

自由視点映像 3次元スタジアムの構築

北原 格

筑波大学 先端学際領域研究センター
〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

1. はじめに

現実世界の出来事を時間と空間を越えて伝達する映像メディアは、映画やTVとして我々の生活に欠くことのできないものとして浸透している。しかし、現実世界では当然許されるはずの“観る位置の選択の自由”の実現は、技術的に非常に難しい問題である。近年のコンピュータやネットワークの高速化、記録デバイスの大容量化を背景として、自由視点映像メディアの実現が射程範囲に入りつつあり、複数のビデオカメラで撮影した映像を統合して仮想化現実空間を構成し、その情報を用いて臨場感の高いコミュニケーションを実現しようという研究が、活発に行われている^{1,2)}。我々は1999年から、この自由視点映像メディア技術をスタジアムやイベントホールのような大規模空間に適用し、そこで開催されるスポーツ中継やコンサートといったダイナミックなイベントの自由視点映像の生成・提示に関する研究開発を進めている^{3,4)}。本稿では、現実のスタジアムにカメラを設営した大規模な撮影実験と、それを通じて獲得した実用化のために要求される開発課題、および我々の取組みについて紹介する。

2. 大規模空間における自由視点映像の撮影・加工・提示

図1に示すように、自由視点映像の撮影・加工・提示技術を大規模空間で行われる動きのあるイベントに適用することで、“自由視点サッカー中継”や“自由視点リサイタル DVD”など、まったく新しい映像メディアが創出されることが考えられる。しかし、そのためには、室内

規模の空間を対象とした従来研究では、それほど問題とならなかった以下の課題を解決しなくてはならない。

2.1 大規模空間における多視点映像撮影

自由視点映像の生成には、正確な3次元形状推定が必要である。そのためには、動きブレが発生することがなく、かつ、完全に同期した多視点映像を撮影する必要がある。また、個々のフレームの撮影時刻の特定ができれば、推定処理を効率よく行うことができる。しかし、それらの同期信号やタイムコードを、大規模空間中に点在するカメラやタイムスタンプに供給すること自体、非常に困難な試みである。さらに、大規模空間では、撮影用カメラやコンピュータをその場に行って調整することが困難であるため、それらを遠隔操作により設定可能なシステムの開発も必要である。

2.2 カメラキャリブレーション

3次元シーンの座標系と個々のカメラの座標系の関係を求めるためには、シーン中の点の3次元座標値とその点の画像上での観測位置の組み合わせが多数必要である。そのため、3次元座標値

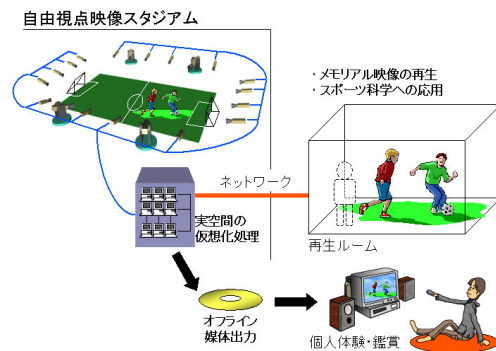


図1 大規模空間における自由視点映像スタジアム。

が既知の多数のランドマークを対象空間中に配置し、それらの画像上での観測位置の検出を行う。このとき、3次元座標値の精度がキャリブレーションの結果に大きな影響を及ぼすため、非常に正確な3次元座標値計測手法の開発が必要である。

2.3 大規模空間における物体の3次元形状表現手法

観察者の視点移動を実現するためには、対象物体の見え方(解像度)の変化を再現する必要がある。従来の研究では、十分に高精細な空間分解能を持つ3次元形状モデルを用意して、解像度の変化に対応していた。しかし、大規模空間では、観察者視点の移動可能範囲が広大になり、結果として非常に大きな解像度の変化を再現する必要がある。さらに、大規模空間中には、はるかに多くの物体が存在するので、それらすべてを高精細3次元形状モデルで記述するためには、膨大な計算・データ量が必要になる。

以下では、これらの開発課題に対する我々の取組みについて紹介する。

3. 大規模空間における多視点映像撮影

本研究では、スタジアム規模の超大規模空間において、完全に同期し、タイムコードの付いた多視点デジタル映像を実際に撮影することを大きな特徴としている。撮影システムの設計だけでなく、数日間の実験期間中に膨大な機器を設置し調整するためのノウハウの蓄積は貴重である。

対象とする大規模空間として、研究構想段階から、図2に示す大分スタジアムをターゲットとして取上げた。このスタジアムは、大分県が建設を進めている大分スポパーク21のメインスタジアム(愛称ビッグアイ)であり、竹中工務店が施工し2001年3月に完成した。2002年6月に開催されたFIFAワールドカップの会場として使用されたので、TVを通じてご覧になられた方も多いことと思う。

スタジアムとしては珍しく、ドーム状の開閉可能な屋根付きの構造になっており、屋根を支

えるためのトラスが縦横に張られている。トラスの内部はキャットウォークになっており人間が上って作業をすることは、比較的容易である。したがって、本研究で必要となる多数のカメラを設置することが可能であり、しかも、フィールドの真上にカメラを設置することもできるなど、絶好の実験空間であると考えられる。

図3に大規模空間での撮影のために構築した多視点映像撮影システムの構成を示す。カメラはすべてプログレッシブスキャン3CCDカメラ(ソニー DXC-9000)である。各カメラには同期信号発生器から共通の外部同期信号を供給している。プログレッシブスキャンカメラの使用と外部同期信号の供給により、デジタル化された各フレームは、インタレースのよる動きブレが発生することがなく、かつ、完全に同期した多視点映像となっている。さらに、LTC(Longitudinal Time Code)発生器によって生成されたタイムコードをタイムスタンプ(TS)でVITC(Vertical Interval Time Code)に変換した後、ビデオ信号



図2 大分スタジアム(ビッグアイ)。

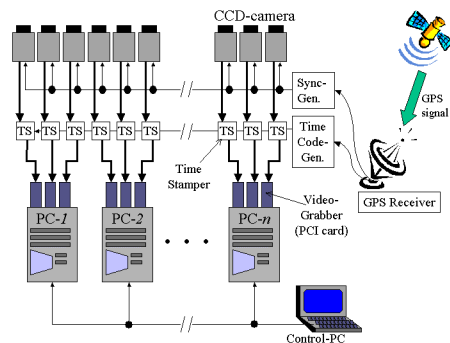


図3 大規模空間多視点映像撮影システム。

の垂直ブランク領域に書き込むことで、個々のフレームの撮影時刻の特定が可能である。なお、同期信号とタイムコードは、GPSの電波を受信して取得した標準時によって生成しているため、仮に、同期信号やタイムコードを配信するためのケーブルの敷設が困難な大規模空間であっても、完全に同期した映像信号をタイムコード付きで取得することができる。タイムコードを書き込んだ映像信号は、ビデオ取込み用PCに装着された画像ボードにより、PCのメモリ上にデジタルカラー画像としてフルサイズ(640×480画素)、ビデオレート(毎秒30フレーム)で取込まれる。

撮影システムの制御はすべて、システム制御用PCからEtherネットワーク経由で行われる。このように、取込み用PCと制御用PCが独立したシステム構成であるため、カメラやPCの増減設が容易に行える。カメラとその映像を取込むPCは近くに配置され、信号が劣化しやすいアナログビデオ信号は短いビデオケーブルで伝送される。一方、各カメラ間の距離は、Etherケーブルの最大延長可能距離によって決定されるが、上述のように、このケーブルには時間的制約の大きな信号が流れないため、ハブなどによる中継や、光ケーブル伝送を用いれば、ほとんど無制限と考えてよい。

DXC-9000は、RS-232Cシリアル通信によって、カメラ本体の設定とズーム・フォーカスの制御が遠隔制御可能である。我々は、イーサネットを介してRS-232Cの通信を透過的に中継するシステムを開発し、システムの制御用PCに接続したカメラコントローラから、大規模空間中すべてのカメラの設定ができるようにしている。

4. カメラキャリブレーション

3次元シーンの座標系と個々のカメラの座標系の関係を求めるカメラキャリブレーションが、自由視点映像の生成には必要である。正確なカメラキャリブレーションには、シーン中の点の3次元座標値(X, Y, Z)とその点の画像上での観測位置(u, v)の組み合わせが多数必要である。し

かし、撮影対象が大規模空間の場合、正確な3次元座標値が既知であるランドマークを空間全体に配置するのは非常に困難である。一方、3次元座標値の測定誤差は、キャリブレーションの精度に大きな影響を与えられられる。

我々は、土木建築分野で用いられている高精度3次元測量器(トータルステーション:ソキアNET2)と移動可能なキャリブレーションボードを併用して、ランドマークを効率よく設置することを可能にし、この問題を解決した。

具体的には、図4に示すようなキャリブレーションボード上の格子点をランドマークとし、ボードを撮影範囲となる空間全域を移動させながら、ボード上に設定した基準点の3次元座標値を測量器で測定する。剛性の高いキャリブレーションボードを使用しているため、キャリブレーションボードの歪みは無視することができる。そのためボード上の個々の格子点(ランドマーク)について3次元座標を測定する必要はなく、最低3点の基準点の測定値からすべてのランドマークの3次元座標値を求めることができ、測定作業を効率よく行うことができる。さらに、このキャリブレーションボードの向きや位置(水平、垂直方向)は、調整用機材の配置により自由に変化させることが可能であるため、カメラキャリブレーションの対象となる空間全体において、正確な3次元座標を測定することができる。

このように、本手法はキャリブレーションボードを3次元空間全体に移動させながら、その3次元座標を高精度で測定するため、仮想的に巨

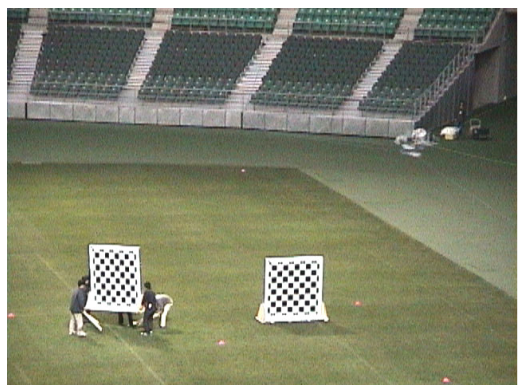


図4 キャリブレーション風景。

大なキャリブレーションボードを用いたのと同等の測定が可能であり，大規模空間への拡張性が高い。

5. 大規模空間における物体の3次元形状表現手法

大規模空間を対象とした自由視点映像を生成・提示する場合，観察者の視点移動可能範囲もまた広大になる．その結果，生成映像上での対象物体の見え方は，図5に示すように，近距離で観察した高精細なものから，遠距離で観察した低解像度のものまで幅広く変化する．

従来の研究，例えば Kanade らの Virtualized Reality システムでは，3次元物体（人物）の形状を数万個の三角形ポリゴンで表現している¹⁾．このシステムのように対象空間の大きさが直径5m程度であれば，対象物体数は高々1，2個に限られるため，十分に高精細な3次元形状モデルを用意して，観察者の視点移動に対応することが可能である．しかし，大規模空間には，はるかに多くの物体が存在するため，それらすべてを高精細3次元形状モデルで記述するためには，膨大な計算・データ量が必要になる．また，せっかく高精細3次元形状モデルを生成したとしても，図5上段のように観察距離が遠い場合には，その情報量のごく一部しか対照物体の見え方生成に利用されない．

最近のコンピュータビジョン研究の流れとして，「コンピュータビジョンシステムと外界との系の中に人間が必須の要素として加わった形で系全体を考える」ことが提唱されている⁵⁾．この

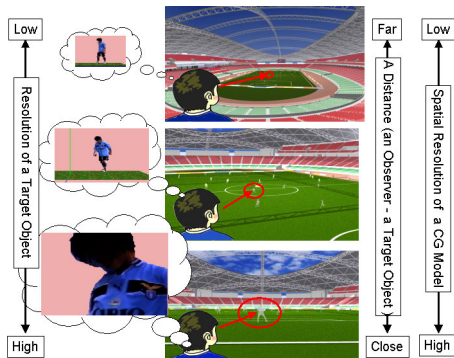


図5 観察距離と3次元モデルの空間分解能の変化。

流れに沿って自由視点映像の生成・提示を考えた場合，単に多視点映像を融合して3次元モデルを生成するだけではなく，最終的な情報の消費者である人間（観察者）への提示を前提として，データ生成処理を行う必要があると考えられる．

我々は，観察者に提示する映像を生成するために必要な3次元情報について検討し，その一つの表現手法として，図6に示す断面の集合で3次元形状を表現する手法を採用する．3次元空間と多視点映像との座標変換を2次元射影変換で表すことが可能であり，処理の高速化が可能と

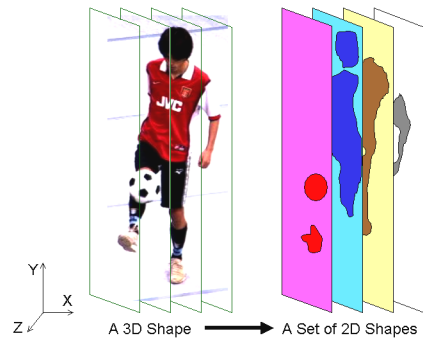


図6 断面集合による3次元形状表現。

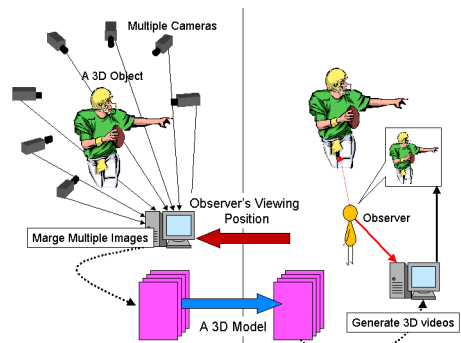


図7 自由視点映像生成方式（インタラクティブ方式）。

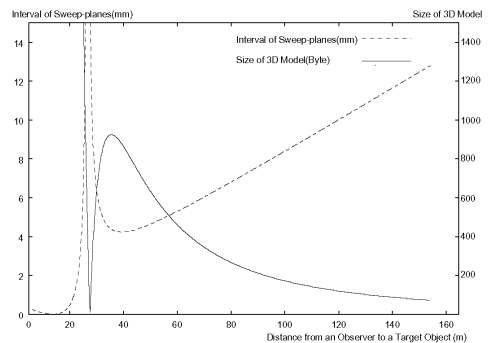


図8 観察距離と平面間隔・データ量の関係。

いう特長がある⁶⁾。

図7に示すように、観察者視点、多視点カメラ、対象物体の相対的な位置関係により、この断面群をインタラクティブに配置する、具体的には、平面の向き、平面の空間分解能、平面の間隔を調整することで、提示映像を生成するために必要な最小限のデータ量で3次元形状を表現する。このことにより、無駄な計算・データ量の削減が可能になる⁷⁾。

図8は、観察距離を5mから150mまで変化させたときに、本手法を用いてインタラクティブに3次元形状表現を変更した結果(左軸:平面間隔, 右軸:3次元形状を表現するために必要なデータ量)である。このとき、シーンを撮影する多視点カメラは、対象物体から約25mの位置に設置してある。観察距離が25mのとき、観察者視点とシーンを撮影した多視点カメラが最接近し、その付近では3次元形状の精度が生成される自由視点映像の画質に与える影響が小さくなるため、平面間隔が急激に大きくなり、データ量

が小さくなる現象が起きている。観察者視点と多視点カメラの位置が完全に一致した場合、3次元形状は1枚の平面で表現が可能になり、平面間隔は無量大になる。

図9は、25m, 50m, 150mからの観察を想定して平面を配置した3次元モデルを用いて生成した自由視点映像である。図の上段は150m離れた観察者に提示することを前提として生成した自由視点映像である、中段は、50m, 下段は25mの観察距離を前提としたものである。また、左列から順に150m, 50m, 25m離れた視点においてレンダリングした画像である。この場合の生成画像の空間分解能は、各々、4.3cm, 1.3cm, 0.2cmとなる。

図8, 図9から、各観察距離に対して適切な3次元モデルが生成され、特に、遠距離から観察を行う場合は、生成画質を維持しつつ大幅なデータ量の削減が可能であることがわかる。

6. 自由視点映像の実時間生成実験

前節で提案する3次元形状表現手法による実時間自由視点映像生成提示システムを1台のPC(CPU: Intel Pentium4 2.8 GHz, ビデオボード:

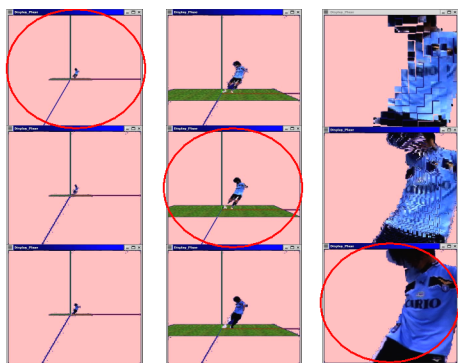


図9 自由視点映像生成結果(平面配置時に想定した対象物体から観察者視点までの距離上段150m, 中段50m, 下段25m/レンダリング時の対象物体から観察者視点までの距離:左列150m, 中列50m, 右列25m/生成画像の空間分解能:, 左列4.3cm, 中列1.3cm, 右列0.2cm)。

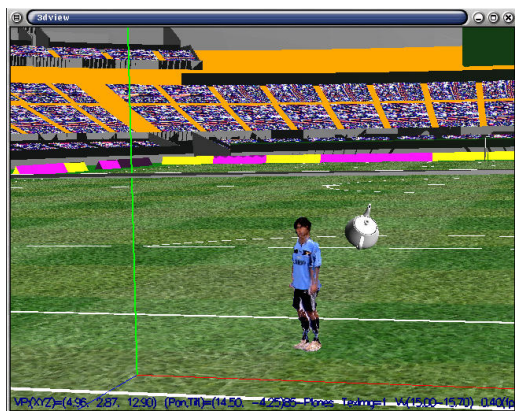


図10 自由視点映像生成提示システム出力例. 大分スタジアムのCADモデルにより背景領域を生成。



図11 自由視点映像生成例. 生成フレームレート平均毎秒15フレーム. 観察者から物体までの距離が±25(m)の地点において観察者視点をX=4.7(m)から-1.5(m)まで移動。

nVidia GeForce4-MX, メモリ 1 GB) 上に構築した。図 10, 図 11 に生成された自由視点映像の例を示す。図 10 は, 大分スタジアムの CAD モデルを用いてレンダリングした背景領域と対象物体の自由視点映像を合成した結果である。3次元形状平面を仮想的に 3次元空間中に配置するため, 汎用的グラフィックスエンジンにより, 他の CG モデルとの隠蔽処理を高速に行うことが可能である。図 11 は, 対象物体 (サッカー選手) の前後 25 m の距離において, 観察者視点を左右に約 6 m 移動させた場合の観察者視点映像である。入力多視点映像と同レベルの空間解像度を再現することで, 選手のユニホームの背番号が読み取れる鮮明な映像が生成されている。これらの実験を通じたシステムの動作速度は, 3次元形状の空間分解能に依存するが, 最大毎秒 25 フレームの処理が可能である (平均毎秒 10 フレーム程度)。入力多視点映像の空間解像度を損なわないようするために, 入力多視点映像の画像サイズは 640 × 480 画素としている。

7. まとめ

仮想化現実技術による自由視点映像スタジアムの構築を目指した我々の取組みについて紹介した。現実のスタジアムにカメラを設営した大規模な実証実験を通じて獲得した, 多視点映像の撮影, カメラキャリブレーション, 3次元形状表現手法, といった大規模空間化に伴う課題と, それらに対する我々の取組みについて述べた。実際に 1 台の PC 上で構築した実時間生成提示システムにより提案手法の有効性を確認した。他にも, 可動カメラを使用して必要なシーン・領域を選択的に撮影する技術や, その映像を利用した生成映像の高画質化, カメラキャリブレーション手法のさらなる簡略化, 屋外の変りやすい天候にも対応可能なロバストな 3次元形状推定手法, ネットワークによる仮想化情報の配信など, システムの実用化に向けた研究課

題は山積している。

2002 年 1 月と 11 月に大分スタジアムで行った撮影実験では, 我々が開発した撮影・キャリブレーションシステムが, スタジアム規模の空間でも問題なく動作することを確認できた。最後に, 本プロジェクトの撮影実験は, 共同で行った研究コンソーシアムの方々の協力で成り立っている⁸⁾。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) T. Kanade, P. W. Rander, S. Vedula and H. Saito: virtualized reality: Digitizing a 3D time-varying event as is and in real time. *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed Reality*, 41-57, 1999.
- 2) 松山隆司: 3次元ビデオ映像の生成・編集・表示. *画像ラボ*, 13, No.1, 16-19, 2002.
- 3) I. Kitahara, H. Saito, S. Akimichi, T. Ono, Y. Ohta and T. Kanade: Large-scale virtualized reality. *IEEE CVPR2001 Technical Sketch*, 2001.
- 4) 北原 格, 大田友一, 斎藤英雄, 秋道慎志, 尾野徹, 金出武雄: 大規模空間における多視点映像の撮影と自由視点映像生成. *映像情報メディア学会誌*, 56, 1328-1333, 2002.
- 5) 大田友一: 3次元映像メディアとコンピュータビジョン: ロボット技術としての CV からメディア技術としての CV へ. *情報処理学会誌*, 37, 981-986, 1996.
- 6) R. T. Collins: A space-sweep approach to true multi-image matching, *Proceedings of IEEE CVPR96*, 358-363, 1996.
- 7) 北原 格, 大田友一: 大規模空間を対象とした自由視点映像生成のための 3次元形状表現手法. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 7, 177-184, 2002.
- 8) 太田友一: 仮想化現実技術による自由視点 3次元映像スタジアムプロジェクト. <http://www.image.esys.tsukuba.ac.jp/virtualized/>.