

球面座標系における時空間画像解析による 複数カメラの外部キャリブレーション

三上 武志[†] 小野晋太郎^{††} 川崎 洋[†] 池内 克史^{††}

[†] 埼玉大学 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{††} 東京大学 〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: [†]{mikami,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}{onoshin,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本論文では複数台のカメラを対象として、球面座標系へ投影した画像から生成される時空間画像の解析を通してカメラ間の外部キャリブレーションを実現する手法を提案する。球面に投影された画像は、カメラ原点周りの回転に関してその見え方が不変であるため、その画像から生成される時空間画像も同様に原点周りの回転に関して形状が不変となる。そこで、複数の時空間画像に対してボリュームマッチによる位置合わせを行えば、カメラ間の外部パラメータや同期パラメータを効率的に求めることができる。本手法を利用すれば、自由に配置された複数カメラ間の外部パラメータをキャリブレーションパターン等を用いることなく獲得することができ、その結果、特殊な装置を用いることなくひずみのない全方位画像列を生成することができる。

キーワード 時空間解析, 球面投影, カメラキャリブレーション, 画像統合, 全方位画像

Multiple video camera calibration by space-time analysis in spherical coordinates system.

Takeshi MIKAMI[†], Shintaro ONO^{††}, Hiroshi KAWASAKI[†], and Katsushi IKEUCHI^{††}

[†] Saitama University Shimo-ohkubo 255, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

^{††} The University of Tokyo Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

E-mail: [†]{mikami,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}{onoshin,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract This paper introduces a novel method of multiple video camera calibration by space-time analysis in spherical coordinates system. One of the properties of space-time representation in spherical coordinates system is that the shape of a space-time volume, generated from a sequence of projected camera images, becomes invariant in relation to rotation around the origin of the sphere. Therefore, by registering the multiple space-time volumes which can be easily achieved by block-matching technique, extrinsic parameters and synchronous parameters of video cameras are simultaneously acquired. By using our method, multiple video images can be successfully integrated into distortion-free omni-directional video without a calibration process.

Key words Space-time Analysis, Spherical Projection, Camera Calibration, Image Fusion, Omni-directional image

1. はじめに

時空間画像の解析は、物体の3次元形状復元やカメラの位置推定、新しい視点からの見えの合成などを目的としてこれまで盛んに行われて来た [1] ~ [6]。しかし、既存の時空間解析に関する研究は、通常、単一のカメラで撮影された映像を対象としており、また、時空間画像を生成する際の画像としては透視投影画像が一般的であった。

その一方で、複数のカメラを対象とした研究が川崎らにより

行われている [7]。これは、車の屋根に複数のビデオカメラを設置し走行しながら撮影した映像を用いて、EPI 解析 [2] によりカメラ間の同期パラメータを獲得し、カメラキャリブレーションを実現するものである。しかし、彼らの手法にはいくつかの問題点が存在していた。第一に、複数カメラの画像を共通平面に投影するため、カメラの姿勢、すなわちカメラパラメータの回転成分の変化に対応するには、時空間画像自体を再生成する必要があった。また、放射状に配置されている複数のカメラ全てに関して共通な仮想平面への投影を行い EPI を生成するた

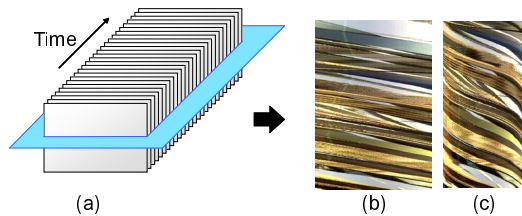


図 1 平面における時空間の表現と EPI

Fig. 1 Ordinary space-time representation and EPI.

め、カメラ毎にリサンプリングによる解像度の不均一が生じていた。特に進行方向に向けたカメラでは画像が無遠方に投影されてしまい深刻な問題であった。

また、透視投影以外の時空間画像の解析も過去に数多く行われている。例えば川崎らの研究 [8] では、円筒座標系へ投影した画像を用いた時空間解析を行っている。しかし、この研究は単一の全方位カメラを対象とし、3次元形状およびパノラマ画像の取得を目的としていた。

今回提案する手法は、複数台のカメラを対象とし、球面座標系へ投影した画像を用いて生成される複数の時空間画像の解析を通して、カメラ間の同期パラメータや外部パラメータを求めるものである。球面に投影された画像はカメラ座標系原点の回転に関してその見え方が不変であるため、その画像より生成される時空間画像もカメラ座標系原点に関する回転に対してその形状が不変となる。従って、カメラパラメータの回転成分の変化について、逐一時空間画像を再生成することなく、一度生成した時空間画像の単純なシフトや回転で対応可能となる。この性質を利用し、球面座標系において複数の時空間画像間の位置合わせを行うことで、カメラ間の外部パラメータや同期パラメータを効率的に求めることができることを示す。また、複数の時空間画像の位置合わせは、対応点探索を伴わないボリュームマッチによるロバストな方法で実現することができ、その際に元画像のオーバーラップが非常に少なく済むことも本手法の特徴の一つである。

本論文の構成は以下の通りである。まず 2. では本論文で対象としている球面座標系を含めた様々な座標系における時空間画像の表現に関して述べる。次に 3. で複数の時空間画像に関する解析に関して述べ、その解析に基づいた実験結果を 4. に記す。最後に 5. でまとめる。

2. 複数の時空間画像の表現手法

通常、時空間画像はカメラで撮影した画像列を画像平面に直行する時間軸に沿って並べることで構成され、図 1(a) に示すような直方体のボリュームで表現される。また、等速直線運動をするカメラから進行方向に対して鉛直横向き方向を撮影した画像列を用いて生成した時空間画像の水平断面には、図 1(b) のような Epipolar Plane Image (EPI) と呼ばれる画像が現れることが知られており、その解析が盛んに行われてきている [2], [8]。しかし、EPI 解析は単一カメラを対象とした解析手法であるため、複数のカメラ間の関係性を考慮した時空間解析のためには、全てのカメラにとって共通の座標系を導入する

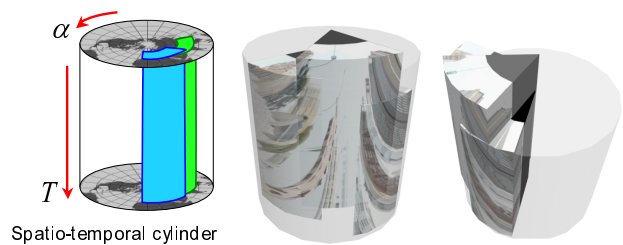


図 2 円筒座標系における時空間の表現

Fig. 2 Space-time in cylindrical coordinates system.

と便利である。

本論文では共通の座標系として、平面座標系・円筒座標系・球面座標系を用いる場合を考え、それぞれの座標系における時空間画像の持つ特徴について述べる。

2.1 平面座標系

単純な共通座標系の導入方法として、画像を仮想的な共通平面に投影し時空間画像を生成する方法が考えられる。すなわち、撮影画像を共通平面に 2 次元射影変換し、それを用いて時空間画像を生成する。このとき、カメラの等速直線運動を仮定し、さらに進行方向に対して鉛直横向きな平面を共通平面とすれば、生成される時空間画像を水平に切断して得られる画像は EPI となる (図 1(b))。このような共通平面へと投影を行った場合は、得られる複数の EPI を 2 次元マッチングすることでカメラの同期パラメータを獲得することができる [7]。ところがこの場合、カメラや共通平面を回転すると撮影画像を共通平面へ投影した画像自体も変化するため、それに伴い時空間画像の形状やその切断面 (EPI) も変化してしまう (図 1(c))。これは、時空間画像の断面も含めた形状を不変のまま変化させることができるパラメータが時間のみであることを意味している。本論文では以後、このような「時空間画像の断面も含めた形状を不変のまま変化させることができるパラメータ」を自由パラメータと呼ぶ。

前述の川崎らにより提案された EPI によるキャリブレーション手法 [7] は、あらかじめ回転成分が求められている複数カメラ画像から生成した複数の EPI を、この自由パラメータ方向 (この場合は時間軸方向) にシフトさせることで同期パラメータを算出した手法である。

2.2 円筒座標系

次に、時空間画像を表現する共通座標系として円筒座標系を考える。これは、カメラ中心を円筒の中心とする円筒面へ画像を投影し、これを積層することで生成することができる。なお本論文では図 2 のように、円筒の半径方向に緯度を取り、円筒の高さ方向に時間軸をとっている。この円筒投影による時空間画像に関しては、同心円で切断するとその断面に EPI と同様のイメージが現れ、半径方向に切断すれば Panoramic View Image (PVI) が得られることが知られている [8]。実際に撮影された画像から生成した時空間画像を図 2 に示す。

この表現方法においては、投影される円筒の軸まわりにカメラを回転しても時空間画像の形状は変化しない。従って自由パラメータは時間 T と円筒軸まわりの回転角 α となる (図 2)。

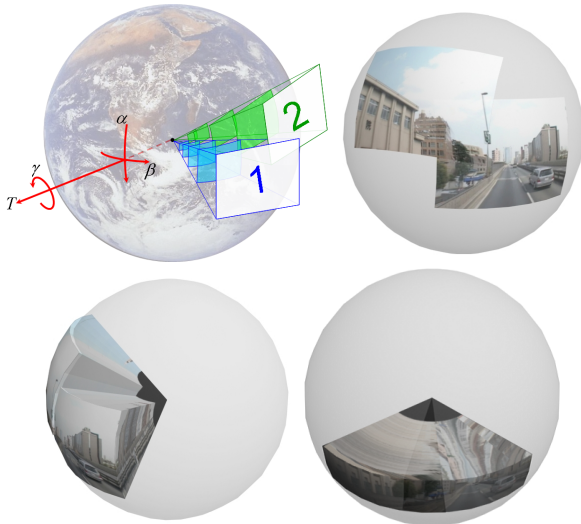


図 3 球面座標系における時空間の表現

Fig. 3 Space-time in spherical coordinates system.

表 1 座標系と自由パラメータの関係

Table 1 Comparison of free parameters in each coordinate system.

	Spatial	Temporal	Total
Spherical coordinates system	3	1	4
Cylindrical coordinates system	1	1	2
Planar coordinates system	0	1	1

2.3 球面座標系

最後に、共通座標系として球面座標系を用いる場合の時空間画像について考える。本論文では、図 3 のように時間軸を球体の半径方向と定義し、カメラ中心を球の中心とする球面に画像を投影しこれを積層することで時空間画像を生成する。このとき円筒座標系の場合と同様、時空間画像の断面には EPI または PVI を変形させた様子が現れる。その様子を図 3 に示す。なおこの図は概念図のため球体の中心方向に向かって画像が縮小して表現されているが、実際の球面座標系における時空間画像は、球の中心近辺と球面近辺における画像の表面積に違いは無い。

この表現方法の特徴として、原点周りの任意の回転に関して時空間画像の形状が不変であることが挙げられる。すなわち自由パラメータは時間 T と任意の回転角 α, β, γ の 4 つとなる (図 3)。次章ではこの特徴を利用することで、カメラ間のキャリブレーションや、複数のビデオ映像を用いて全方位画像列が容易に生成できることを示す。

3. 複数の時空間画像の解析

3.1 概要

本章では複数の時空間画像間における解析に関して考察する。2. で述べたように、時空間画像は投影を行う共通座標系ごとに固有の自由パラメータを持ち、それをまとめると表 1 のようになる。すなわち、複数のカメラ画像において自由パラメータを除いたカメラパラメータが既知であり、その既知パラメータを用いて共通の座標系へ投影した画像により時空間画像を生成す

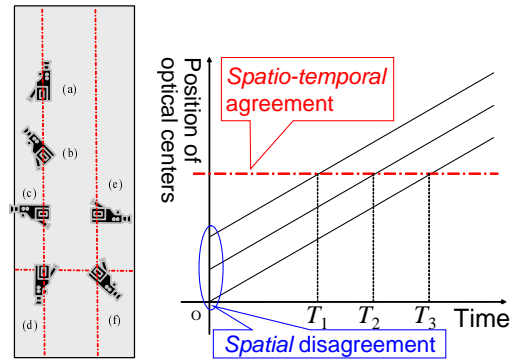


図 4 カメラの配置と光学中心の一致

Fig. 4 Configuration of multiple cameras and agreement of optical center.

れば、各々の時空間画像を自由パラメータに沿って単にシフトすることでカメラ間の外部パラメータや同期パラメータを得ることができる。また、見えの形状が不変のため、特徴点ベースの対応点探索の必要がなく、ブロックマッチによるロバストなキャリブレーションが実現できる点も利点の一つである。従って、カメラの姿勢変化に伴う射影変換の変化に関して、平面座標系が時空間画像自体の再生成を必要とするのに対して、球面座標系は一度生成した時空間画像の単なるデータシフト (並進) や回転で対応できることになる。以下では球面座標系における実際のキャリブレーション手法について述べる。

3.2 複数カメラの配置

球面座標系における時空間画像の自由パラメータは、回転と時間に関する 4 パラメータである (表 1)。そこで最初に自由パラメータ以外の外部パラメータを等しくすることができるカメラの配置方法を考える。

我々は、図 4 左図のカメラセット (a,b,c,d) や (d,f) (e,f) のように移動体上に直線状に複数のカメラを配置することで、自由パラメータ以外の外部パラメータを等しくするカメラの配置を使用した [7]。このとき、各カメラの光学中心は空間的には一致していないが、直線状に配置されているカメラセット同士に関しては、移動体とその直線に沿った方向に進行する場合において、光学中心をそれぞれ異なった時刻において一致させることができる (図 4 右図)。すなわち、時空間的には各カメラセットにおいて全ての光学中心が一致している点が存在することになる。従って、このカメラ配置を用いれば時空間的な光学中心の一致がなされ、時空間画像同士の解析によりカメラ間の外部キャリブレーションを行うことができる。

近年では、Ladybug [9] のような小型マルチカメラシステムを用いることで、光学中心のずれをあまり気にすることなく全方位を統合するシステムも開発されている。しかし、このようなマルチカメラシステムの場合であっても複数のカメラの光学中心を物理的に一致させることはできないため、デプスの異なる環境で完全にひずみのない統合画像を生成することはできない。

以降では、今後の議論を簡単にするため、光学中心を時空間的に一致させることが可能な上記のカメラ配置における解析を

表 2 得られた時空間パラメータの数値例

Table 2 Examples of estimated camera parameters.

Camera pair m, n	Spatial parameter					
	α [pixel]			β [pixel]		
	Estimated	Correct	Diff	Estimated	Correct	Diff
1, 2	-330	-329	1	13	12	1
1, 3	-296	-293	3	77	73	4

Camera pair m, n	Temporal parameter		
	$\delta_m - \delta_n$ [frame]		
	Estimated	Correct	Diff
1, 2	-54	-54	0
1, 3	43	43	0

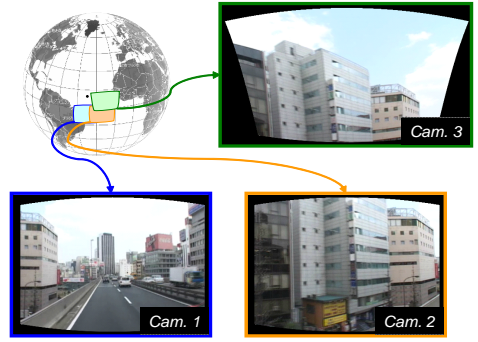
実験を行った。なお、カメラの内部パラメータに関しては既存の手法によりあらかじめ求められていることを前提として以下の実験を行った。また、カメラの配置としては 3.5 で述べた、全てのカメラの光学中心が一致可能な図 4 (a,b,c,d) のように移動体の上に進行方向に従って直線状に複数のカメラを並べるものとした。なお、今回は移動体として車両を使用し、屋根上に 9 台のカメラを直線状に並べた。回転における γ 成分は、全てのカメラが天頂を向くように設置し、あらかじめ前処理を行うことでほぼ 0° とした。これは、回転のうち γ 成分の変化が時空間画像の並進でなく回転操作を必要とし、この操作は特殊なハードウェア等を使用しなければ時空間画像の再構築を伴うためである。また、 γ をほぼ 0° にすることが簡易な画像処理で可能であることも理由の一つである。本実験では、ブロックマッチによる探索処理に先立っておおまかな初期位置をマニュアルで決めることで探索範囲を限定し、計算時間の削減を行った。

4.2 キャリブレーション結果

時空間画像同士のボリュームマッチの結果を図 5 と表 2 に示す。図 5(a) の 3 枚の画像はそれぞれのカメラで撮影された画像とその球面座標系における位置関係を表している。図 5(c) は各々の時空間画像を球体の中心を含む平面で切断した断面図であり、(d) はそれらのマッチング結果を示したものである。このようにしてマッチングにより得られたパラメータをまとめたものが表 2 である。この表において Correct は画像同士の統合を手動で行った際のパラメータの値であり、Estimated は本手法を用いて自動的に獲得したパラメータである。表 2 より、経緯度方向の自由パラメータである (α, β) と時間方向の自由パラメータである (T) が高い精度で推定できていることが分かる。また図 5(b) は、この外部パラメータを用いて画像を統合した例である。

4.3 全方位映像生成実験

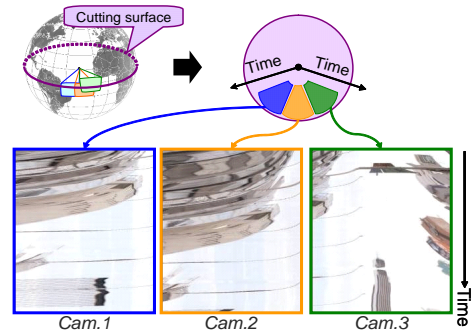
同様にして実験に用いたカメラから生成された全ての時空間画像同士のボリュームマッチを行い、獲得した時空間パラメータを用いて生成された全方位映像の一例を図 6 に示す。この画像において画像の境界で色の違いが見られるが、これはホワイトバランスがカメラ毎にわずかに異なっているせいと考えられる。また、同様に境界部分で最大数ピクセル程度のずれが見られるが、これは広角レンズを用いたためレンズひずみが残って



(a) Images estimated to be correspond temporally.



(b) Stitched result of (a).



(c) Cross section of space-time volumes cut by a plane including the origin of the sphere.



(d) Stitched result of (c).

図 5 時空間画像の球体断面マッチング結果

Fig. 5 Result of space-time volume registration in spherical representation and cross-section of matched space-time volumes.

いるためと考えられる。このような収差が残っているにもかかわらず、本手法を用いれば高い精度で外部キャリブレーションを実現することができ、光学中心不一致によるひずみの無い全方位映像生成を行えることが分かる。

5. まとめ

本論文では球面座標系における複数の時空間画像の解析手法



図 6 時空間画像のボリュームマッチ結果による画像統合例

Fig. 6 Auto registered image of nine video cameras.

を提案し、その有効性を確認するためにカメラの外部キャリブレーション及び複数のカメラ画像を統合する実験を行った。

球体座標系に投影した画像を用いて生成した時空間画像は、その断面も含む形状がカメラ中心周りの回転に関して不変となるため、各カメラから生成される時空間画像の回転による変換を単純なシフトで実現できる。従って、各カメラを光学中心が同地点を通過するように並べて配置しておけば、各カメラから生成される時空間画像のマッチングにより外部キャリブレーションを実現することができる。

本手法の利点としては、キャリブレーションパターンなどを用意する必要がなく、オーバーラップが少ない場合においても、カメラ間の外部キャリブレーションがロバストに行えることが挙げられる。また、実用的なアプリケーション例として、自由な方向を向けて設置した複数台のカメラから、全方位映像を生成する手法を提案した。

手法の有効性を確認するために、実際に撮影されたビデオ映像を用いて、提案する時空間画像の解析によるカメラキャリブレーションを行ったところ、高い精度で時空間パラメータを推定することができた。また、その時空間パラメータを用いて画像統合を行ったところ、光学中心不一致によるひずみの無い全方位映像を生成することができた。

文 献

- [1] Z. Zhu, G. Xu and X. Lin: "Panoramic EPI generation and analysis of video from a moving platform with vibration", CVPR99, pp. 531-537 (1999).
- [2] R. Bolles, H. Baker and D. Marimont: "Epipolar plane image analysis: an approach to determining structure from motion", Int. J. of Computer Vision, Vol. 1, pp. 7-55 (1987).
- [3] A. Rav-Acha, Y. Pritch, D. Lischinski and S. Peleg: "Dynamosaics: Video mosaics with non-chronological time", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005) (2005).
- [4] A. Rav-Acha, P. Yael and P. Shmuel: "Online registration of dynamic scenes using video extrapolation", 10th International Conference on Computer Vision (ICCV 2005) (2005).
- [5] Y. Wexler and D. Simakov: "Space-time scene manifolds", International Conference on Computer Vision (ICCV 2005) (2005).
- [6] D. Steedly, C. Pal and R. Szeliski: "Efficiently registering video into panoramic mosaics", 10th International Conference on Computer Vision (ICCV 2005) (2005).
- [7] H. Kawasaki, A. Miyamoto, Y. Ohsawa, S. Ono and K. Ikeuchi: "Multiple video camera calibration using EPI for city modeling", Asian Conf. Computer Vision, Vol. 1, pp. 569-574 (2004).
- [8] H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi: "Spatio-Temporal analysis of omni image", CVPR, Vol. 2, pp. 577-584 (2000).
- [9] Point Grey Research Inc.: "Ladybug" <http://www.ptgrey.com/>.
- [10] S. K. Nayar: "Catadioptric omnidirectional video camera", CVPR, pp. 482-488 (1997).
- [11] Y. Onoue, K. Yamasawa, H. Takemura and N. Yokoya: "Telepresence by realtime view-dependent image generation from omnidirectional video streams", Computer Vision and Image Understanding, **71**, pp. 154-165 (1998).
- [12] Y. Yagi and S. Kawato: "Panorama scene analysis with conic projection", Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 181-187 (1990).
- [13] K. Yamasawa, Y. Yagi and M. Yachida: "New realtime omnidirectional image sensor with hyperboloidal mirror", Proc. 8th Scandinavian Conf. on Image Analysis, pp. 1381-1387 (1993).
- [14] J. Zheng and S. Tsuji: "Panoramic representation of scenes for route understanding", Int. Conf. on Pattern Recognition, pp. 161-167 (1993).
- [15] M. Hirose and E. Takaaki: "Building a virtual world from the real world", Proc. of International Symposium on Mixed Reality, pp. 183-197 (1999).
- [16] T. Takahashi, H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi: "Arbitrary view position and direction rendering for large-scale scenes", CVPR, Vol. 2, pp. 296-303 (2000).
- [17] H. Tamura, H. Yamamoto and A. Katayama: "Mixed reality: Future dreams seen at the border between real and virtual worlds", Computer Graphics and Applications, **21**, 6, pp. 64-70 (2001).