装置の開発”, 映情学誌, 74, 2, pp.402-411 (2020)
- 15) "8K ROI Camera System", Panasonic, https://pro-av.panasonic.net/en/products/8K_roi_camera_system/
- 16) 武田, 木全, 松浦: “インタラクティブ・パノラマ映像の多画面視聴に関する一検討”, 映情学技報, 35, 20, pp.35-38 (May 2011)
- 17) 熊野, 有木, 塚田: “ボールと選手に着目したデジタルカメラワークの実現法”, 映情学技報, 59, 2, pp.271-278 (2005)
- 18) H. Totsuka, et al: "An APS-H-Size 250Mpixel CMOS Image Sensor Using Column Single-Slope ADCs with Dual-Gain Amplifiers", ISSC C Dig. Tech Papers, pp.116-117 (2016)
- 19) 日本インダストリアルイメージング協会: “マシビジョン用インタフェース標準規格, ～デジタルカメラインタフェース選択の手引き”, pp.13-14, JIIA (2016)
- 20) 森: “撮像光学系およびそれを有する撮像装置”, 特許6516579 (2019)
- 21) K. Mori, Y. Hayasaki, K. Araki: "Fundamental ray aberration analysis: extension of ray matrix analysis to the third-order region using a four-element fundamental ray vector", Appl. Opt. 59, 4466-4477 (2020)
- 22) 辻: “レンズ設計のすべて”, 電波新聞社, pp.122-123 (2006)
- 23) 田中, 森, 春日, 東海林: “高品位大画面映像コンテンツの感性評価手法の提案”, 日本感性工学学会誌, 14, 2, pp.277-284 (2015)
- 24) 井上: “知っておきたいキーワード没入型ディスプレイ”, 映情学技報, 68, 4, pp.321-323 (2014)
- 25) ISO-12233: "Photography - Electronic still-picture cameras Resolution measurements" (2000)
- 26) 正岡, 新井, 花谷, 瀧口: “8KカメラのMTF測定のための高精度Slanted-edge法”, 映情学冬季大会講演予稿集, p.11-9-1-11-9-2 (2013)
- 27) K. Masaoka, K. Arai and Y. Takiguchi: "Realtime Measurement of Ultrahigh-Definition Camera Modulation Transfer Function", SMPTE Motion Imaging Journal, 127, 10, pp.14-22 (2018)

小川 勝久 1986年, キヤノン(株)入社。イメージセンサ応用研究に従事。R&D開発本部主席(2020年12月迄), 現在, 立命大学大学院情報理工学研究科知的画像処理研究室在籍, 次世代映像処理研究に従事。大阪芸術大学写真学科客員教授, 和歌山大学CTR客員フェロー。学生会員。

森 健太郎 2012年, キヤノン(株)入社。結像光学系の要素開発および設計, 収差論の研究に従事。現在, イメージコミュニケーション事業本部光学技術32開発室に所属。