

■2 群 (画像・音・言語) - 4 編 (3 次元画像)

2 章 3 次元画像取得

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 2-1 多視点カメラ
- 2-2 デプスカメラ (能動型方式)
- 2-3 ライトフィールドカメラ

■2群-4編-2章

2-1 多視点カメラ

(執筆著者：福嶋慶繁) [2018年1月 受領]

動的な3次元シーンを撮影するためには、同期した複数台のカメラが使われる。古典的なものとしては2台のカメラからなるステレオカメラがあり、今でも幅広く使われている。また、2台のカメラに限定せず、より多くのカメラを用いたものとして多視点カメラシステムがある。多視点カメラシステムでは、被写体を囲むように配置して3次元形状を取得するためのシステムや、逆に外向きの様々な方向にカメラを向けて、高解像度で全方位の単一視点の画像を得る全方位カメラ、平面上に規則的にカメラを配置することで光線空間(ライトフィールド)¹⁾²⁾を取得するものなどがある。

早期の多視点カメラシステムは、デプスマップを求めるためのマルチベースラインステレオ³⁾を実現するために用いられることが多かった。そして、多視点カメラシステムは、3次元形状の復元を行うために被写体を取り囲むように配置されるようになった。代表的な早期のシステムとしては、51台のカメラからなる3D Dome⁴⁾や40台のカメラが部屋全体を囲むように配置された3D Room⁵⁾がある。様々な多視点カメラシステムによって3次元画像が撮影されてきており^{6)~9)}、近年では、8台のカメラと1200台の照明からなるシステム¹⁰⁾や、カメラ106台(RGBカメラ、IRカメラ各53台)とIRライトによるデプス推定を併用したシステム¹¹⁾、480台のVGAカメラ、31台のHDカメラ、10台のKinectV2を混合したシステム¹²⁾など様々な環境を統合したシステムが登場している。また、3次元形状の復元を行わないまでも、多眼画像を連続に出力するバレットタイム表示はVFX映像表現として使われている。スーパーボールなどのスポーツ中継で用いられたEyeVison 2001や映画マトリクスが代表的である。

多視点カメラシステムは、カメラの方向を内側ではなく外向きに向けることで全方位カメラとなる。古典的な全方位画像の取得方法である魚眼レンズやミラーを装着した単一カメラで撮影する方法では解像度が不足しがちである。多視点カメラによる全方位カメラシステムでは、各カメラの画角の範囲に収められる光を統合することでカメラの台数に比例した解像度の向上が得られる。製品ではPoint Grey社のLadybug、最近ではアクションカメラGoProを並べたものによる360度撮影などがある。また、同様の発想により、全方位ではなく通常のカメラの高解像度化をすることもなされている¹³⁾。光学系を工夫することで、狭い範囲に入光する光の受光位置を分け、多視点カメラで取得することで高解像度化を実現している。

カメラを平面上へ規則的に整列した多視点カメラシステムはカメラアレイと呼ばれ、主に光線空間を取得するために使われている。光線空間を構築することで、自由な位置から映像を見ることが出来る自由視点映像や、フォーカスを任意に変えられる任意焦点画像の生成が可能となる。これらのカメラアレイは、名古屋大学¹⁴⁾、スタンフォード大学¹⁵⁾やカーネギーメロン大学¹⁶⁾、東京大学¹⁷⁾から50~100台規模の大規模システムとして構築されてきた。また、ビュープラス社からは25眼の小型カメラアレイシステムProFUSION25¹⁸⁾が発売された。特にスタンフォード大学のカメラアレイでは、各カメラの露光時間やシャッタータイミング、レンズを変えることで、高ダイナミックレンジ化、ハイスピードカメラ化、高解像度化などを実現し、光線空間の撮影機能だけでなく、カメラとして高いパフォーマンスを持つカメラシステムの構築に成功している。この光線空間取得のためのカメラシステムは、カメラアレイではなく単一

CCD にレンズアレイを取り付けることでも実現されており、ライトフィールドカメラとして Lytro 社や Raytrix 社からリリースされた。

様々なカメラを組み合わせて使うシステムは、2018年現在ではコンシューマ向けのシステムでも使われて始めている。アップル社の iPhone や、サムスン社、ファーウェイ社、ASUS 社などのアンドロイド端末では、デュアル・トリプルのカメラを搭載するものが登場している。ステレオカメラとして使うことで、奥行き情報を用いて後からフォーカス調整をする機能だけでなく、異なる画角のレンズを搭載したカメラを切り替えることで光学ズームを実現する機能、カラーとグレイスケールの2つのカメラを用意して、カラーカメラの感度を上げるなど、高機能な画像が出力可能になっている。ほかにもペリカンイメージング社¹⁹⁾の iCam は、モバイル用の小型のカメラアレイシステムの開発という挑戦的な試みであった。また、スタートアップ企業である Light 社による Light L16 は16個のカメラと様々な焦点距離を持つレンズモジュールを搭載したコンパクトデジタルカメラをリリースしている。ダイナミックレンジ、被写界深度の設定などを調整した複数画像の統合をすることで、高解像度で高ダイナミックレンジ、かつ、後からフォーカスが変更可能な写真を撮ることが可能なシステムを実現している。

■参考文献

- 1) T. Fujii : “Ray space coding for 3D visual communication,” in Proc. Picture Coding Symposium (PCS), 1996.
- 2) M. Levoy, P. Hanrahan : “Light field rendering,” in Proc. ACM SIGGRAPH, pp.31-42, 1996.
- 3) M. Okutomi and T. Kanade : “A multiple-baseline stereo,” IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 15(4), pp.353-363, 1993.
- 4) T. Kanade, P. Rander, and P. Narayanan : “Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes,” IEEE Multimedia, 1997.
- 5) T. Kanade, S. Hideo, and S. Vedula : “The 3D room: Digitizing time-varying 3D events by synchronized multiple video streams,” Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, 1998.
- 6) I. Kitahara, H. Saito, S. Akimichi, T. Ono, Y. Ohta, T. Kanade : “Large-scale virtualized reality,” in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2001.
- 7) T. Matsuyama and T. Takai : “Generation, visualization, and editing of 3d video,” in Proc. 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT), 2002.
- 8) M. Gross, S. Wurmlin, M. Naef, E. Lamboray, C. Spagno, A. Kunz, E. Koller-Meier, T. Svoboda, L. Van Gool, S. Lang, K. Strehlke, A.V. Moere, and O. Staadt : “Blue-c: A spatially immersive display and 3D video portal for telepresence,” ACM Transactions on Graphics, 22(3), pp.819-827, 2003.
- 9) C.L. Zitnick, S.B. Kang, M. Uyttendaele, S. Winder, and R. Szeliski, “High-quality video view interpolation using a layered representation,” ACM Transactions on Graphics, 23(3), 2004.
- 10) D. Vlasic, P. Peers, I. Baran, P. Debevec, J. Popovic, S. Rusinkiewicz, and W. Matusik : “Dynamic shape capture using multi-view photometric stereo,” ACM Transactions on Graphics, 28(5), 2009.
- 11) A. Collet, M. Chuang, P. Sweeney, D. Gillett, D. Evseev, D. Calabrese, H. Hoppe, A. Kirk, and S. Sullivan : “High-quality streamable free-viewpoint video,” ACM Transactions on Graphics, 34(4), 2015.
- 12) H. Joo, H. Liu, L. Tan, L. Gui, B. Nabbe, I. Matthews, T. Kanade, S. Nobuhara, and Y. Sheikh : “Panoptic studio: A massively multiview system for social motion capture,” in Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015.
- 13) O.S. Cossairt, D. Miao, and S.K. Nayar : “Gigapixel computational imaging,” in Proc. International Conference on Computational Photography (ICCP), 2011.
- 14) T. Fujii, K. Mori, K. Takeda, K. Mase, M. Tanimoto, and Y. Suenaga : “Multipoint measuring system for video and sound-100-camera and microphone system,” in Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 2006.
- 15) B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, V.E. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy : “High

- performance imaging using large camera arrays,” ACM Transactions on Graphics 24, No(3), pp. 765-776, 2005.
- 16) C. Zhang and T. Chen : “A self-reconfigurable camera array,” in Proc. Eurographics Symposium on Rendering, 2004.
- 17) Y. Taguchi, T. Koike, K. Takahashi, and T. Naemura : “TransCAIP: A live 3D TV system using a camera array and an integral photography display with interactive control of viewing parameters,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 15(5), pp. 841-852, 2009.
- 18) 関口大陸, 松山方大, 桑島茂純 : “25 眼カメラアレイシステム ProFUSION25 の設計と開発,” 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), pp.239-242, 2008.
- 19) K. Venkataraman, D. Lelescu, J. Duparr’e, A. McMahon, G. Molina, P. Chatterjee, R. Mullis, and S. Nayar : “PiCam: an ultra-thin high performance monolithic camera array,” ACM Transactions on Graphics, 32(6), 2013.

■2 群-4 編-2 章

2-2 デプスカメラ（能動型方式）

(執筆者：河北真実) [2012年12月 受領]

2-2-1 3次元画像取得方式

3次元画像の取得には、表 2・1 に示すように各種方式がある。その方法を大別すると、マルチカメラで得られた多視点画像などから距離画像を求める受動型方式と、変調光などを被写体に照射し、その反射光を検出して距離などを求める能動型方式とがある¹⁾。一般的に、受動型方式では、光投射が不要なため、屋外などの様々な条件下でも使用できるメリットがある。一方、能動型方式では、外乱光や被写体表面の反射特性などが、距離検出性能に影響を与える場合が多いものの、距離検出精度や速度に有利な方式も多く、測定要件や環境、要求精度に応じて、各種方式が使い分けられている。本章では、能動型の3次元画像取得法について解説する。

表 2・1 3次元画像取得方式

受動型 (光投射なし)	三角測量法	マルチカメラステレオ法
	レンズ焦点法	
能動型 (光投射あり)	三角測量法	ポイント走査方式
		光切断方式
		パターン投影方式
	光飛行時間計測法	モアレ方式
		パルス光時間計測
		強度変調位相計測
光強度検出方法		

2-2-2 光飛行時間計測法

光飛行時間計測法では、測定対象物に対して、光強度を変調した光を投射し、物体に反射し戻ってくるまでの時間や変調位相を検出し、距離を算出する方式である。光飛行時間計測法にも図 2・1 に示すように2種類の方式がある。一つは、パルス光を照射し、それが反射して戻ってくるまでの時間を測定するパルス光時間計測方法である(図 2・1(a))。もう一つは、光の強度を変調し、強度振幅が変化する変調光を被写体にあて、その反射光強度の変調位相差より距離を求める強度変調位相計測方法がある(図 2・1(b))。

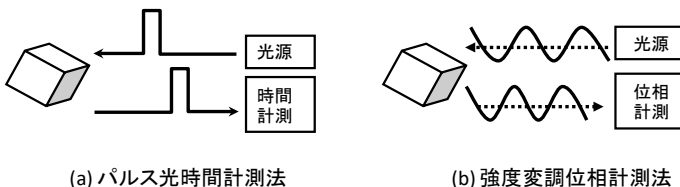


図 2・1 光飛行時間計測法

図 2・1 (a) に示すパルス光時間計測では、光の往復時間 t は、 $t=2D/c$ (ただし、 D は測定対象物までの距離、 c は大気中の光の速度) となる。よって測定対象までの距離 D は、 $D=tc/2$ となり、簡単な演算で距離を求めることができる。本方式における距離検出の分解能は、往復時間 t の測定精度に左右され、一般的にナノ秒以下の高分解能な距離検出精度が要求される。

一方、図 2・1 (b) に示した強度変調位相計測法では、光の強度変調を周波数 f で変調させた場合、出射光と反射光間の位相差を $\Delta\phi$ とした場合、距離 D は以下の式であらわされる。

$$D = \frac{c(n + \Delta\phi / 2\pi)}{f} \quad (2 \cdot 1)$$

本方式では、異なる変調周波数 f を用いることで、整数 n を求めることもできる。これらの光飛行時間計測法の特徴としては、計測原理がシンプルで演算処理も簡単である、光学系を同軸配置できるためオクルージョンをなくすことができる、絶対的な距離を算出できる、などがある。

光飛行時間計測法で被写体の 3 次元形状を取得するには、光ビームを 2 次的にスキャンニングして得るのが一般的な方法である。光飛行時間計測法は原理が簡単であるためシステム構成がシンプルで、距離演算処理も容易なため高速な距離画像検出が可能である。

近年、固体撮像センサの進展により、高機能な撮影が可能となり、距離画像の 2 次元同時検出が実現できるようになった。固体撮像素子で光飛行時間計測法を実現する一例を図 2・2 に示す。パルス光を被写体に照射し、その反射光を撮像して、高速にゲート 1 と 2 により各電子蓄積部に振り分け、反射光の到達の遅れに応じたそれぞれの蓄積部の信号量から距離を算出する。具体例としては、本方式に必要な高速電荷転送を CMOS プロセスで実現するために、フィールド酸化膜の上に単層のポリシリコン電極を隣接して形成し、受光信号の電荷の高速な振り分けを可能としているものがある²⁾。また、背景光の影響を低減するために、各画素に電荷排出構造を搭載し、デューティ比の小さいゲートパルス光を照射する方法も提案されている。

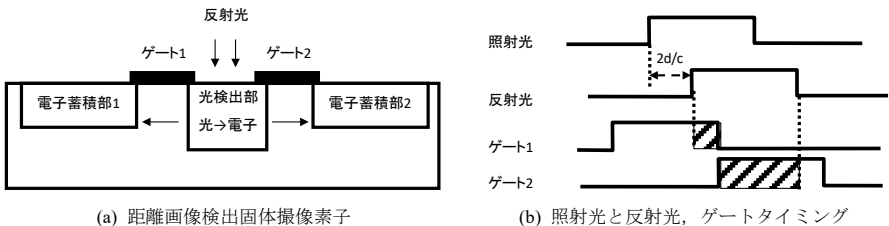


図 2・2 固体撮像素子による光飛行時間計測の原理

一方、CCD と CMOS の混在方式による距離検出技術も開発されている³⁾。これら、固体撮像素子による小型・軽量の距離画像カメラは、主にセキュリティや車載用センサなどの分野で市場開拓が進められている。

映像コンテンツ制作に応用できる高精細な距離画像取得技術としては、電子管と固体撮像素子を組み合わせた撮像系を用いる方式があり、その一例である Axi-Vision カメラ⁴⁾の原理を説明する (図 2・3)。

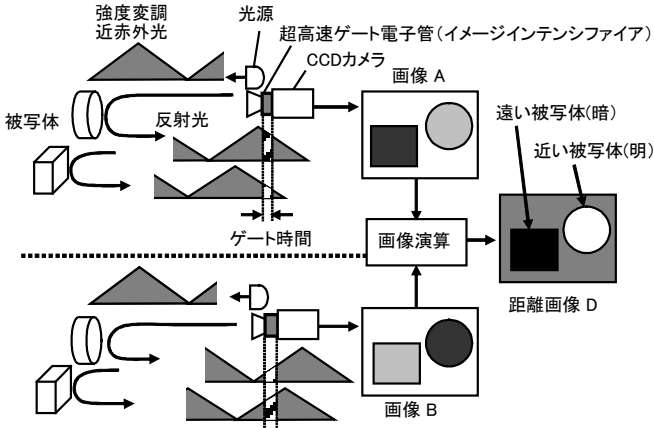


図 2・3 Axi-Vision カメラの基本原理

時間とともに光強度が増加する強度変調光を被写体に照射し、その反射光を数 ns の時間幅の高速ゲート機能を有する電子管で撮像し、その出力光画像を CCD や CMOS カメラで撮影する。得られる画像 A には被写体までの距離に応じた輝度差が生じる。更に、被写体表面の反射率や照射光量の空間的むらなどを補正するために、次の映像フレームでは、減少変調光を照射し、画像 B を撮像する。これらの 2 種類の画像間の輝度比を計算し、反射率を補正後、被写体までの距離を画像の明暗で表した距離画像 D が求められる。本カメラは、放送番組制作用途として、通常のハイビジョン映像と距離画像の両方が、同光軸上で取得できる撮像光学系を持っている。距離情報をもとにした 3 次元的な映像合成に使用されるときにも、より広い産業応用を目指して一体化撮像レンズや反射型 LED アレイ光源などの開発、システムの小型軽量化、外乱光の影響の低減が進められている。

最新の MEMS 技術を利用したスキャンニング機構を有する光飛行時間計測法のセンサも市場に出ている⁹⁾。MEMS 技術により実現された電磁駆動型共振ミラーを使用することで、装置全体の構造を単純化でき、小型のセンサが実現できている。

2-2-3 三角測量方式

(1) 光切断方式

光飛行時間計測法によりリアルタイムで距離検出する場合、撮像素子のダイナミックレンジや信号対ノイズ比の特性により、距離分解能は概ね数 mm 数 cm 程度である。より高分解能な距離検出手法として、アクティブな三角測量方法である光切断方式における距離画像取得がある⁹⁾。本方式では、図 2・4 に示すように、ライン光を被写体に照射し、ライン光が物体の表面形状に応じて変化する様子を光源と別の角度から撮影することで、三角測量法により高精度な距離が得られる。

基本原理は三角測量であるため、基線長が長い方が測定精度は高くなる。しかし、高精細かつ高速な距離計測を実現するには走査光による切断線の位置検出を高速に実行する必要がある。

る。近年では、並列高速読み出し手法と時間領域 A/D 変換回路によって、VGA (640×480) 画像を 65.1 fps で取得したり、XGA (1024×768 画素) 30 fps のセンサや 375×365 画素 1052 fps の高速検など⁷⁾、高機能なスマートセンサ開発とともに高性能な検出特性が得られている。

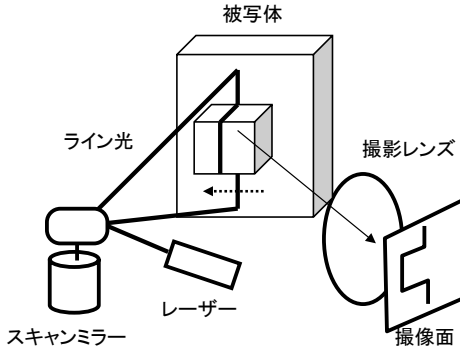


図 2・4 光切断方式の基本原理

(2) パターン投影方式

対象物を 2 次元的な面として形状検出する方法には、パターン投影方式がある (図 2・5)。2 次元的な変調パターンを被写体に投影し測定する。投影するパターンとしては、格子やストライプパターン、カラードットパターン、濃度分布パターンランダムドットパターンなどがある⁶⁾。近年では、人の動きを検出するゲームなどにも使われる安価な装置も開発され普及している。

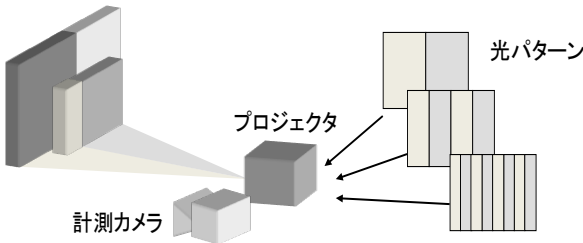


図 2・5 パターン投影方法

(3) モアレ方式

モアレ方式とは、図 2・6(a)のように光源と測定物の間に格子を置き、被写体を照明すると格子の影が被写体に投影され、その影は物体の表面形状に応じて変形する。この変形格子を再び格子を介して観察することで、モアレ縞が発生する。このモアレ縞は、光源と観察点が、格子面から同じ位置に置かれていると、格子面を基準とした等高線となる⁶⁾。

図 2・6(b)において、格子から n 番目の等高線までの距離は、

$$h_n = \frac{npl}{d - np} \quad (2 \cdot 2)$$

となる. ここで, p は格子ピッチ, l は光源あるいは観察点から格子までの距離, そして d は光源と観察点間の距離である. 本方式は, 医療分野への応用や半導体分野の平面度計測などへ応用が期待されている.

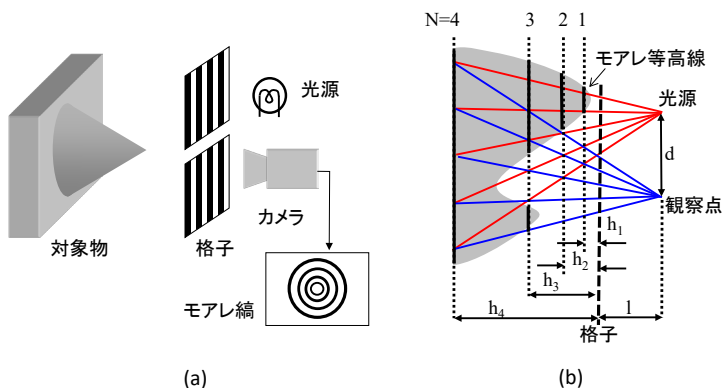


図 2・6 モアレ方式

2-2-4 光強度検出法

上記以外の方式では, 点光源の照明光強度が, 距離の 2 乗に反比例して減衰する性質を利用したカメラの報告もある⁸⁾. この方式では, 被写体までの距離が近いほど距離検出分解能が高く, カメラより被写体まで数十 cm の距離で, 0.5 mm の分解能が得られる. 特徴はシステム構成がシンプルなことであり, 簡易で安価なリアルタイム距離画像検出システムが期待できる.

今後, 距離画像を取得するデプスカメラの性能やその応用は, ますます進展すると予想される. セキュリティや映像コンテンツ制作, 医療, ロボットビジョン, 部品検査, 人体計測などの多くの産業分野において新たな応用が期待される.

■参考文献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: “三次元画像計測,” 昭晃堂, 1990.
- 2) 澤田友成, 伊藤佳奈, Izal Abul Halin, 中山政勝, 川人祥二, 牛永健雄, 本間 充, 渡辺恭志, 前田康成: “距離画像 CMOS センサ,” 映像情報メディア学会技術報告 IDY2006-87, vol.30, no.52, p.21, 2006.
- 3) R. Lange, P. Seitz, A. Biber, and S. Lauxtermann: “Demodulation pixels in CDD and CMOS technologies for time-of-flight ranging,” in Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications, Morley M. Blouke, Nitin Sampat, George M. Williams and Thomas Yeh, eds. Proc. SPIE 3965, p.177, 2000.
- 4) M. Kawakita, K. Iizuka, H. Nakamura, I. Mizuno, T. Kurita, T. Aida, Y. Yamanouchi, H. Mitsumine, T. Fukaya, H. Kikuchi, and F. Sato: “High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera,” Optics Express, vol.12, no.12, p.2781, 2004. <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-12-2781>
- 5) 上田 譲: “MEMS 共振ミラー「エコスキャン」,” 光アライアンス, vol.4, p.52, 2005.
- 6) 吉澤 徹: “最新 光三次元計測,” 朝倉出版, 2006.
- 7) Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada: “A 375 × 365 High-Speed 3-D Range-Finding Image Sensor Using Row-Parallel Search Architecture and Multi-Sampling Technique,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.40, no.2, p.444, 2005.
- 8) K. Iizuka: “Divergence Ratio Axi-Vision Camera (Divcam),” Rev. Sci. Instrum., vol.77, 045111, 2006.

■2 群-4 編-2 章

2-3 ライトフィールドカメラ

(執筆著者：日浦慎作) [2012年7月 受領]

2-1 節で述べられているように、シーンが形成する光線の状況（光線空間、ライトフィールド）の網羅的な記録には、多数のカメラを利用し、様々な視点からの画像を取り込む方法が用いられる。それでは、ライトフィールドの計測には必ず複数のカメラが必要なのであるだろうか。もしカメラがピンホールカメラであればこの命題は真であるが、実際のカメラでは十分な光エネルギーを撮像素子へ導くために開口（絞り）が有限の大きさを持っており、それゆえ単一のカメラによる撮影であっても、その画像には様々な視点からの対象物体の見えに関する情報が含まれている。よって、カメラ内部に工夫を施すことで、レンズ口径付近におけるライトフィールドを取得したり、シーンの奥行きを求めることができる。

そこで本節ではまず、レンズとライトフィールドの関係について述べた後に、単一のレンズを用いた光線空間の取得（ライトフィールドカメラ、またはプレノプティックカメラ）について解説する。

2-3-1 レンズの働きとライトフィールドの記録

先に述べたように、通常のカメラでは光線の通過方位と通過位置をそれぞれ独立に表したライトフィールド（光線空間）を記録することはできない。図 3・1 はこの原理を説明したものである。この図ではレンズから撮像素子までの距離がちょうどレンズの焦点距離に一致している場合を表しており、このときレンズのピントは無限遠に合焦していることになる。つまり、無限遠の点光源からレンズまで到達した光は平行光であり、これは撮像素子上の 1 点に焦点を結ぶ。図にはレンズの上下端を通過する光線を描いており、光線 a と b が撮像素子上の画素 A に、また光線 c と d が画素 B へ入射する。このとき、撮像素子はそれぞれの画素へ到達した光エネルギーの総和を出力する。これにより、レンズへ到達した 4 次元のライトフィールドの情報のうち 2 次元が失われ、2 次元画像へと変換される。

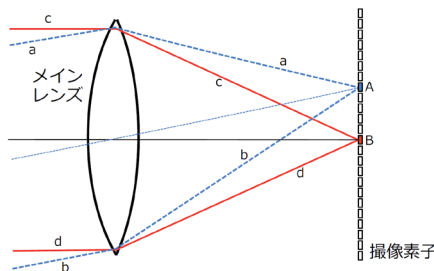


図 3・1 通常のカメラによる撮像

レンズに入射する光線のうち、通過方位が同一である光線 a と b は撮像素子上の同一画素 A へ到達する。このとき、画素 A は光線が入射する角度を記録することができないために、光線 a と b のメインレンズ上での通過位置に関する情報は失われる。

ここで光線 **a** と **b** について見てみると、これらはメインレンズへ入射する段階では方位は同じであるが、レンズへ入射する位置が異なる光線である。これらが単一の画素 **A** によって記録されるのであるから、カメラは光線の方位に関する情報を記録し、レンズへ入射する光線の通過位置に関する情報は記録できない装置であるといえることができる。しかし、これらの光線が撮像素子面へ到達したときを見てみると、光線 **a** と **b** は同じ画素へ異なる角度で入射しているから、これらは通過位置（到達位置）は同じであるが方位が異なる光線となっている。これはレンズの働きによるものであり、レンズは光線の方位と位置の情報を入れ替えるデバイスであるといえることができる。より正確に言うると、ある焦点距離のレンズがあるとき、そこへ入射した光線は、レンズを通過してから焦点距離だけ進んだところで、レンズ入射時の方位が焦点の位置に変換され、それぞれの焦点へ光が到達する方位がレンズ面への入射位置に対応する。また、そもそも撮像素子とは、その記録面上の光強度の分布を記録するデバイスであるから、ライトフィールドのうち位置に関する情報のみを残す。これにレンズを組み合わせることで光の方位と位置の情報を入れ替えることで、光の方位に関する情報のみを記録するように工夫したものがカメラであると言える。また、このことから、4次元ライトフィールドが2次元画像へと縮退写像される原因はレンズではなく撮像素子であるため、撮像素子の部分を工夫することで単一のカメラでもライトフィールドを記録することができることになる。

2-3-2 ライトフィールドカメラ

前述のように撮像素子がライトフィールドの情報を喪失する原因であるため、単一のカメラであっても光記録デバイスを工夫することでライトフィールドを記録することができる。図 3・2 は、その方法について説明したものである。2-1 節で述べた多視点カメラ（カメラアレイ）は、光の方位のみを記録することができるカメラを多数並べることでライトフィールドを記録する装置である。

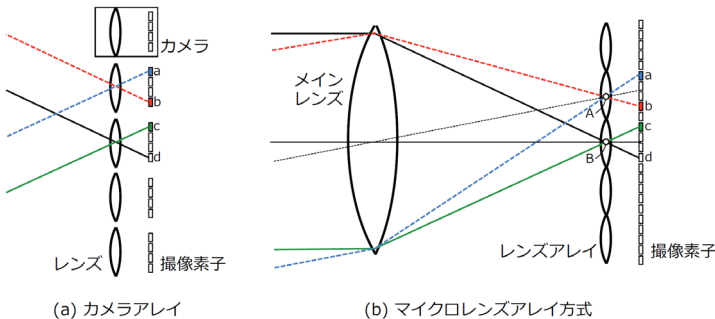


図 3・2 ライトフィールドカメラ

カメラは光線の方位しか記録できないため、カメラを多数並べることで、光線の通過位置に関して複数のサンプルを得ることができるようにしたものが(a)のカメラアレイである。これに対し、マイクロレンズアレイを撮像素子の直前に配置した構成(b)では、平行光の焦点 **A** を通過した光線を別々の画素 **a, b** で記録することにより、メインレンズへ入射した光線の通過位置に関する複数のサンプルを得る。

図 3・2(a)に示すように、カメラの画素 a と b は、光の到達位置は同一であるが方位の異なる光線を計測し、一方、画素 a と c について見ると、これらは光線の方位は同一であるが通過位置が異なる光線を捉えている。よって、このような多視点カメラをカメラの撮像素子の代わりに置くことで、単一のカメラでライトフィールドを計測できるようになる。これをライトフィールドカメラ、またはプレノプティックカメラと呼び、図 3・2(b)に示すように撮像素子の直前にマイクロレンズアレイを設置したような構成となっている。

図 3・2(b)では、画素 a と b はメインレンズへ入射する平行光の焦点 A を通過した光線を捉えており、これらはメインレンズの前で見ると、光線の通過位置は上下にずれているが、その方位は同一の光線である。また、画素 c と d も同様に光軸上の焦点 B を通過する光線を記録しており、これはメインレンズの光軸に対して並行な入射光に対応する。ここで注意すべきことは、図 3・2(a)では画素 a と b は同一の視点から方位の異なる光線を捉えていたのに対し、図 3・2(b)の画素 a と b は方位は同一で通過位置の異なる光線を記録している点である。これはとりもなおさず、前節で述べたように、レンズは光線の位置と方位を入れ替えるデバイスであるからである。また、このことから図 3・2(a)と(b)の各構成におけるライトフィールドの光線方位と位置に関するサンプル数について理解を深めることができる。図 3・2(a)ではカメラの台数が 5 であることから位置に関するサンプル数は 5、また 1 台のカメラに備わる画素数が 4 であることから方位に関するサンプル数は 4 である。それに対し図 3・2(b)の構成では、マイクロレンズ数が 5 であることから光線の方位に関するサンプル数（通常のカメラの画素数に相当する）は 5、また 1 つのマイクロレンズの背後で光線を捉える画素の数（画素 a から b までの画素数）は 4 であるから、光線の位置分解能（口径の分割数）は 4 となる。

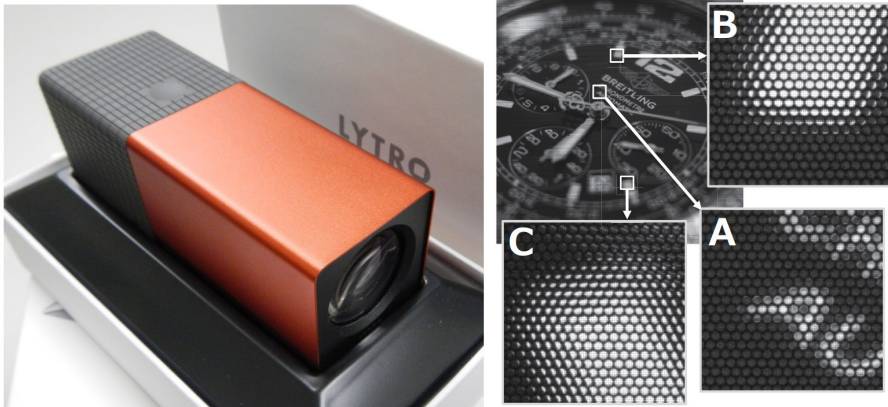


図 3・3 LYTRO 社のライトフィールドカメラ

8 倍のズームレンズを備え、1 つのマイクロレンズの直径はほぼ 10 画素分に相当する。右図はカメラの撮像素子が出力した RAW 画像の例であり、各画素には Bayer 配列のカラーフィルタが備わっていることが分かる。

ライトフィールドカメラの考え方は 1908 年に Lippmann が発案したインテグラルフォトグラフィ²⁾に遡ることができるが、1992 年に Adelson らがシーン形状計測のための装置構成³⁾と

して検討した後に、Ng らがカメラの実用的な実装例からフーリエ変換などを用いた画像処理、更に応用までを含めた総合的な研究を展開した⁴⁾ことで確立した技術となった。図 3・3 に Ng が設立した LYTRO 社が販売しているライトフィールドカメラと、そのカメラの撮像素子により記録された RAW 画像を示す。このカメラは 8 倍ズームレンズを備えるが、そのレンズの F 値が 1:2 一定となっているのは、画素 a から b までの距離を一定とするためである。F 値が大きくなると a から b までの距離が狭くなり、無効画素 (図 3・2(b)で画素 b と c の間にある、光が到達しない画素)が増える。一方で、F 値が小さくなりすぎると、それぞれのマイクロレンズ背後の画像が重なり合ってしまう。

2-3-3 プレノプティック 2.0

図 3・2(b)に示したライトフィールドカメラの構成は、各画素が光の入射方位に関して分解能を持つような撮像素子を備えたカメラであるということが出来る。すなわち、レンズアレイを構成する 1 つのマイクロレンズが 1 つの画素であると考えられるわけである。しかし、この方法ではマイクロレンズの大きさを非常に小さくする必要があることや、超解像処理に不向きであるということから、カメラを構成する部品はほとんど同一でありながら光学的な原理が異なるライトフィールドカメラの構成が提案された。これを提案者の T. Georgiev の命名にならいプレノプティック 2.0 と呼ぶこととし⁵⁾、それに対し図 3・2(b)をプレノプティック 1.0 とする。これらの違いを図 3・4 に示す。

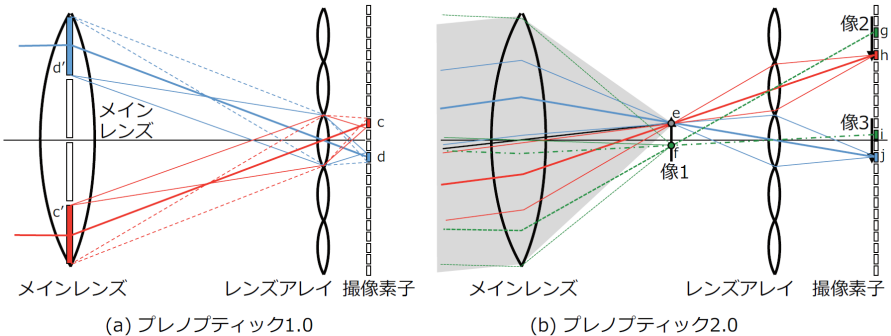


図 3・4 プレノプティック 2.0 と呼ばれるライトフィールドカメラの構成

プレノプティック 1.0 では、それぞれのマイクロレンズによる画素の共役像はメインレンズの開口部に位置し、各画素が口径を分割する。これに対し、プレノプティック 2.0 ではメインレンズが形成した被写体の像をマイクロレンズが再び撮像素子上に結像させる。瞳分割は個々のレンズアレイの開口位置のずれにより実現される。

図 3・4(a)は図 3・2(b)のカメラの光路をより詳しく描画したものである。レンズアレイと撮像素子との距離を調整することにより、画素 c の像はメインレンズの開口の上 c' のように形成される。これにより、部分開口 c' へと入射した光のうち光軸と並行な成分 (光軸上のマイクロレンズ上へ像を形成する成分) は画素 c へと導かれる。よって、開口の分割の様子は撮像素子の画素の配置に対応することが分かる。一方、図 3・4(b)に示す構成では、レンズアレイと

撮像素子の間の距離を大きく取り、メインレンズが空中に形成する実像（像 1）を再びマイクロレンズにより撮像素子上に結像させる。これにより撮像素子上には像 1 の一部が像 2 や像 3 として繰り返し現れるが、その位置は被写体までの距離によって変化する。例えば図 3・4(b)において、像 1 上の点 e には左下からメインレンズへ入射する平行光が結像するが、そのうちメインレンズ開口部の下よりを通過した光（赤線で示す）は画素 h に、一方、光軸より上の一部を通過した光線（青線で示す）は別のマイクロレンズを通過して画素 j へ到達する。このように、撮像素子上の画素 h と j はそれぞれ図中の赤と青の線で表されるようにメインレンズ中の異なる部分開口を通過する平行光に対応している。

この例のように被写体の像が撮像素子と共役の位置に結像した場合は、その像（像 1）が再び撮像素子上に合焦する（像 2 及び像 3）ため、カメラの解像度を上げるためにマイクロレンズのピッチを細かくする必要はなく、撮像素子そのものの解像度を向上させればよい。また、合焦距離よりも手前または奥にある物体に対しては、像 2 と像 3 の位置関係がずれる、すなわち各像はメインレンズ上の視点のずれに起因する視差の影響を受ける。プレノプティック 2.0 カメラによる入力画像と、それによりリフォーカシング（任意の距離へピント合わせをした画像を事後的に生成すること）を行った例を図 3・5 に示す。



図 3・5 プレノプティック 2.0 のカメラにより撮影した画像（一部切り出し）と、それにより手前の人物にリフォーカシングした例⁵⁾

各部分画像において、前景の人物と背景の木々との間に視差が見られることが分かる。

このようにプレノプティック 2.0 ではメインレンズの開口を分割するのはレンズアレイを構成する個々のマイクロレンズの位置のずれであり、開口の分割の様子はレンズアレイの配置による。例えば、撮像素子の各画素が正方格子、レンズアレイのマイクロレンズが六方格子状に配列しているとする、プレノプティック 1.0 では開口が正方格子状に、2.0 では六方格子状に分割されることになる。一般に撮像素子のほうがレンズアレイよりもフィルファクタ（開口率）が低い、部分開口画像の重ね合わせにより超解像処理を行うためにはプレノプティック 2.0 の方が適していると考えられる⁶⁾。

■参考文献

- 1) 日浦慎作, 眞鍋佳嗣: “高機能画像センシング,” 情報処理学会研究報告 2005-CVIM-147, pp.35-50, 2005.

- 2) Gabriel Lippmann : “La Photographie Integrale,” French Academy of Sciences, 1908.
- 3) E.H. Adelson and J.Y.A. Wang : “Single Lens Stereo with Plenoptic Camera,” IEEE Trans. PAMI, vol.14, no.2, pp.99-106, 1992.
- 4) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan : “Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera,” Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02, 2005.
- 5) T. Georgiev and A. Lumsdaine : “Focused Plenoptic Camera and Rendering,” Journal of Electronic Imaging, Volume 19, Issue 2, 2010.
- 6) T. Georgiev, G. Chunev, A. Lumsdaine : “Superresolution with the Focused Plenoptic Camera,” SPIE 7873 Electronic Imaging, 2011.