

放射状カメラによる実時間全周囲立体映像撮像システム

加藤 伸明^{*1} 城 堅誠^{*1} 南澤 孝太^{*1} 新居 英明^{*1} 川上 直樹^{*1} 舘 暲^{*1}

Omni-directional Stereoscopic Video Camera System for Visual Telexistence

Nobuaki Kato^{*1}, Kensei Jo^{*1}, Kouta Minamizawa^{*1}, Hideaki Nii^{*1}, Naoki Kawakami^{*1} and Susumu Tachi^{*1}

Abstract – This paper reports a novel camera system that captures immersive 3D motion pictures in real time for a telexistence environment. The system is composed of eight pairs of cameras placed densely to cover all field of view, in order to reconstruct stereoscopic visual field for observers, taking the physical constraints of human vision system into account. The developed system fully satisfied the requirements to archive visual telexistence: the system can present panoramic and stereoscopic motion images interactively. We showed an application in which the proposed image-capture system was applied to the immersive visual display TWISTER and an experiment of visual telexistence was put into practice.

Keywords : panoramic stereo vision, radial camera, immersive vision, telexistence

1 はじめに

トレイグジスタンス [1] とは、利用者に対して現在いる場所から遠く離れた場所にあたかも存在しているような感覚を与える技術を指す。特に本研究では、視覚ディスプレイを用いて、実世界における遠隔地にいる感覚を提示する技術を視覚的トレイグジスタンスと定義する。近年では CAVE[2], TWISTER[3][4] などの没入型ディスプレイと呼ばれる装置が開発されており、視覚的トレイグジスタンスへの応用が期待されている。しかしながら、現状では没入型ディスプレイに提示される映像コンテンツは CG 映像が主であり、利用者が没入できる環境の大多数は CG 世界から構成されている。この理由は、視覚的トレイグジスタンスを実現可能な映像を取得できる撮像装置がほとんど存在しないことに起因している。視覚的トレイグジスタンスが可能な映像を取得できるシステムが実現すると、テレビ放送における生中継のように、没入型ディスプレイを用いて現在その場所にいるかのように遠隔地の映像を鑑賞できるようになる (図 1)。さらに双方向の通信を可能とするように拡張することにより、現地の人々とその場所にいるかのようにインタラクティブなコミュニケーションを行うことも可能となる。また、遠隔地の風景を記録して映像コンテンツを生成し、保存することにより、利用者は自分の好きな時に好きなコンテンツを選び、没入型ディスプレイを用いて好きな場所へ没入できるようになる (図 2)。このような目的に即した没入型ディスプレイとして本論文では TWISTER に

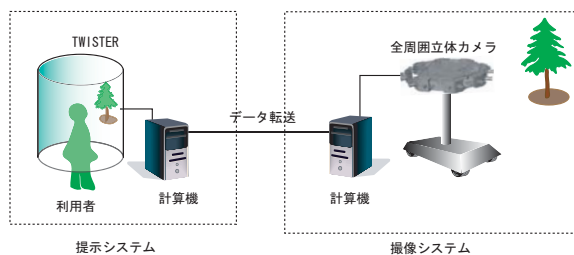


図 1 全周囲立体実写映像撮像による視覚的トレイグジスタンスシステム。
Fig. 1 Conceptual drawing of the visual telexistence system

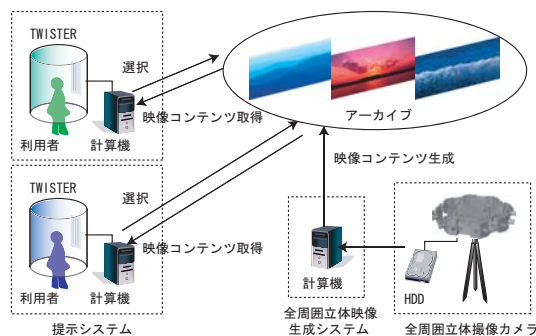


図 2 映像コンテンツによるアーカイブシステム。
Fig. 2 Conceptual drawing of the video archive system

着目した。TWISTER は利用者の頭部を追従することなく 360[degree] の風景を提示することが可能で、頭部追従による VR 酔いも少なく、長時間の観賞を楽しむことも容易である。

本論文では TWISTER に代表される空間没入型ディ

^{*1}東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*1}Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

スプレイを用いた視覚的トレイグジスタンスシステムを実現するため、視覚的トレイグジスタンスに必要な現実世界の視覚情報を取得する撮像システムを提案する。

視覚的トレイグジスタンスを実現するためには、システムはバーチャルリアリティの3条件 [5] に加えて、実空間映像の再現性という条件を満たさなければならない。バーチャルリアリティの3条件とは、三次元性、自己投射性、実時間性を指し、バーチャルリアリティに携わるシステムが満たすべき必要不可欠な要素である。さらに、視覚的トレイグジスタンスを満たすためにはバーチャルリアリティのシステムによって生成される映像が、利用者が普段現実世界で見ているような映像を再現している必要があるため、本論文では実空間映像の再現性という条件を加えた。実空間映像とは、視覚的トレイグジスタンスを行うための光線情報を指し、没入型ディスプレイの利用者に対して再現する必要がある情報である。言い換えると、人間が周囲を見回した時の両眼に入射する全ての像情報である。

この観点から、従来の撮像システムは以上4つの条件を全ては満たしていなかったため、視覚的トレイグジスタンスを実現できる映像を撮像できなかった。例えば、川西ら [6] の装置や ViewPlus 社の Astro Sensor Series [7] は空間上の1点に1つの眼をおいた時の360[degree]の光線情報を取得している。しかしながら、利用者にとって必要な情報は周囲を見回した時の両眼の位置2点の光線情報であり、川西らの装置や Astro Sensor Series で取得した光線情報には、この見回し動作と両眼位置に対応した光線情報が含まれていない。川西らの装置や Astro Sensor Series は、見回し動作と人間の両眼位置に対応した光線情報を再現することも可能ではあるが、一度三次元空間を再構成する必要があるため、遅延が大きくなり、バーチャルリアリティの実時間性の条件を損なう。一方、Virtual Dome [8] や S.K. Nayer と A.D. Karmarkar [9] の装置、S.Pelegら [10] の装置、田中ら [11] の装置においては、頭部の見回しに対する回転軸を固定した時の見回し動作と人間の両眼位置に対応した光線情報の取得が可能であるが、生成映像のフレームレートが低いために、バーチャルリアリティの実時間性の条件を満たしていない。石川ら [12] の装置では複数の全方位カメラから得られた映像をリアルタイムに三次元合成し、利用者の視点位置や視線方向にあわせて HMD に提示させるシステムを開発しているが、本研究で用いる TWISTER は360[degree]の視野の映像を提示可能な設置型の装置であり、頭部運動に伴う提示映像の変更の必要がないため本研究では TWISTER の特長に則り、頭部追従が不要なシンプルなシステムを構築する。

2 全周囲立体撮像カメラの設計

2.1 設計方針

視覚的トレイグジスタンスの条件を満たすシステムを設計するために、設計パラメータを決定する。

まず、三次元性という条件について考慮する。三次元性を満たすためには三次元世界の完全な再構築が理想的であるが、計算量が多大になり、実時間性を満たせない。一方、長田ら [13] によると、人間は一般的に物体を観察する距離(数m程度)では主に輻輳、両眼視差、運動視差により三次元空間の情報を再構成していると言われている。ここで、本研究で用いる没入型ディスプレイ TWISTER は実装が容易で計算負荷も少ない輻輳と両眼視差に基づいて立体映像を提示するように設計されている。また、現状の TWISTER では運動視差による三次元空間の再構成は考慮されていないため、本研究では、撮像する映像の三次元性を満たすための条件として輻輳と両眼視差のみを考慮する。

次に自己投射性という条件について考慮する。没入型ディスプレイは利用者の広い視野を提示映像で覆うことで、利用者に没入感を与えている。利用者の頭部の向きに追従して、その方向の広い視野の映像を提示することにより自己投射性を満たすことが可能であるが、この場合は映像へのフィードバックにより遅延が生じ、実時間性を満たせない。一方、あらかじめ全周囲の映像を取得しておくことにより、利用者がどの方向を向いても実時間で映像を投影可能となる。したがって、システムは常に360[degree]の映像を没入型ディスプレイへの提示映像として生成しておけば良い。

三番目に実時間性という条件について考慮する。実時間性の条件はフレームレートの条件と遅延の条件に細分化できる。普段見ている実世界のような映像を生成するためには、映像中で滑らかな運動状態を再現する必要がある。そのためには、人間のコントラスト感度 [14] から、没入型ディスプレイに提示する生成映像を30[fps]以上のフレームレートで更新しなければならない。また、撮像システムを考える場合、撮像のフレームレートも30[fps]以上が必要となる。ただし、撮像のフレームレートは機械的な要因によるものであり、カメラの性能を吟味することにより解決できるので、本研究では主に生成映像のフレームレートについて考慮する。また、遠隔地とのインタラクションを行う場合、一般的に遅延は0.1[sec]程度であれば許容できると言われており [15]、本システムの遅延も0.1[sec]程度に抑えることを目標とする。

最後に実空間映像の再現性という条件について考慮する。空間の光線情報を欠落なく取得するためには、7次元の情報取得が理想的である [16]。しかしながら、そのあまりにも膨大な計算量のため、七次元の光線情

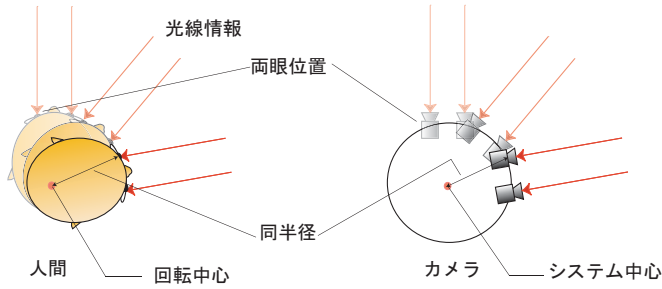


図3 提案する撮像原理.

Fig. 3 Proposed method of capturing optical information

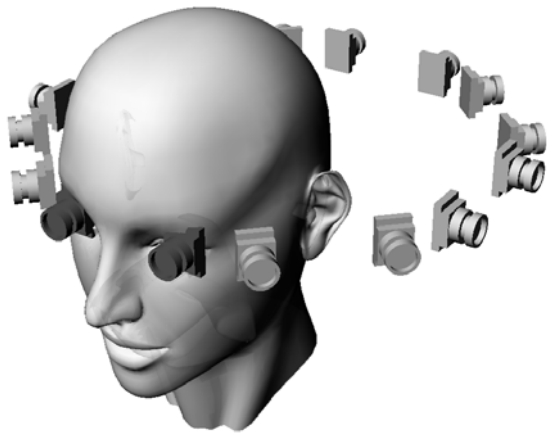


図4 提案するカメラ配置.

Fig. 4 Design concept of the camera system

報を取得することは非現実的である。現実的には、利用者の頭部位置を制限することにより二次元への射影が可能となるため、撮像システムの計算量を軽減できる。没入型ディスプレイの利用者の移動範囲が制限されていると仮定すると、撮像システムはその範囲内の光線情報を欠落無く取得すれば良い。

以上の議論から、システムの設計における目標パラメータをまとめると以下ようになる。

1. 輻輳および両眼視差の再現
2. 360[degree]の視野
3. 生成映像のフレームレート 30[fps]以上、撮像から提示までの遅延 0.1[sec]程度以下
4. 観察者の移動範囲における全光線情報の取得

2.2 全周立体撮像カメラの設計

TWISTERでは、利用者の頭部回転の軸を円筒ディスプレイの中心軸に想定しており、この中心軸から全周を見回した映像を提示している。これはちょうど利用者の視点が中心軸より離れた一定の円周上を移動することと等しい。したがって、全周立体撮像カメラは、頭部回転軸が固定されていると仮定した時の人間が周囲を見渡す様子を再現するように設計する。

TWISTERはHMDなどの頭部追従型ディスプレイと異なり、提示面が実空間内で固定されているため、本全周立体撮像カメラでは撮像面も固定されたもので十分であり、頭部に追従するような機械的回転運動機構は不要である。TWISTERにおいて擬似的な歩行を実現するインターフェースと組み合わせることで図1のように並進運動を行うカメラシステムも実現できるが、本稿では利用者の歩行は行われぬものとして考える。

まず、第1の設計パラメータである輻輳と両眼視差を再現することを考えると、人間の両眼(65[mm])の位置にカメラを配置することにより、各眼に対応した映像が取得できる(図3)。また、両眼カメラペアを頭部回転中心軸と両眼の位置関係を保存したまま全周に配置することにより、人間の頭部回転軸が固定されている時の360[degree]の映像が生成可能となる。これはちょうど半径105~115[mm]の円周上にカメラを配置することと等価である(図3)。なお、両眼カメラペアの配置方法は、1対のカメラペアを配置する方法と複数のカメラペアを配置する方法が考えられる。複数のカメラペアを配置する場合、観察物体の距離によって統合映像の接続点において不連続性が生じるが、カメラペア1対のみの場合、全周囲の映像を取得するためにカメラを回転させる必要があり、高いフレームレートを確保できない。したがってフレームレートを確保するために複数台のカメラペアを使用し(図4)、映像接続点の問題は別の方法で解決する。理想的には無限対のカメラペアを配置すれば全周囲に対して密な光線情報を取得できるが、現実的にはカメラが物理的な大きさを持つために、カメラ台数は制限される。

2.3 全周立体撮像カメラの試作

以上の設計により、全周立体撮像カメラを試作した(図5, 図6)。各カメラにはPoint Grey Research社製のFireflyMV(解像度640×480, フレームレート最大60[fps], 寸法25×40[mm])を使用し、焦点距離2.9[mm]レンズ(水平画角67[degree], 垂直画角53[degree])を装着した。光軸に対し90[degree]回転させて用いた(水平画角は53.2[degree]となる)。FireflyMVを用いると、最大8対のカメラペアを配置可能となった。

3 カメラシステムの機能設計と構築

没入型ディスプレイに提示する映像を生成するために、システム内に以下の機能を持つ映像処理ソフトを設計する必要がある。

1. 歪み補正
2. 位置・姿勢補正
3. 色補正
4. 映像合成処理

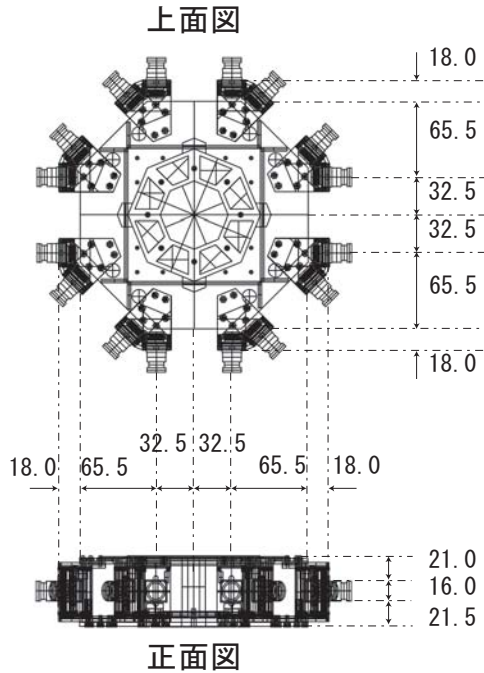


図5 試作カメラの寸法 [mm].
Fig. 5 Dimensional outline of the camera system



図6 試作した全周囲立体撮像カメラ.
Fig. 6 Prototype of the panoramic stereo camera

5. 座標変換

1~3は複数台のカメラの特性を一致させるために必要な処理であり、4は複数台のカメラで取得した映像をつなぎ合わせて360[degree]の一つの映像を生成する処理である。最後に、生成された映像は、没入型ディスプレイの形状によって座標変換を行わなければならない。TWISTERへ提示する場合には、円筒座標に変換する必要がある。

3.1 歪み補正

各カメラで取得した映像は各カメラが持つ内部特性によってレンズ歪みが生じる。カメラレンズの歪み補正はZhangら[17]によって簡便な補正方法が提案されており、本システムでもZhangによる手法を用いた。

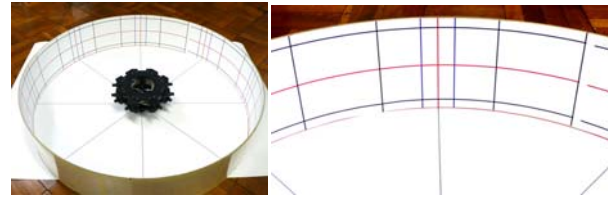


図7 位置姿勢補正用の円筒グリッド.
Fig. 7 Calibration pattern

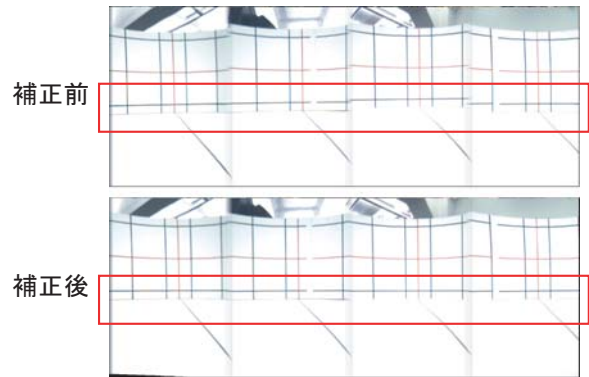


図8 位置姿勢補正前後の取得画像.
Fig. 8 Image of the correction of optical axis

3.2 位置・姿勢補正

設計したカメラ配置の光軸と実際のカメラ光軸は一致しないため、取得画像は各々で異なる位置と姿勢で撮像された結果となる。そこでカメラの位置姿勢を一致させるためにあらかじめ設計の段階で物理的に調節すると良いが、誤差は依然として残る。この小さな誤差に対して本論文ではカメラ取得映像の位置姿勢を映像の3×3の射影行列による射影変換によってキャリブレーションを行う。映像上の特徴点が理論的に位置する画像平面上の座標を(x,y)、実際にその特徴点が位置している座標を(x',y')とすると、式(1)の3×3の射影変換行列Pを求めれば良い。

$$(tx', ty', t)^T = P(x, y, 1)^T \quad (1)$$

この射影変換行列Pを求める手順は以下のようになる。

1. キャリブレーションパターンの理論座標を計算
2. 各カメラでキャリブレーションパターンを撮影
3. キャリブレーションパターンの画面座標を計測
4. 実測座標から射影変換行列を計算
5. 各カメラ映像を射影変換

本論文ではキャリブレーションパターンとしては円筒グリッドを使用する(図7, 左図は中心に全周囲立体撮像カメラを置き、格子点の計測をしている様子。右図は円筒グリッドの拡大図)。円筒グリッドは半径が494[mm]、高さ200[mm]のもので、この円筒グリッド

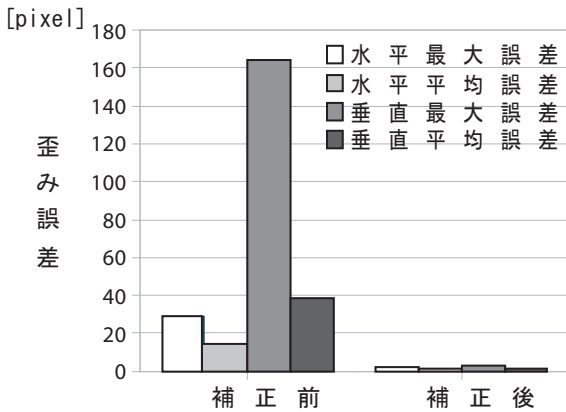


図9 位置補正前後の映像の水平垂直誤差.
Fig.9 Pixel error of the image

の格子点が本論文で使用する特徴点となる. この4点の特徴点から, 射影変換行列 P を求めた.

図8(上段が補正前, 下段が補正後), 図9に補正の結果を示す. 図8は複数のカメラで取得した円筒グリッドの画像が統合された様子を示しており, 赤線で囲まれた部分を見ると補正前は各カメラで撮影した水平線が一直線ではなく, 垂直方向に誤差があるが, 補正後では水平線の誤差が軽減されている. 図9のグラフを見ても, カメラ位置姿勢の補正を行った結果, 水平誤差と垂直誤差が小さくなっていることが分かる. なお, 最大水平・垂直誤差は8台のカメラで撮影したグリッド画像8枚における各4点の特徴点の位置誤差の最大値, 水平・垂直平均誤差は各特徴点の位置誤差を平均したものである.

3.3 色補正

各カメラでは CCD の色感度が異なるため, 画像間で色補正を行う必要がある. 色補正の手順は以下のようになる.

1. 各カメラでカラーチャートを撮影
2. 撮影したチャート画像の各色 RGB 値を計測
3. 各 RGB の理論値と実測値の関係をグラフ化
4. 各カメラの色特性を表す色直線を推定
5. 各カメラ画像の画素値を求めた色直線により変換

本論文ではカラーチャートに Gretag Macbeth 社製のカラーチャートを用いた. カラーチャートの撮影環境としては光源に岩崎電気社製の写真照明用アイランプ PRF100V 350WD (色温度 5,900[K]) を4つ使用し, 撮影するカラーチャートの周囲の明るさが 1,700[lx] になるように配置した (図10). 以上の環境下で各カメラによって同一のカラーチャートを撮像し, 生成画像からカラーチャートの各色に対する RGB 値を計測した.

色補正前後のカメラ画像は図11のようになった. こ

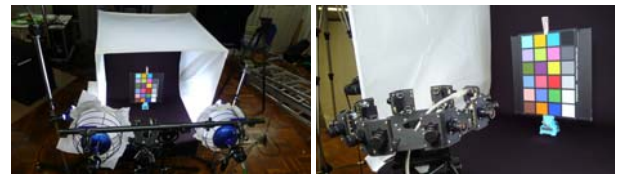


図10 カラーチャート撮影の様子
Fig.10 Snapshot of capturing the color chart

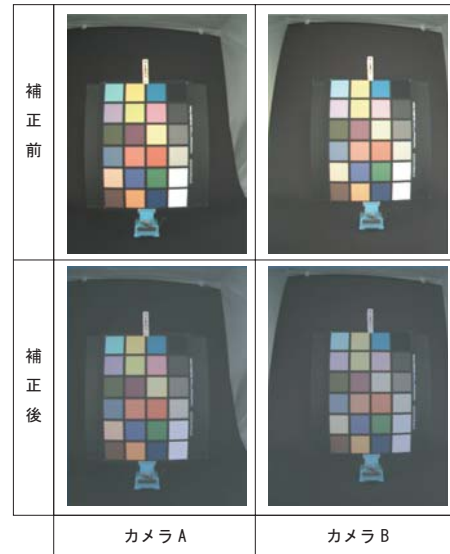


図11 色補正前後の画像.
Fig.11 Result of the color correction

ここでは色差の最も大きい2つのカメラ同士の色補正結果を示す. 図12には16台のカメラで取得した映像のカラーチャート (色:Natural3.5, R) の値を示す. 取得画像とグラフより, 補正後は補正前と比較してカメラ間の色値のばらつきが改善されている様子が分かる.

3.4 映像統合

各カメラについて撮像された映像を一つの全周囲映像に統合することを考える. 第2章で述べた映像接続点の不連続性の問題を改善するために, 本論文では映像境界でアルファブレンディングを施す. 各カメラは水平方向に 480[pixel] (53.2[degree]) の映像を取得するので, 中心の 396[pixel] を純粋な担当撮像領域 (45.0[degree]) として利用し, その外側にある 31[pixel] の領域をブレンディングした. このブレンディング領域はカメラの画角, カメラの解像度, 隣り合う同眼用のカメラの距離, カメラ中心から映像接続点が滑らかになる地点にある物体までの距離によって三角関数的に求められる. 本研究の場合, 映像接続点が 2[m] の位置で連続となるようにブレンディング幅を求めたところ 31[pixel] となった.

図14はブレンディング前後に取得した画像である.

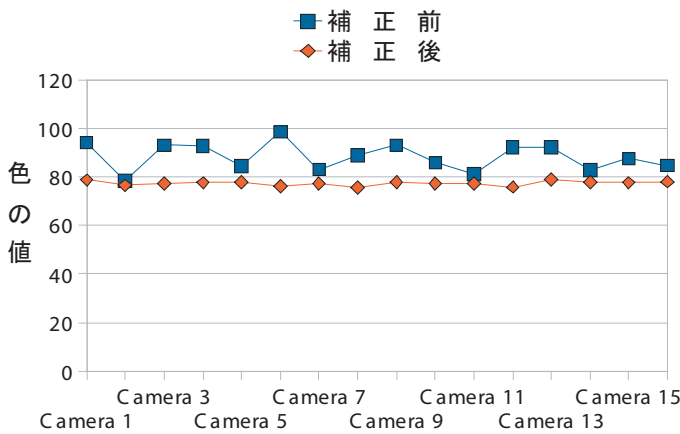


図 12 各カメラの色値.
Fig. 12 Color value of each cameras

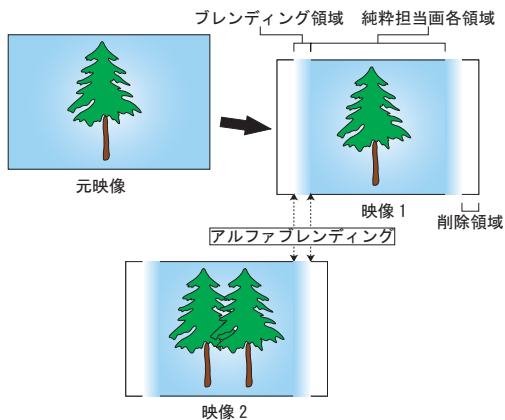


図 13 映像統合のためのブレンド方法.
Fig. 13 Blending method for image integration

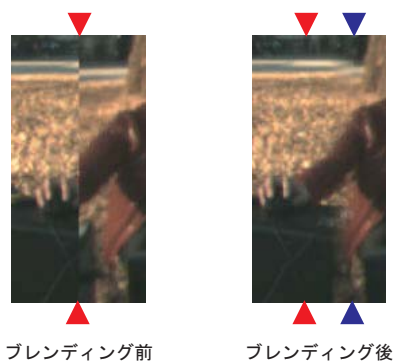


図 14 ブレンド前後の取得画像.
Fig. 14 Result of the blending method

ブレンド前の画像中の赤い三角形で指示された部分は映像接続点であり、ブレンド後の画像中の赤い三角形から青い三角形で指示された領域がブレンド領域である。ブレンドを施した結果、映像の接続点が目立たなくなっている。

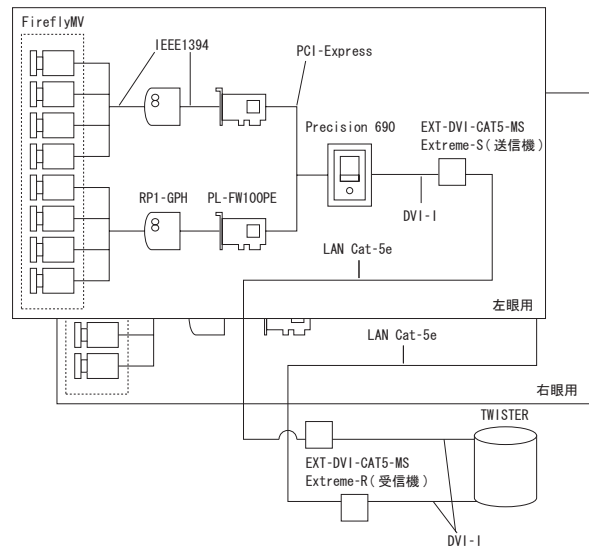


図 15 撮像システムの構成.
Fig. 15 Configuration of the proposed system

4 システムの実装と撮像結果

4.1 実装

以上の設計に基づき、全周囲立体撮像システムの実装を行った (図 15)。システムは右眼用カメラと左眼用カメラのそれぞれについて 8 台のカメラから転送されるデータを IEEE1394 リピータハブ (SANWA SUPPLY 社製 RP1-GPH) で集め、1 台の右眼/左眼用計算機 (Dell Precision 690, Intel Xeon 5130 (× 2), 2.00[GHz], DDR2ECC 3.25[GB], NVIDIA Quadro FX550) の IEEE1394 インタフェースボード (PLANEX 社製 PL-FW100PE) に繋ぐ極めて単純な構成となっている。本システムでは撮像システム側の右眼/左眼用計算機で生成した映像を遅延なく TWISTER へ転送するために、LAN ケーブル利用の DVI 延長機 (Gefen 社製 EXT-DVI-CAT5-MS) と 50[m] の Cat-5e LAN ケーブルを用いた。全周囲立体撮像システムの映像取得部分については、FireflyMV を標準でサポートしている PGR FlyCapture ライブラリを用いて実装し、全周囲立体映像生成システムについては、第 3 章の設計を基に OpenCV, OpenGL ライブラリで実装した。本システムは 2 台の計算機と 16 台のカメラを用いて全周囲を撮像するように設計したが、システムの性能を検証するためには 1 台の計算機に接続された 8 台のカメラで十分であるため、本章では半周分に相当する 8 台のカメラを用いた様子を示す。

4.2 フレームレートと遅延の測定

フレームレートは CPU が描画する 1 フレーム間の周波数を QueryPerformanceCounter 関数により測定した。撮像システム内部 (図 15 の FireflyMV から Preci-



図 16 試作システムによる撮像風景.

Fig. 16 Snapshot of using the prototype camera system

表 1 1 台の計算機での生成映像のスペック
Table 1 Specification of the processed image

水平画角	180.0[degree]×2
垂直画角	60.0[degree]
解像度	1584×600[pixel]×2
フレームレート	29~30[fps]
遅延 (撮像システム内部)	0.031~0.033[sec]
遅延 (システム全体)	0.10~0.14[sec]
左右映像の最大垂直誤差	6[pixel]
画像境界での最大垂直誤差	6[pixel]

sion690 まで)の遅延はカメラの撮像開始時点から全周囲立体映像を描画するまでの時間を同じく QueryPerformanceCounter 関数により測定した。また、風景を撮像してから TWISTER に提示するまで (図 15 の FireflyMV から TWISTER まで)の遅延を、撮影対象の観察物体と提示映像中の観察物体を同時にビデオカメラで撮影し、そのフレーム遅れを測定した。

4.3 撮像と提示

実装したシステムにより風景を撮像し、TWISTER への提示を行った。この時、カメラの高さは人間の眼の位置に設定した (図 16)。生成された映像のスペックは表 1 のようになった。フレームレートなどのパラメータは設計条件通りの数値が実現されている。また、撮像システムが全周囲立体映像を生成する遅延は 0.03[sec] 程度であり、撮像システム単体では非常に少ない遅延で機能している。撮像から提示までは最大 0.14[sec] かかるが、これはビデオカードの出力から画像表示部において生じている遅延の影響を受けるためである。最後に、360[degree] の映像を生成可能であるか検証するために、180[degree] 毎に異なる時間で撮像した両眼映像を統合し、360[degree] の映像を生成した。本システムでは、TWISTER の解像度に相当する 3168 × 600[pixel] の映像が生成された (図 17)。

生成映像を実際に TWISTER へ提示し (図 18)、14 人の 20~30 代男性の利用者に対して口頭による自由形式のアンケートを行った。質問の内容としては「立体視や画像の質」「改善すべき点」についての感想を



図 18 TWISTER への映像提示.

Fig. 18 Snapshot of displaying on TWISTER

尋ねた。その結果、立体視の成立を被験者全員に対して確認できた。また、自然で綺麗な映像を生成できているという回答も得られた。したがって、画像の実現スペックと合わせて考えると、提案した撮像システムは設計方針を全て満たしていると考えられる。

5 考察

システムを実装し、TWISTER に利用した結果、生成映像のスペックと利用者からの感想により、本システムの設計方針を全て満たしていることが分かった。すなわち、本システムによって撮像された映像は、三次元性を立体視可能、自己投射性を 360[degree] の視野、実時間性を 29~30[fps] および遅延 0.1[sec] 程度 (撮像システム単体では 0.03[sec] 程度)、実空間映像の再現性を全ての方向の光線情報を取得することを達成できている。このことにより、利用者はまるで、その場所に没入しているような感覚を得ることが可能となった。本研究では DVI 延長機によって DVI 信号を延長可能な範囲でシステムを実装したが、撮像装置と提示装置を DVI の延長限界を超えた遠距離での接続が必要な場合には DVI 信号を光ファイバまたは LAN 経由で通信する必要がある。あらかじめ決められた者同士通信の場合には光ファイバで直接つなぐ方法があり、DVI 信号を光ファイバに変換して再び DVI に変換することで追加の遅延は発生しない。一方、不特定多数の相手と通信する場合には、インターネットを経由する方法が考えられる。この方法において発生する遅延はネットワークの特性や画像圧縮方法によって大きく変化するが、近年では高解像度映像の通信技術が発展しつつあり、今後解決可能な課題であると考えられる。

アンケートを行った際の興味深い回答として、「TWISTER ですぐ目の前に人がいるにも関わらず、インタラクションを行えないために非常に疎外感を感じた」、「人が動いた時に書割効果が軽減されてい

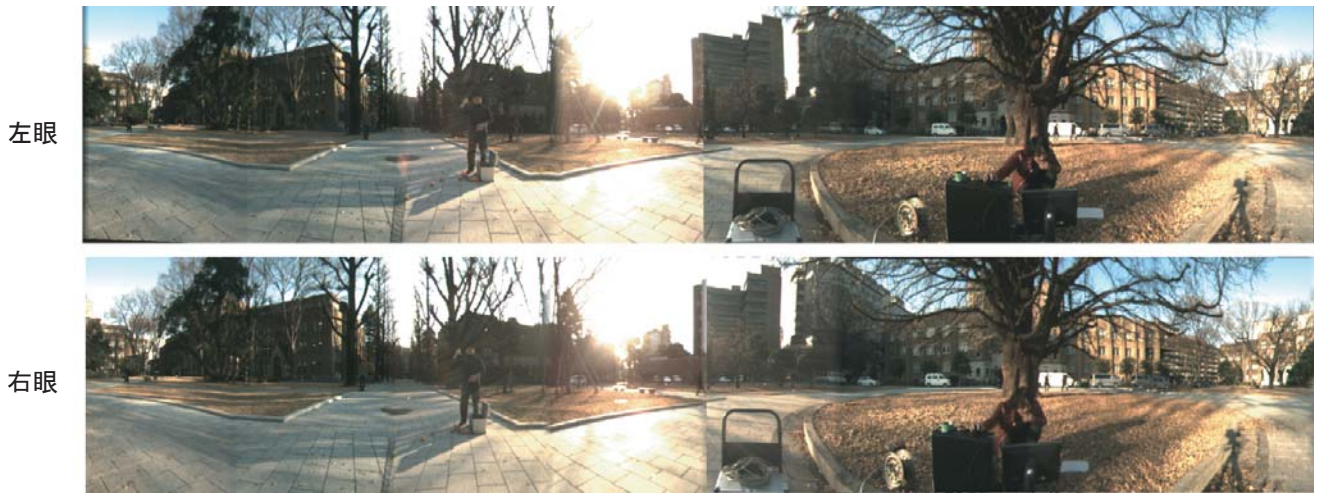
$\theta = 0[\text{degree}]$ $\theta = 360[\text{degree}]$ 

図 17 試作システムによる撮像結果.

Fig.17 Processed 360° stereoscopic video image

る」といった回答を得た。「TWISTER ですぐ目の前に人がいるにも関わらず、インタラクションを行えないために非常に疎外感を感じた」については、今回 TWISTER から外部環境へのインタラクションを行うシステムを実装していなかったために得た回答であり、利用者はバーチャルにその場にいるにも関わらず、相手とのインタラクションを行えないもどかしさを感じていると考えられる。逆説的に言えば、利用者は実際にその場の状況内に没入している感覚を得ていることを意味しており、本システムによって視覚的にテレグジスタンスが実現されている様子が伺えた。同時に TWISTER からインタラクションを行えるシステムを実現する必要性があることが確認できた。

書割効果とは映像中の物体が舞台に並べられた背景のような書割に見える現象であり、静止画で立体視を行うときに生じることが知られている。その原因は様々な要因が考えられるが、一つには運動視差の欠如によって生じると言われている [18]。したがって、動画では相対的な運動視差が生じ、書割効果が軽減されることが期待されるが、「人が動いた時には書割効果が軽減される」というコメントによって、まさに期待していた動画撮像による運動視差の再現が確認されたと言える。

本システムの最も大きな課題として挙げられるのは、各カメラ同士の映像接続に対する処理である。図 17 における片眼映像のみを眺めると映像接続点は自然に統合されているかのように見える。しかし、立体視を行った際にはこれらの映像の境界において立体感が減

衰し、谷のように映像が吸い込まれるように見える、という感想を得ている。本手法においてはカメラの台数が増えると映像の境界も増えるため、カメラを増やすことは立体感が減衰する領域を増やすことに繋がる。一方カメラ数を少なくするとカメラ画角の周辺部での映像の幾何学的な歪みが大きくなり、映像境界での誤差が大きくなる。つまり、立体感が減衰する領域の数と各映像境界における幾何学誤差のトレードオフが起こるため、今後は幾何学誤差の許容量を検討するとともに、このトレードオフを考慮して最適なカメラ台数を設計することを目標とする。

本研究では、空間内での他者とのコミュニケーションと、遠隔地の風景の撮影という主に 2 つの応用に重点を置いたが、コミュニケーションに関しては、他者との会話において表情や細かいジェスチャーの取得が必要なのは 1~3[m] 程度の範囲であると考えられる。なぜなら、3[m] 以上の距離でのコミュニケーションでは細かい仕草を視覚的に捕らえ辛いことや、普段の会話では 1~3[m] の距離でのコミュニケーションが主体となるからである。本システムではカメラ中心から 2[m] の近傍において映像の誤差が最小となるようにブレディング幅を設定し、1~3[m] においては十分な画質で相手の表情を伝達できることが確認された。これは体験者が疎外感を感じたと答えたことから、体験者が映像中の人物の雰囲気や感情などを読み取れていることから分かる。1[m] より近い範囲においては情報の欠落が生じ実用的な画質を保つことができないが、本システムの用途においてはそれほど近づくことは稀で

あると考えられる, また 3[m] 以上の遠距離においては, 情報の重複が生じブレンドによりそれを緩和するため, 映像のブレや本来あるべき提示位置からの誤差が発生し, これが立体感の減衰を生んでしまっている. しかしながら遠くの風景を眺めるといった用途においては現状でも実用上それほど問題は生じず, 今後映像合成手法の改善を行い立体感の向上を図ることで, より広い範囲において臨場感の高い環境を実現できると考えられる. 例えば Shum ら [19] において本研究に適用可能なマッチング方法が提案されており, これらの方法を本システムに適用することが有効であると考えられる.

6 まとめ

本論文では, テレイグジスタンスの条件を全て満たすことができる撮像システムを提案, 設計し, 360[degree]の両眼立体映像を 30[fps], 遅延 0.1[sec] 程度で撮像可能なカメラシステムを実現した. さらに, 本システムで生成された映像を TWISTER に提示したところ, 視覚的なテレイグジスタンスが可能なことが示された. 本システムは今後, 遠隔操作によって外部とのインタラクションを可能とする装置との統合により, コミュニケーションシステムへの発展が可能であると考えられる.

参考文献

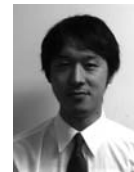
- [1] S.Tachi and H.Arai, "Study on Tele-existence(II)-Three Dimensional Color Display with Sensation of Presence-," Proceedings of the '85 ICAR(International Conference on Advanced Robotics), pp. 345-352, 1985
- [2] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, Thomas A. DeFanti, "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality : The Design and Implementation of the CAVE," ACM SIGGRAPH 93, pp.135-142, 1993.
- [3] Yutaka Kunita, Naoko Ogawa, Atsushi Sakuma, Masahiko Inami, Taro Maeda, and Susumu Tachi, "Immersive Autostereoscopic Display for Mutual Telexistence: TWISTER I (Telexistence Wide-Angle Immersive STEReoscope Model I)," Proceedings of IEEE Virtual Reality 2001, Yokohama, Japan, pp. 31-36, 2001.
- [4] S.Tachi, "TWISTER: Immersive Ominidirectional Autostereoscopic 3D Booth for Mutual Telexistence," ASIAGRAPH TOKYO 2007 PROCEEDINGS, pp1-6, 2007
- [5] 館 暉, "ロボットから人間を読み解く", 日本放送出版協会, 東京, 1992
- [6] T.Kawanishi, K.Yamazawa, H.Iwasa, H.Takemura, N.Yokoya, "Generation of high-resolution stereo panoramic images by omnidirectional imaging sensor using hexagonal pyramidal mirrors," Proc. of the 14th IAPR International Conference on Pattern Recognition (ICPR'98), Vol. I, pp. 485-489, Aug, 1998.

- [7] H.Tanahashi,K.Yamamoto,C.Wang,Y.Niwa, "Development of a Stereo Omni-directional Imaging System(SOS)," Proc. IEEE IECON-2000, pp.289-294,2000
- [8] M. Hirose, K. Yokoyama, and S. Sato, "Transmission of realistic Sensation :Development of a Virtual Dome," Proc. VRAIS'93, pp.125-131, 1993.
- [9] S.K. Nayar, A.D. Karmarkar, "360×360 mosaics: regular and stereoscopic," Panoramic vision: sensors, theory, and applications, pp.291-307, Springer-Verlag New York, Inc.2001
- [10] S. Peleg, M. Ben-Ezra, and Y. Pritch, "OmniStereo: Panoramic Stereo Imaging," IEEE Trans. on PAMI, pp.279-290, 2001.
- [11] K.Tanaka, S.Tachi, "TORNADO: Omnistere Video Imaging with Rotating Optics," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.11, No.6, pp.614-625, 2005.
- [12] 石川, 山澤, 横矢, "複数の全方位動画像を用いた自由視点テレプレゼンス", 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 10, pp. 1599-1610, 2006.
- [13] 長田昌次郎, "視覚の奥行き距離情報とその奥行き感度", テレビジョン学会誌, Vol.31, No.8, pp.649-655, 1977
- [14] 映像情報メディア学会編, "電子情報ディスプレイハンドブック", 培風館, 東京, 2001
- [15] J.M.Stroud, "The fine structure of psychological time," Information theory in psychology, New York, 1956
- [16] E.H.Adelson and J.R.Bergen, " The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision , " in Computational Models of Visual Processing (Landy and Movshon, Eds.), MIT Press, pp.3-20, 1991
- [17] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 , pp. 1330-1334, 2000
- [18] 原島博, 元木紀雄, 矢野澄夫, "3次元画像と人間の科学", オーム社, 2000
- [19] H.Y. Shum, R. Szeliski, "Construction of Panoramic Image Mosaics with Global and Local Alignment," Panoramic vision: sensors, theory, and applications, pp.227-268, Springer-Verlag New York, Inc.2001

(2008年3月19日受付)

[著者紹介]

加藤 伸明



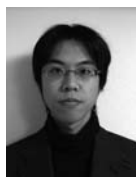
2006年大阪大学基礎工学部システム学科卒業. 2008年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程卒業. 現在に至る.

城 堅誠 (学生会員)



2007年東京大学工学部計数工学科卒業. 現在, 同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程在学中. パーチャルリアリティ, 拡張現実感の研究に従事.

南澤 孝太 (学生会員)



2005 年東京大学工学部計数工学科卒業。2007 年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年同専攻博士課程進学，日本学術振興会特別研究員 (DC1)。ハプティックインタフェース，テレグジスタンスシステムの研究に従事。2007 年日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。

新居 英明 (正会員)



1995 年東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程制御工学専攻修了。同年株式会社トキメック入社。2003 年 4 月同社退社。2003 年から 2006 年まで電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻在籍。現在，東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助教。情報投影技術を利用したヒューマンインタフェースの研究に従事。

川上 直樹 (正会員)



平 8 東工大・理工・電気電子修士課程修了。平 11 東大・工・先端学際工博士課程修了。工学博士。同年東大院・工・計数工助手，平 14 東大院・情報理工・システム情報学専攻講師。バーチャルリアリティの研究に従事。

舘 暲 (正会員)



昭 43 東大・工・計数卒。昭 48 同大大学院博士課程修了。工学博士。同年同大助手。昭 50 通産省工技院機械技研研究員，マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て，平 1 東大先端科学技術センター助教授，平 4 同センター教授，平 6 同大・工・計数工教授，平 13 同大大学院・情報理工・システム情報学専攻教授。テレグジスタンス，人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞，通産大臣表彰，国際計測連合 (IMEKO) 特別功労賞，IEEE-VR Career Award など受賞。IMEKO ロボティクス会議議長，計測自動制御学会会長，日本バーチャルリアリティ学会初代会長。