

NAIST-IS-MT1651071

修士論文

光線時空間の演算による リフォーカシングとリパンニングの実現

津田 香林

2018 年 2 月 1 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

津田 香林

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
萩田 紀博 客員教授	(副指導教員)
舩富 卓哉 准教授	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員)

光線時空間の演算による リフォーカシングとリパンニングの実現*

津田 香林

内容梗概

本研究では光線空間におけるイメージング「合成開口」と「リフォーカス」を時間情報に拡張した光線時空間と光線時空間におけるイメージング「合成撮像」を提案する．そのために，時間情報を変数として持つ光線の集合を光線時間と定義し，「合成開口」と「リフォーカス」に対応する「合成露光」と「リパンニング」を提案する．光線空間によるイメージングは，多視点からの画像を平行移動し，積分することにより，撮影後のボケ量の変更や焦点ボケの対象を変更を可能にしているが，時間情報に左右される被写体ブレには対応できなかった．提案手法では光線空間に時間情報を加えた光線時空間を定義し，光線時空間中の光線の平行移動と積分によって，ボケとブレを同時に操作できる統一的枠組みとして，新たなイメージングである合成撮像を示す．また，光線時空間に着手するにあたり，光線時間を使用したイメージングとして，撮影後にブレ量を変更する「合成露光」と被写体ブレの対象を変更できる「リパンニング」を光線時間における光線の平行移動と積分により実現する．実験では様々な深度や速度の物体に対して合成撮像を行い，提案手法にて焦点ボケと被写体ブレを操統一的枠組みとして同時に操作できることを示す．

キーワード

光線空間, リフォーカス, 合成開口, リパンニング, 合成露光, 光線時空間

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, NAIST-IS-MT1651071, 2018年2月1日.

A Unified Framework on Temporal Light Field Processing for Refocusing and Repanning*

Karin Tsuda

Abstract

In this study, we propose temporal light field and new imaging to use that. Temporal light field is the light field extended time information. We can make some imaging “Synthetic Aperture” and “Refocus” which can change the focus blurring amount and the target for focus deblurring after taking photos. We can make such as image by translation and integral calculation to input light field dataset, but they can’t control motion blur because of not existing time information. In this paper, we define Temporal light field as light field addition time information and show the unified framework to be able to control focus blur and motion blur in parallel by translation and integral calculation. In making temporal light field, we need define the ray construction time and coordinate information. We propose new ray’s aggregation having time and coordinate information and get some images “Synrhetic exposure” and “Repanning” which can change the motion blurring amount and the target for motion deblurring. We show that our method acheived to control focus blur and motion blur in parallel by applying to several temporal light field dataset.

Keywords:

Light field, refocus, synthetic aperture, repanning, synthetic exposure, temporal light field

*Master’s Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651071, February 1, 2018.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	4
2.1 撮影後にボケやブレを生成する研究	4
2.1.1 画像のボケ, ブレのモデル	4
2.1.2 オプティクスの利用	5
2.2 撮影後にボケやブレを除去する研究	5
2.2.1 画像のボケ, ブレのモデル	5
2.2.2 オプティクスの利用	5
3. プレノプティック関数	7
3.1 一般的なカメラと光線の定義	7
3.2 光線空間における定義	8
3.3 光線の定義と時間情報	9
4. 光線空間による合成開口とリフォーカス	10
4.1 光線空間の取得方法について	10
4.1.1 カメラレイシシステム	10
4.1.2 可動ステージシステム	10
4.1.3 マイクロレンズアレイシステム	11
4.2 光線空間の利用	15
4.2.1 ボケと光線の関係	15
4.2.2 合成開口	16
4.2.3 リフォーカス	19
5. 時間情報を用いた光線による合成露光とリパンニング	26
5.1 光線時間の取得	26
5.2 光線時間の利用	26
5.2.1 ブレの発生と時間情報	26

5.2.2	合成露光	30
5.2.3	リパンニング	31
6.	光線時空間による合成撮像	36
6.1	光線時空間の取得	36
6.2	合成撮像と光線時空間の統一的枠組み	37
7.	実験	38
7.1	光線時間に着目した実験	38
7.1.1	得られる運動量が一定である	38
7.1.2	得られる運動量が一定ではない	43
7.2	光線時空間に着目した実験	45
7.2.1	得られる移動量が一定である	45
7.2.2	得られる移動量が一定ではない	50
8.	まとめ	57
	謝辞	58
	参考文献	60

目 次

1	焦点ボケによるぼかしの例	2
2	シャッタースピードの変更による物体の見え方と流し撮り	3
3	畳み込み積分とフーリエ変換の模式図	4
4	逆畳み込み積分とフーリエ変換の模式図	6
5	角度と座標の関係	8
6	2 平面を用いた光線空間の表現	9
7	多眼形式	9
8	多時間形式	9
9	ProFUSION25	11
10	<i>Lytro</i> と <i>LytroTM Illum</i>	12
11	マイクロレンズアレイを用いた撮像素子	12
12	撮像素子に記録されるマイクロレンズアレイ画像	13
13	撮像素子に記録されるマイクロレンズアレイ画像	14
14	マイクロレンズアレイ画像から多眼形式への変換	15
15	焦点距離	17
16	焦点距離とボケの関係	18
17	カメラ間の視差と画像座標の関係	20
18	カメラと物体 A に注目したシーンの関係	22
19	カメラと物体 B に注目したシーンの関係	22
20	カメラと実際に撮影したシーンを上から見た模式図	22
21	多眼形式に変換	23
22	物体 A にリフォーカス	24
23	物体 B にリフォーカス	24
24	カメラ視差が一定であった時	25
25	物体が移動する際、シャッタースピードを短くして取得した光線の模式図	28
26	物体が移動する際、シャッタースピードを長くして取得した光線の模式図	29
27	被写体ブレの原理	29
28	物体の移動量と画像座標の関係	32

29	カメラと物体 A に注目したシーンの関係	33
30	カメラと物体 B に注目したシーンの関係	33
31	カメラと実際に撮影したシーンを上から見た模式図	33
32	多時間形式に変換	34
33	物体 A にリパニング	35
34	物体 B にリパニング	35
35	多時間、多眼式	36
36	実験環境と対象物体	39
37	撮影された動画	39
38	合成露光の結果	40
39	リパニング結果	42
40	撮影されたシーン	43
41	オプティカルフロー	44
42	リパニング結果	44
43	光線時空間データ	46
44	対象物体	47
45	光線時空間データ	47
46	リパニング結果	48
47	合成撮像結果	49
48	実験環境	50
49	光線時空間データセット	51
50	ステレオマッチングより得られた視差	52
51	リフォーカス結果	53
52	得られたオプティカルフロー	54
53	色相と角度情報	54
54	リパニング結果	55
55	合成撮像結果	56

表 目 次

1	物体間の距離	38
2	物体の速度	41
3	物体座標と移動量	45

1. はじめに

カメラの撮影における焦点ボケ（以降ボケ）による図1のような「ぼかし」と被写体ブレ（以降ブレ）による図2のような「流し撮り」は美しい写真を取撮影する上で、効果的な表現技法である。「ぼかし」、「流し撮り」の両者ともに被写体を強調する表現技法で、被写体となる対象が異なるため撮影方法が異なることが特徴である。「ぼかし」は物体の深度に依存し、カメラにおけるイメージセンサとレンズの位置を変更することで焦点を合わせる対象を変更できる。また、ボケる量（以降ボケ量）を開口の大きさにより変更できる。「流し撮り」は物体の速さと深度、方向、撮影者のシャッタースピードとカメラを移動させる速度に依存し、動く被写体に追従するようにカメラを動かすことで被写体がまるで止まって、周りの風景が動いているように見える写真が撮影できる。両者とも、ボケやブレが希望通りに撮影できなかった場合に、後から変更することは困難である。このため、画像処理による撮影後のボケやブレの生成や除去、また特殊な機材やオプティクスを用いたボケやブレの操作が研究されている。画像処理による撮影後のボケやブレの生成としては全焦点画像に点広がり関数を畳み込み積分することで得られることが知られている [24]。逆にボケやブレを持つ画像に対しては点広がり関数を逆畳み込み積分することによって計算可能であるが、未知数が多いために不良設定問題として扱われる [20]。また、点広がり関数の畳み込み積分、逆畳み込み積分によるボケやブレの生成と除去は光学的に正しいとは言えない。そこで、近年では特殊な機材やカメラ、オプティクスを用いて光学的に正しく近似できる研究であるリフォーカス [16] が注目されている。リフォーカスは空間中の光線の集合（光線空間）として複数枚の画像を取得し、それらの画像を平行移動させ積分することで実現している。しかし、光線空間では時間情報を持つ光線の取得ができないため、時間方向の変化によって発生するブレの操作はできない。そこで本研究では「流し撮り」の対象に対して、光学的に正しいブレを後から変更、調整できる技術の確立のために、時間情報を保有する光線の取得方法とリフォーカス、合成開口の考え方を踏襲した手法「リパンニング」と「合成露光」を提案する。また、光線空間に時間情報を組み合わせた光線時空間をと提案し、光線空間によるリフォーカスと光線の時間情報によるリパンニングは統一的な枠組で操作でき

ることを示す．以下，第2章では関連研究について，第4章では光線における画像強度の定義と，光線空間を用いたリフォーカス，合成開口について述べ，第5章では時間情報を保有する光線に関する定義や，取得方法，また提案手法であるリパンニングと合成露光について説明する．第6章では両者を統一的枠組で操作できることを示し，それに対して実験を第7章で行い，第8章でまとめと今後の展望について述べる．



(a) 奥に注目



(b) 手前に注目

図 1: 焦点ボケによるぼかしの例



(a) シャッタースピードが遅い例



(b) シャッタースピードが速い例



(c) 流し撮りの例

図 2: シャッタースピードの変更による物体の見え方と流し撮り

2. 関連研究

本章では、関連研究として撮影後のボケやブレの操作の一種である、撮影後のボケやブレの生成と除去に関する研究について紹介する。生成、除去の両者共に、画像の劣化モデルを考慮する研究とオプティクスを利用して解決する研究の二種類が存在する。

2.1 撮影後にボケやブレを生成する研究

2.1.1 画像のボケ，ブレのモデル

ボケやブレの影響を受けた画像は、点広がり関数 (PSF) を畳み込み積分することで表される [24]。図 3 のように、これをフーリエ変換すると、ボケやブレの影響を受けた画像の空間周波数は全焦点画像の空間周波数と PSF の空間周波数の乗算で表すことができる。しかし、光学的に正しいボケやブレを再現するのは難しいとされている。

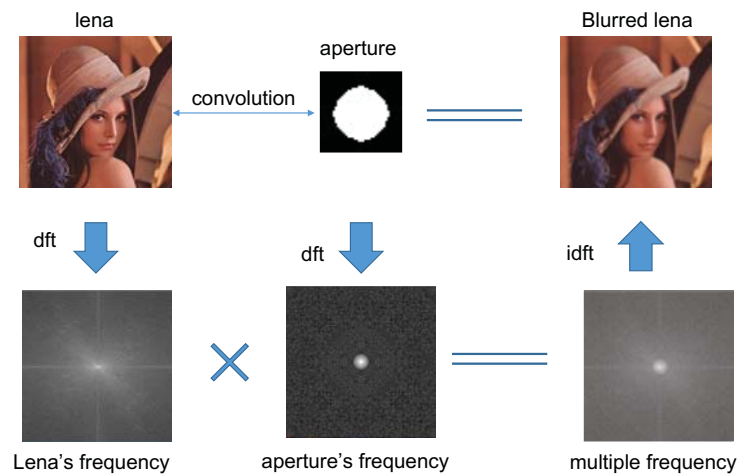


図 3: 畳み込み積分とフーリエ変換の模式図

2.1.2 オプティクスの利用

複数視点から撮影した画像を重ね合わせることで、光学的に正しいボケを再現し、対象をくっきりと写すことができるリフォーカスという技術が研究、商業利用されている [21], [11], [16], [7]. 特徴として、複数視点からの撮影が必須であるために、複数回での撮影が必要であったり、複数台のカメラ、特殊なレンズが必要である。この技術は撮影時に対象がほとんど遮蔽された場合でも、複数視点からの画像合成により、対象に注目することができるため [14], [19], 普通のカメラを超えた研究 “Computational Photography” と呼ばれる。

2.2 撮影後にボケやブレを除去する研究

2.2.1 画像のボケ、ブレのモデル

前節で述べた通り、ボケやブレの生成モデルは畳み込み積分によって実現されるが、ボケやブレの除去においては、ボケやブレの影響を受けた画像に PSF を逆畳み込み積分することで実現される [20]. 図 4 のように、これをフーリエ変換すると、全焦点画像の空間周波数は、ボケやブレの影響を受けた画像の空間周波数と PSF の空間周波数の除算で表すことができる。しかし、PSF 自体が不明である場合、不良設定問題になり、多くの研究者が画像の正則化について研究を行っている [6], [9], [10], [22], [12]. また、Cho[5] らは PSF の予想と逆畳み込み演算を繰り返し行うことで、最適なボケやブレの除去を実現している。

2.2.2 オプティクスの利用

画像のボケ、ブラのモデルを考慮した際、PSF が既知である場合にも一つ問題が発生する。それはフーリエ変換後の除算において、PSF の空間周波数がゼロを含むとゼロ除算になり計算できなくなることである。そこで、特殊な器具の利用によりゼロ除算を防ぐ方法が存在する。ボケに対しては、Levin らによる特殊な開口を使うことによりゼロ除算を回避する Coded Aperture[13] が提案され、ブレ

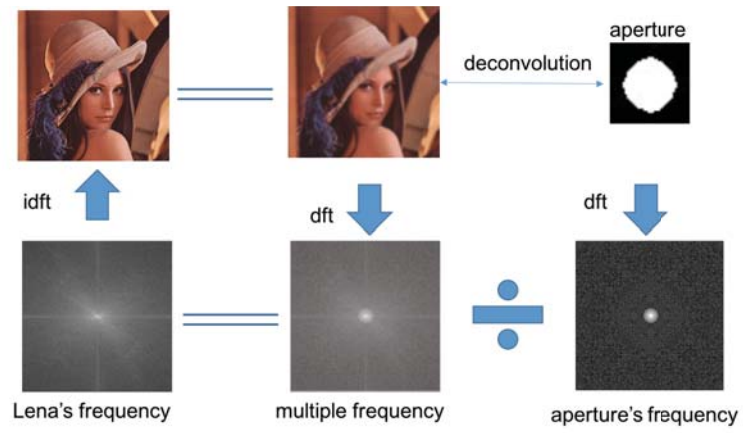


図 4: 逆畳み込み積分とフーリエ変換の模式図

に対しては Raskar による特殊なシャッターを使用することでゼロ除算を回避する Coded Exposure[17], [4] が提案されている.

3. プレノプティック関数

四次元時空間中に飛び交う光線は Adelson ら [2][3] が提唱したプレノプティック関数 (plenoptic function) で定義されることが多い。plenoptic は「完璧な」を意味するラテン語 plenus と光学系を意味する英語 optics の造語である。ある時刻 t において、角度 (θ, ϕ) 方向から開口位置 (X, Y, Z) に向かう光線について、波長 λ に注目した時の光線の強度 I は

$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (1)$$

として表すことができる。本論文において、光線空間並びに時間情報を持つ光線はプレノプティック関数で定義される。しかし、実際に7変数含む強度の取得は困難であり、その部分集合を強度として観測することが多い。

3.1 一般的なカメラと光線の定義

光線の強度を算出する時に変数の部分集合として扱う代表例としてはカメラが挙げられる。カメラが二次元画像として光線を記録する時、得られる強度は7変数における積分計算として表現できる。この時、一般的なカメラでは (X, Y, Z) は開口サイズ、 (λ) は分光反射率の積分値、 (t) は露光時間を表し、定数として扱うことができる。このため、 (X, Y, Z, λ, t) を定数とした時、カメラの取得する光線の強度の変数は方位 (θ, ϕ) のみである。さらに、空間中が真空、あるいは光線の距離減衰による影響を無視できる場合に Z は無視できるものとする。また、ピンホールカメラを仮定した時、図5のように (θ, ϕ) 方向から観測された点がピンホール (X, Y) を通り、ある点 (u, v) で観測される。この時、焦点距離 f と角度 θ より

$$u = X - f \quad (2)$$

$$v = Y - f \tan \theta \quad (3)$$

と計算できるため、 (θ, ϕ) は画像座標 (u, v) と書くことができる。

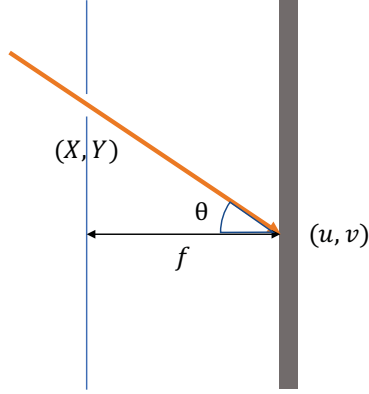


図 5: 角度と座標の関係

3.2 光線空間における定義

空間中の光線の集合を意味する光線空間においても，5 変数の部分集合として表すことができ，光線の強度が角度方向 (θ, ϕ) と視点位置の三次元座標 (X, Y, Z) で光線強度 $I = (X, Y, Z, \theta, \phi)$ と定義される．空間中が真空，あるいは光線の距離減衰による影響を無視できる場合 Z を無視した四変数 (X, Y, θ, ϕ) で表すことができる．また，この四変数で表される光線は図 6 に示すような，二平面におけるそれぞれの通過点を用いた表現や，図 7 に示す視点平面上のある点 (u, v) から観測した時に，画像平面上の点 (x, y) に届く光線として表現される．本論文では図 7 で表し，

$$p = (x, y, u, v) \quad (4)$$

と定義する．また光線の強度は距離によって減衰しないことを仮定しているため，その強度を

$$I_p = P(x, y, u, v) \quad (5)$$

とする．

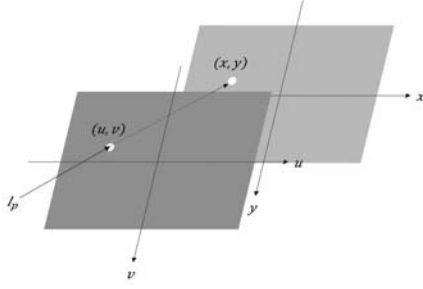


図 6: 2 平面を用いた光線空間の表現

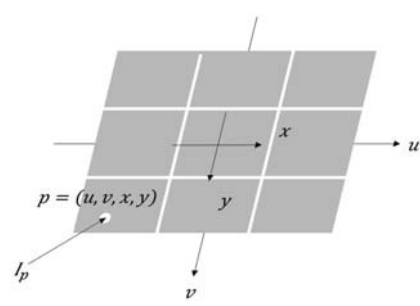


図 7: 多眼形式

3.3 光線の定義と時間情報

時間中の光線の集合を意味する光線空間においても，3 変数の部分集合として表すことができ，光線の強度が角度方向 (θ, ϕ) と時刻 t での光線強度

$$I = (\theta, \phi, t) \quad (6)$$

と定義される．この 3 変数で記述される光線を本論文では時間情報を持つ光線，光線時間と呼ぶ．光線における方位は図 5 と式 3 で述べた通り画像の画素位置に値するため，光線時間は図 8 に示されるように時刻 t の時に観測された画像の画素 (u, v) の輝度値として表すことができる．このため

$$I_t = P(u, v, t) \quad (7)$$

と記述できる．

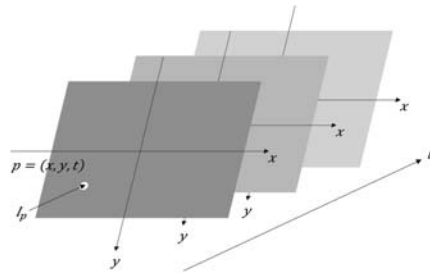


図 8: 多時間形式

4. 光線空間による合成開口とリフォーカス

第3章で説明した光線空間における光線の強度 $I_p = P(u, v, x, y)$ について本章では実環境での取得方法と、光線を用いたイメージング「合成開口」と「リフォーカス」について説明する。

4.1 光線空間の取得方法について

視点変数 (x, y) を取得するためには、様々な視点での光線を記録することが必要となる。このため、光線空間を記録する際には多視点での撮影が行われる。本節では代表的な三通りの取得方法について説明する。

4.1.1 カメラアレイシステム

カメラアレイとはカメラを平面上に配置した装置である。全てのカメラ素子で同時に撮影を行うことで、一度に多視点からの撮影が可能であり、光線空間を取得することができる。例として、Willburn, Levoy らによるカメラアレイシステム “Stanford Camera Array” [21] や ViewPLUS 社から発売されている “ProFUSION25” [18] などがあげられる。カメラアレイシステムの利点として、カメラ素子の任意配置により通常では実現不可能な開口サイズを実現可能にすること、カメラ素子間の同期によりシーン中の物体が動く場合においてもワンフレームにおける光線空間の取得が可能であることが挙げられる。欠点として、カメラ素子間のカメラパラメータを同一に校正する必要があること、カメラ素子自体がある程度の大きさを持つため、後述する取得方法よりも光線空間の密なサンプリングが難しいことが挙げられる。

4.1.2 可動ステージシステム

一台のカメラをステージ上に配置し、ステージを動かしながら複数回の画像取得から光線空間を記録する手法である。利点としては、使用するカメラが一台であるため校正が比較的用意であること、移動感覚を自由にできるため密なサン



図 9: ProFUSION25

リングも疎なサンプリングも可能であることが挙げられる．欠点として，複数回の撮影を必要とするため動く物体の光線空間取得は不可能である．

4.1.3 マイクロレンズアレイシステム

マイクロレンズアレイとは小さなレンズを平面上に並べた光学部品である．マイクロレンズアレイシステムではこの光学部品を撮像素子の全面に配置することで，一度の撮影による光線空間の記録を可能としている．この手法は 2005 年に Ng によって提案され，光線空間カメラ “Lytro” [15] として一般発売されている．Ng によるマイクロレンズアレイシステムの概略図を図 11 に示す．この撮像系の特徴は，物体上の同じ点から発せられる光線を，マイクロレンズアレイを用いることで，撮像素子上の異なる位置に記録できるため，光線方向情報を記録することが可能となる．この撮像系で得られるマイクロレンズアレイの画像例及びその拡大図を 12 にそれぞれ示す．図で 12 で円形上に輝度が低くなっている領域が，それぞれマイクロレンズの縁に対応する箇所であり，輝度低下はマイクロレンズによる周辺減光に起因するものである．

次にマイクロレンズアレイ画像と，光線空間の多眼表現との関係，及び変換について説明する．あるシーンをマイクロレンズアレイシステムで撮像する時の模式図を図 13 に示す．図 13 において，物体上の異なる位置から発せられる光線をそれぞれ青，赤，緑で示す．物体表面から発せられた光線は，それぞれ異なる方



図 10: *Lytro* と *LytroTM Illum*

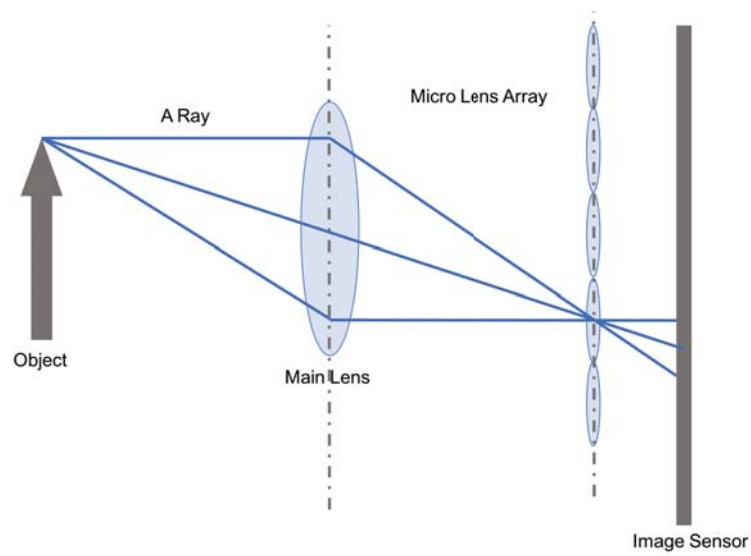


図 11: マイクロレンズアレイを用いた撮像系

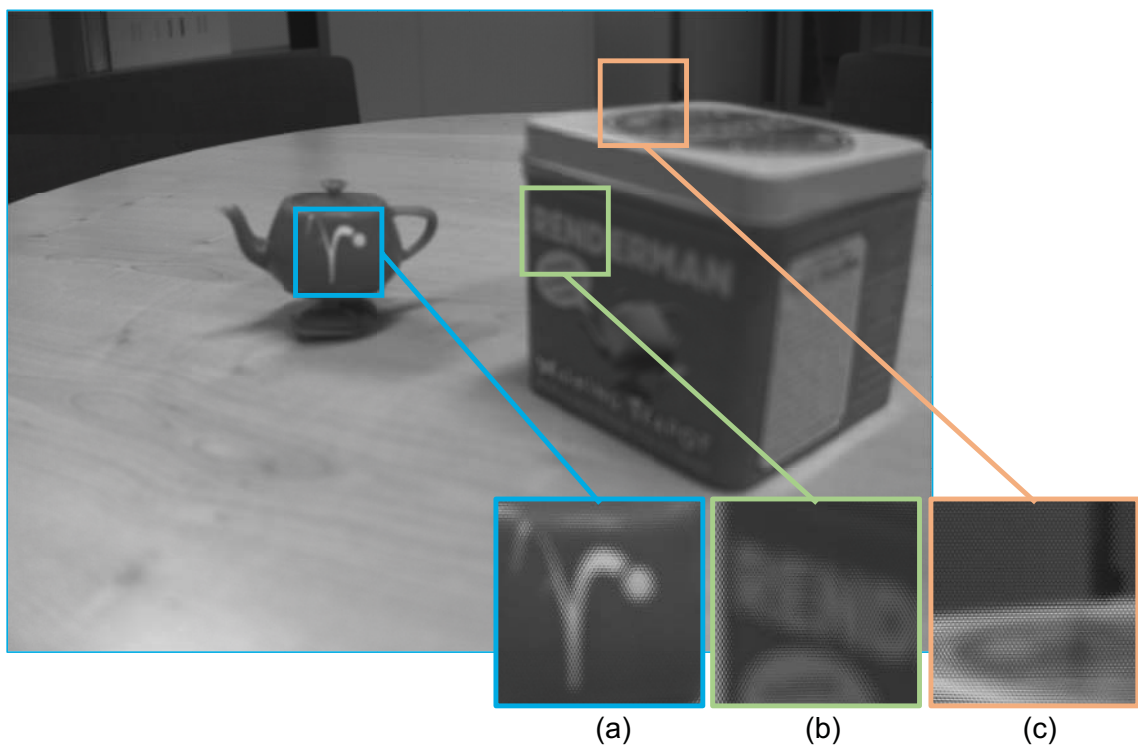


図 12: 撮像素子に記録されるマイクロレンズアレイ画像

向へと進み、メインレンズへ入射する。その後、それぞれの光線は撮像素子へと向かうが手前にあるマイクロレンズへ入射し、撮像素子上のそれぞれ異なる位置で強度が記録される。ここでメインレンズ上の領域に部分開口を上から A, B, C と定義する。部分開口 A を通る光線に着目すると、それらはそれぞれのマイクロレンズアレイを通過し、その後各色の撮像素子上の位置 (a) に到着する。B, C においても同様で、各色撮像素子上の (b), (c) に記録される。この時の輝度は式 (5) で表される。ここでマイクロレンズアレイ画像を、光線空間の多眼形式に変換することを考える。マイクロレンズアレイ画像の模式図を図 14 に示す。図 13 で表した光線（青赤緑）はそれぞれ図 14 に示すマイクロレンズアレイの違った箇所記録される。この時、各マイクロレンズアレイで受け取った光線に対して、それぞれ同じ位置の画素（図では各 (a) に対応する画素）を図中のように配置することで、図 14 に示す部分開口 A を通った光線のみから得られる画像を再構成できる。この並び替えをマイクロレンズアレイ中の全ての光線に対して行うことで、多眼形式に変換している。

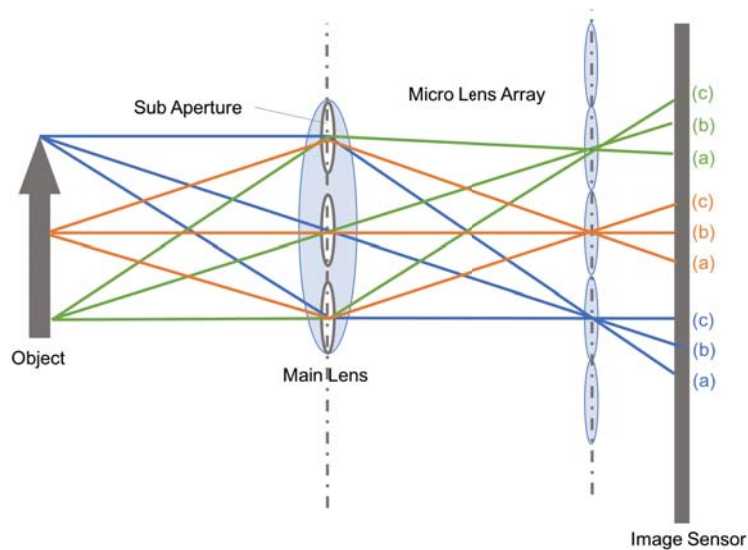


図 13: 撮像素子に記録されるマイクロレンズアレイ画像

マイクロレンズアレイシステムの利点として、一般的なカメラと同等の大きさまで小型化が可能であること、密なサンプリングが可能であることが挙げられる。

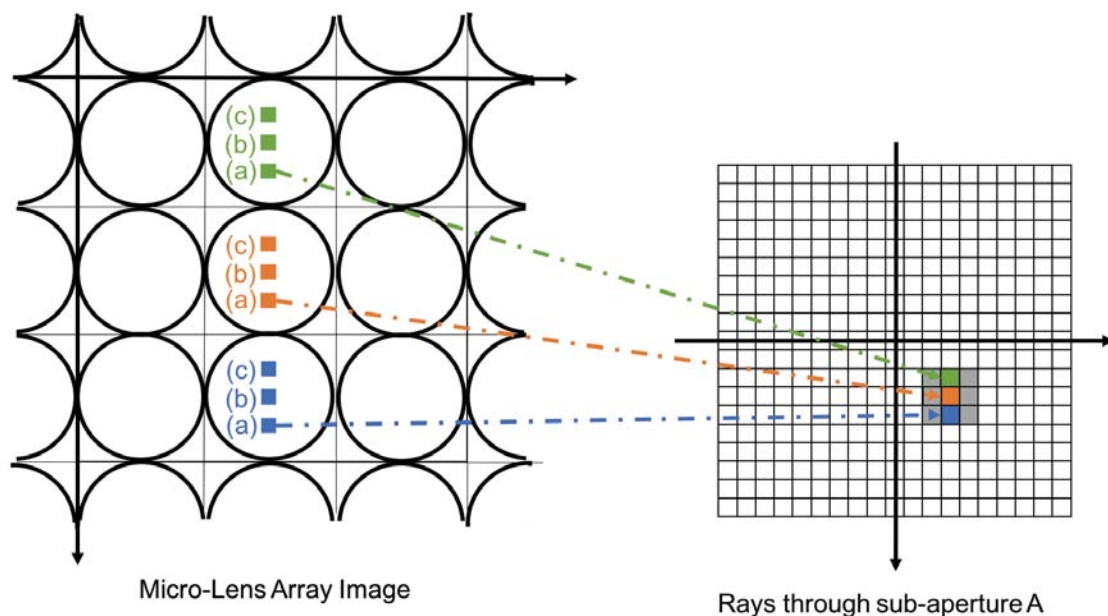


図 14: マイクロレンズアレイ画像から多眼形式への変換

欠点として、一つの撮像素子に光線空間を記録するために多眼形式へ画像化した際に解像度が下がってしまうこと、カメラ個体ごとに厳密な校正が必要なこと、レンズによる周辺減光の影響で異なる部分開口から得られる光線の輝度にばらつきが多いことが挙げられる。

4.2 光線空間の利用

光線空間にを利用することによって得られるイメージングとして「合成開口」, 「リフォーカス」, 「自由視点画像」が存在している。本節ではボケと光線空間の関係について述べた上で, 「合成開口」と「リフォーカス」について説明する。

4.2.1 ボケと光線の関係

本節では、ボケが生じる原理を光線を用いて説明する。ボケは複数の光線を一点に集光することによって生じる焦点の範囲外の距離に生じる現象である。つま

り，次式，

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (8)$$

で示される焦点距離図 15 に対して，物体やカメラが離れている現象のことを指す．図 16 のシーンにおいて，焦点が存在する距離 A にスクリーンを配置した場合，スクリーンには焦点があつた鮮明な像が観測される．一方で，距離 B にスクリーンを配置した場合，スクリーンにはボケた像が観測される．これは被写体から発せられた光が距離 A では一点に集光するのに対し，距離 B においては一点に集光されず，広がりを持つ光がスクリーンで観測されるためである．レンズから焦点までの距離のことを焦点距離 f といい，焦点距離以外の距離で発生するボケの量は，一点に集光されず広がりをもった像の大きさによって定義される．この像は開口の形に左右されるが，本研究では一般的な開口である円について考える．円において，像の大きさは円の直径の大きさを指し示し，この円を錯乱円と呼ぶ．錯乱円の直径 ϵ は像の奥行き方向のずれ δ とレンズの口径 D と焦点距離 f によって

$$\epsilon = \frac{D\delta}{f} \quad (9)$$

と定義される．レンズの口径 D を小さくした場合，許容錯乱円のと直径 ϵ も小さくなり，さらに撮像面まで到達する光線も現現象していく．レンズの口径 D を極めて小さくした場合，錯乱円の直径 ϵ は 0 に収束する．この時，撮像面まで到達し，観測されるのは一本の光線のみである．このため，レンズは複数の光線を集光する機能を失い，ボケが観測されなくなる．つまり，ボケは集光しない複数の光線が重なり合うことで生じる現象であると解釈できる．また，口径 D を極めて小さくしたレンズは微小な穴と透等価であると考えられる．微小な穴を用いて撮像するカメラのことをピンホールカメラと言い，ボケのない全焦点画像を作り出すことができる．

4.2.2 合成開口

合成開口とは多眼視点画像群を用いて，擬似的に開口サイズを変更し，どこまでボケるかボケ量を後から変更できる技術である．前節で述べた通り，開口サイ

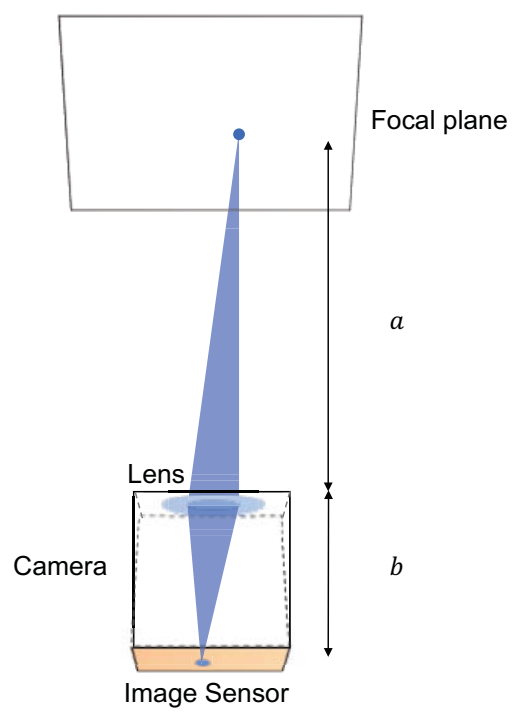


图 15: 焦点距离

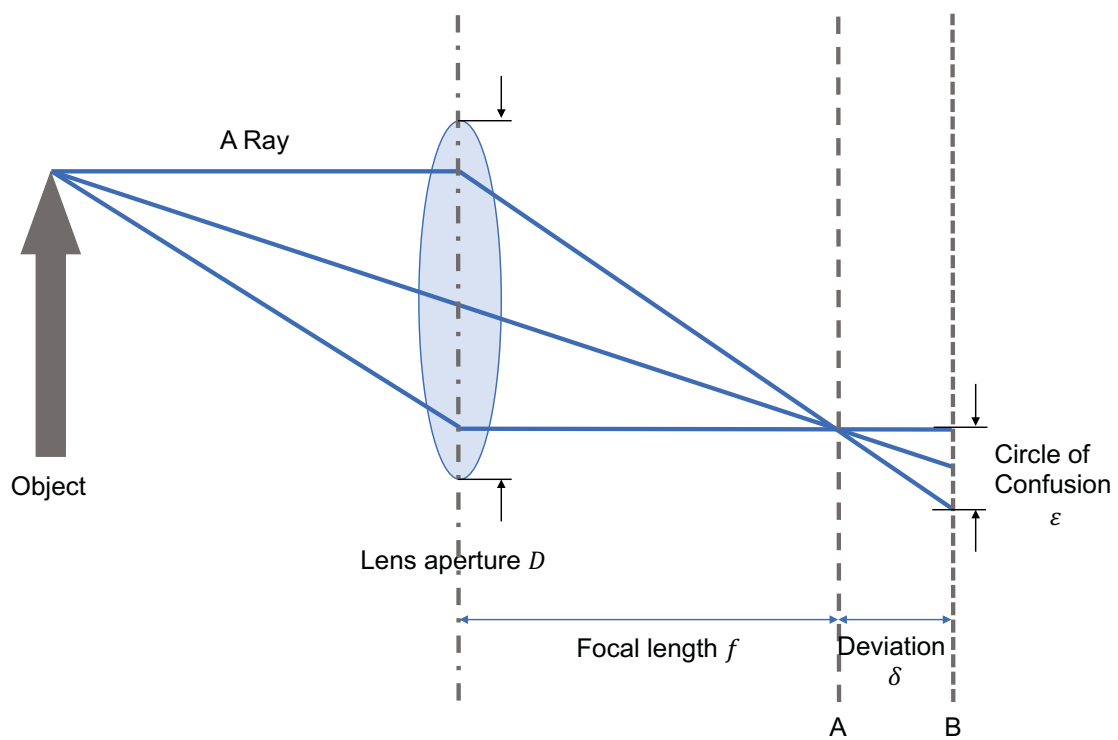


図 16: 焦点距離とボケの関係

ズが小さければ小さいほど光線の入射量は減り、ボケは少なくなり、大きければ大きいほど光線の入射量が増え、ボケは大きくなるという比例の関係である。このため、光線空間において光線の取捨選択ができるということは、撮像素子への入射量の変更につながる。図 13 はある被写体の一点から発せられた光線がマイクロレンズアレイを用いた撮像素子上に到達した様子を記したものである。また、メインレンズ上の部分開口を上から A, B, C とし、それぞれのレンズアレイを通過して撮像素子上で観測された点を $(a), (b), (c)$ とする。観測された点 $(a), (b), (c)$ の中から一つでだけ選択することでピンホールカメラと同じように撮像素子上のある一点で一本の光線のみが観測されたと同義になるために全焦点画像が生成される。逆に観測された点 $(a), (b), (c)$ に到達した光線全てを使用することは複数の光線が重なり合い、集光しなくなることと同義である。多眼視点画像群の量は被写体のある一点で発せられた光線の量と等価であり、多眼視点画像を足し合わせることは撮像素子への入射量を決めることにつながる。光線空間カメラの x 視点方向の視点数を N_x とし、 y 方向の視点数を N_y 、注目する画像座標を (u, v) とした時、合成開口 $S_a(u, v)$ は取得された光線空間 $I_p = P(u, v, x, y)$ を用いて

$$S_a(u, v) = \frac{1}{N_x \times N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} P(u, v, x, y) \quad (10)$$

と表すことができる。これは図 13 で観測された点 $(a), (b), (c)$ の画像を重ね合わせることで実現していることが確認できる。

4.2.3 リフォーカス

リフォーカスとは再びを意味する接辞「re」と焦点を意味する英語「focus」からなる造語である。撮影後の写真のフォーカスを変更する際に使われる言葉である。本節ではリフォーカスの仕組みについて説明する。図 17 のように物体 A が奥行き Z_A にある時かつ、 (x_0, y_0) のカメラ 1 視点から得られた画像座標 (u_0, v_0) に物体 A のある一点が撮影された場合を考える。この時、カメラ 1 で観測された画像座標 (u_0, v_0) の強度はカメラ 2 においては画像座標 (u_A, v_A) で観測される。

(u_A, v_A) は (u_0, v_0) カメラ間の視差 $(d_u(Z_A), d_v(Z_A))$ を用いて

$$u_A = u_0 + d_u(Z_A) \quad (11)$$

$$v_A = v_0 + d_v(Z_A) \quad (12)$$

と表すことができる．これは視点の違う画像に対し，注目点一点に画向かって画像を平行移動させることで，注目点においては強度を保持し続けることができることに相当する．次に，図 20に示す物体 A と B があるシーンに対して，それぞ

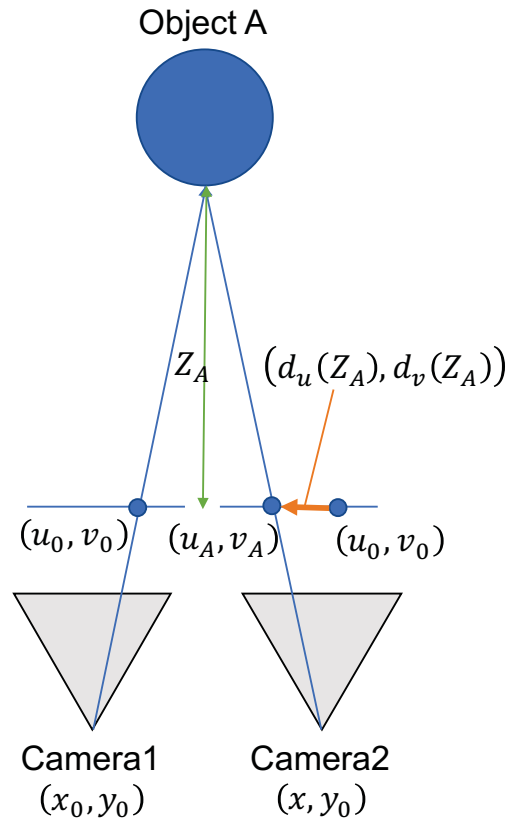


図 17: カメラ間の視差と画像座標の関係

れの物体の視差だけ画像を平行移動を行う．通常の光線取得では，平面 $u - v$ 上の視点から観測を行うが，この例では簡単に u 軸上の三点 $u = 0, 1, 2, 3, 4$ の五視点から行うこととする．図 20にて，観測された光線空間を多眼形式で表現したものを図 21に示す．この光線空間を画像群として見なした時，例えば物体 A は物体

A に注目した時の視差 $[d_A]_x$ だけ平行移動して加算することにより、図 22 のような物体 A に焦点を合わせた画像を得ることができる。物体 B は物体に注目した時の視差 $[d_B]_x$ だけ平行移動していた場合、上記と同様に画像を $[d_B]_x$ 画素だけ平行移動させて加算することにより、図 23 のような物体 B に焦点を合わせた画像を得ることができる。このとき、焦点を合わせた位置以外にある物体は、画像上でそれぞれずれて重なり合い、このずれが焦点ボケに相当する。

リフォーカスの画像は以下のように定式化できる。光線空間カメラの u 視点方向の視点数を N_u とし、 v 方向の視点数を N_v とした時、深度 z に合焦したリフォーカス画像 R_z について、中心視点 (x_0, y_0) における画像座標 (u, v) から、視点 (x, y) に平行移動して焦点を合わせた結果は、取得された光線空間 $I_p = P(u, v, x, y)$ を用いて

$$R_z(u, v) = \frac{1}{N_x \times N_y} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} P(u + d_x(z), v + d_y(z), x, y) \quad (13)$$

と決定される。このとき、 $d_x(z), d_y(z)$ は中心視点 (x_0, y_0) と視点 (x, y) で観測される視差であり、 $x - x_0$ 間のカメラ間隔を B_x 、 $y - y_0$ 間のカメラ間隔を B_y と中心視点における画像座標上で観測される物体の焦点距離 f を用いて

$$d_x(z) = \frac{B_x f}{z} \quad (14)$$

$$d_y(z) = \frac{B_y f}{z} \quad (15)$$

と計算できる。

カメラ間隔が一定である場合

前節で述べた、式 13 で表される $d_x(z)$ と $d_y(z)$ は画像間の平行移動量を示しており、リフォーカスにおいては画像間のそれぞれ x および y 方向に生じる、隣接視点における対応点に生じる視差を表している。ここでマイクロレンズアレイシステムのように得られる多眼形式画像群が一定のカメラ間隔を保有する場合について考える。図 24 に示すようにカメラ間隔が一定であるので中心視点 (x, y) と隣接する視点 $(x+1, y)$ の視差と視点 $(x+1, y)$ とさらに隣接する視点 $(x+2, y)$ の視差は同じであると考えられる。つまり、連続するカメラ間 $x - x+1$ 、 $x+1 - x+2$

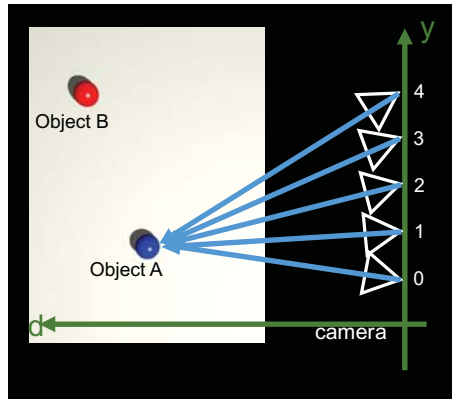


図 18: カメラと物体 A に注目したシーンの関係

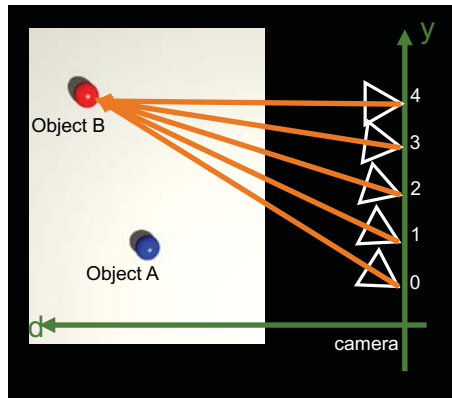


図 19: カメラと物体 B に注目したシーンの関係

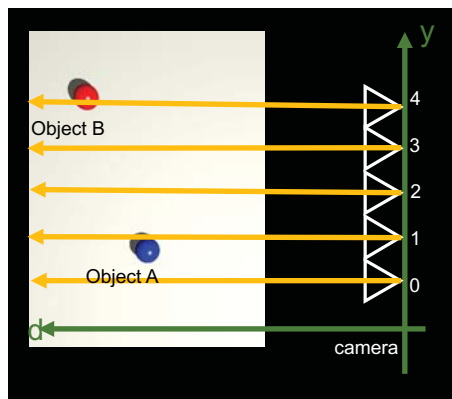


図 20: カメラと実際に撮影したシーンを上から見た模式図

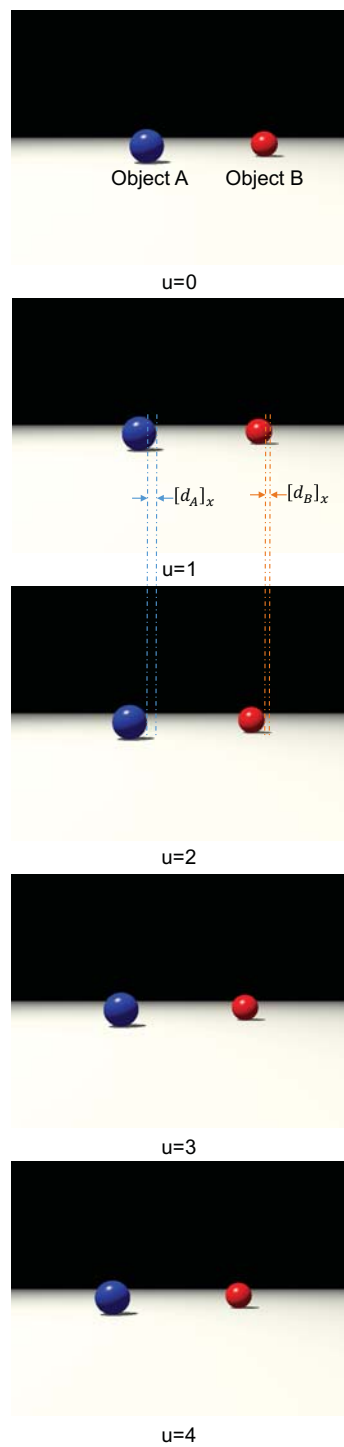


図 21: 多眼形式に変換

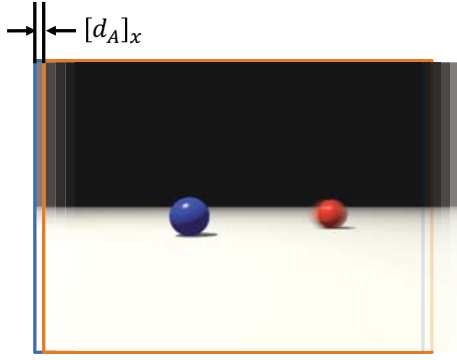


図 22: 物体 A にリフォーカス

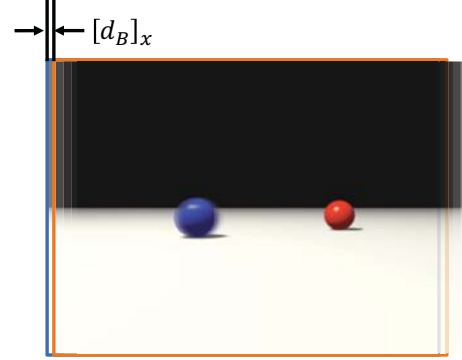


図 23: 物体 B にリフォーカス

は同じ視差を保有する．このため x 方向のカメラの個数 N_x と $x - x + 1$ 間の視差 $[d_0(z)]_x$ ， y 方向のカメラの個数 N_y と $y - y + 1$ 間の視差 $[d_0(z)]_y$ を用いて

$$d_x(z) = (x - x_0) \times [d_0(z)]_x = \frac{B_x f x}{z} \quad (16)$$

$$d_y(z) = (y - y_0) \times [d_0(z)]_y = \frac{B_y f y}{z} \quad (17)$$

と表すことができる．また， $B_x = B_y$ である時

$$d_x(z) = d_y(z) \quad (18)$$

とすることができる．

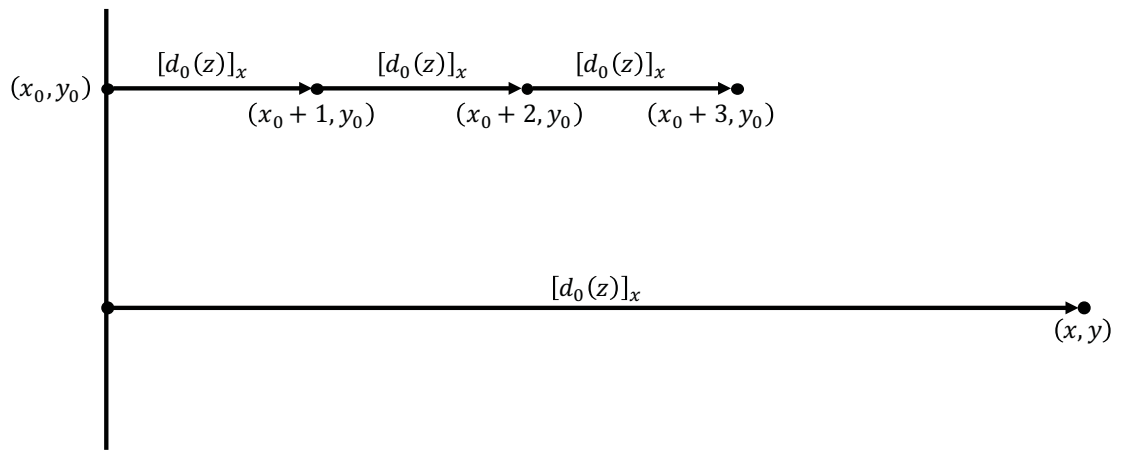


図 24: カメラ視差が一定であった時

5. 時間情報を用いた光線による合成露光とリパンニング

第3章で説明した光線空間における光線の強度 $I_t = P(u, v, t)$ について本章では実環境での取得方法と，光線を用いたイメージング「合成露光」と「リパンニング」について提案する．

5.1 光線時間の取得

一般的なカメラで二次元画像を撮影した際に得られる光線の強度の変数として画像座標 (u, v) が取得される．これに加えて，積分されていない画像情報を取得するという事は，光線時間の取得は各時間ごとの画像撮影によって可能であると考えられる．つまり，ビデオ機能を利用した動画撮影で可能になると考えられる．本研究では図に示すように，固定されたカメラで撮影で得られた動画をフレームごとに切り出し，時間ごとに切り出された画像群を光線時間とする．また得られた画像群を多時間形式で得られた画像と呼ぶ．

5.2 光線時間の利用

光線空間と光線時間は保有するパラメータの数は違えど，同じ提案で被写体ブレの変更，修正が実現できると考える．本研究では，ボケ量を変更できる「合成開口」に対しブレ量を変更できる「合成露光」を，またボケについて焦点を変更できる「リフォーカス」に対し，ブレについて焦点を変更できる「リパンニング」を提案する．そのために次節では被写体ブレの発生原因と流し撮りについて解説する．

5.2.1 ブレの発生と時間情報

写真において被写体ブレという現象はシャッタースピードを長くした状態で，動いている被写体を撮影した時に発生する現象である．図 27のように，焦点距

離にて観測された被写体から発せられた光線は静止物である場合は一点に集光するが、動物体である場合に別の撮像素子上の点で観測される。この現象が連続的に、全ての動物体で発生するために被写体ブレは発生する。つまり図 25 のようにシャッタースピード $t = i, j, k$ の一瞬だけで会った場合、センサのある一点に集光するので容易に全焦点画像の取得が可能になるが、図 26 のようにシャッタースピードが $t = i + j + k$ と長ければ長いほど、光線が撮像素子上の一点に集光せず、大きくブレた写真が生成される。

流し撮り（panning）は図 2 のように動く被写体を追従することで、焦点距離と被写体間の距離を変えずに撮影を行うことである。このため焦点距離にて観測された被写体から発せられた光線は動く被写体に対しては同じ撮像素子上で観測され続けるが、被写体と同じ動きをしていない物体に関してはブレた画像ができるという表現技法である。

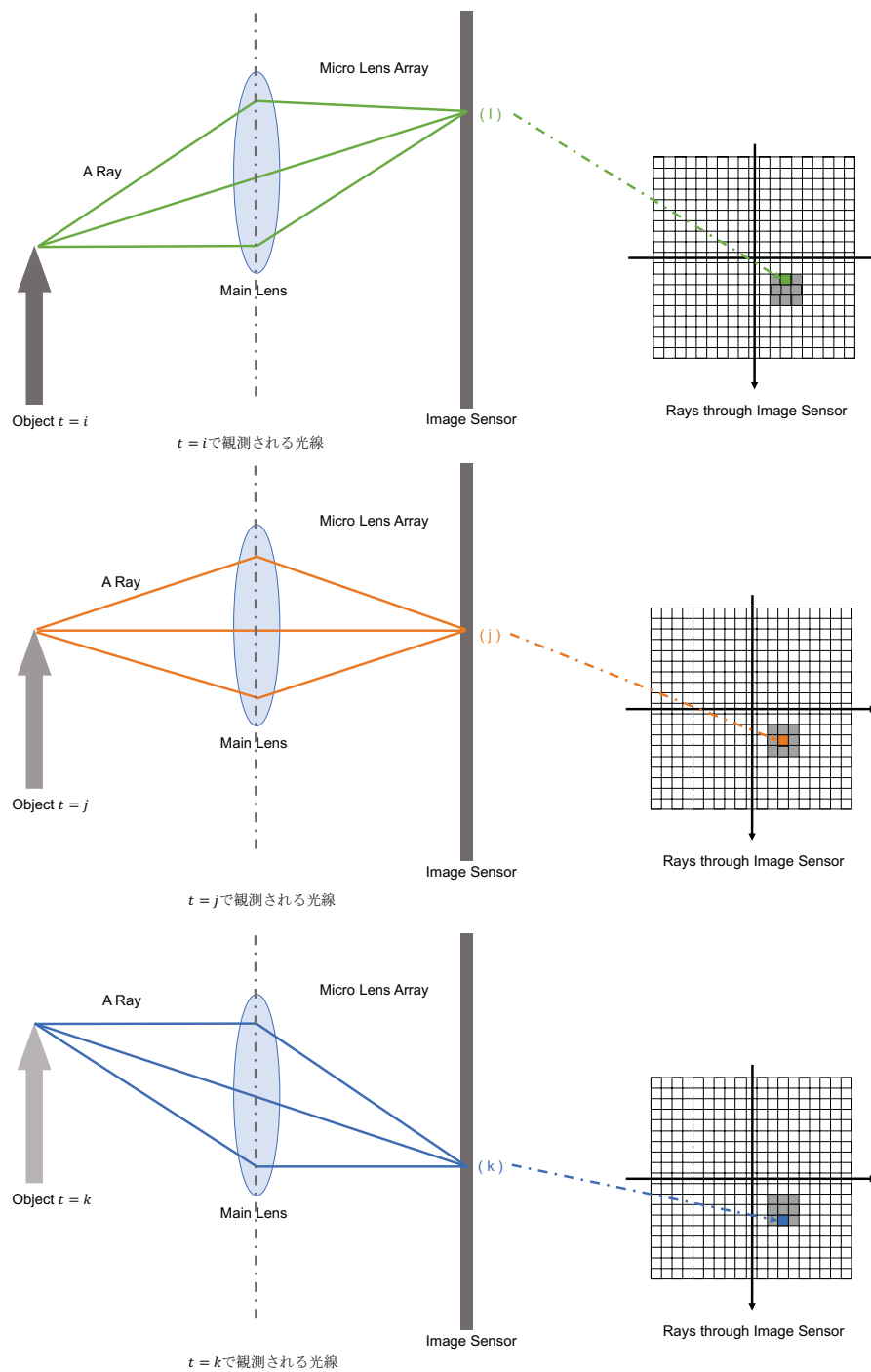


図 25: 物体が移動する際、シャッタースピードを短くして取得した光線の模式図

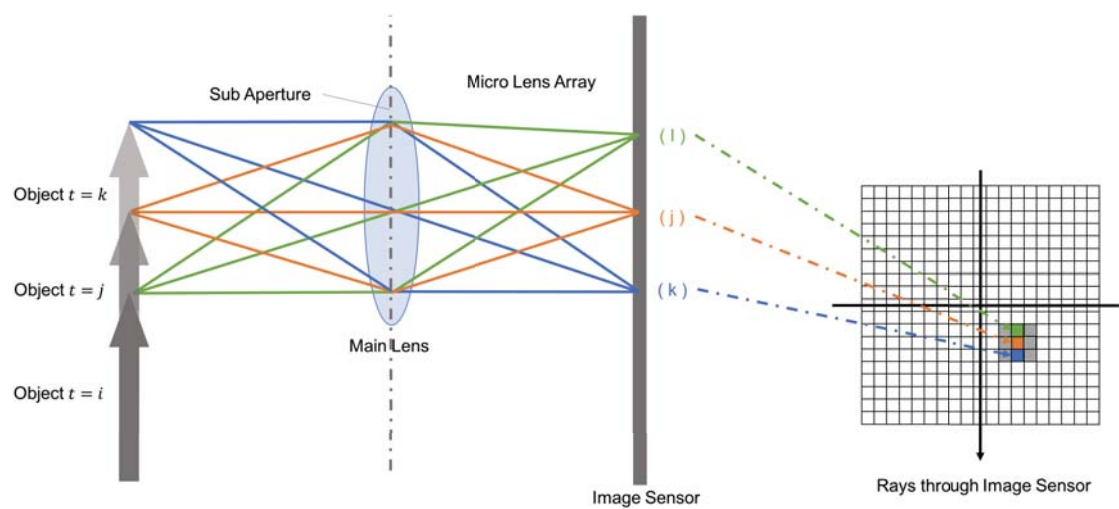


図 26: 物体が移動する際、シャッタースピードを長くして取得した光線の模式図

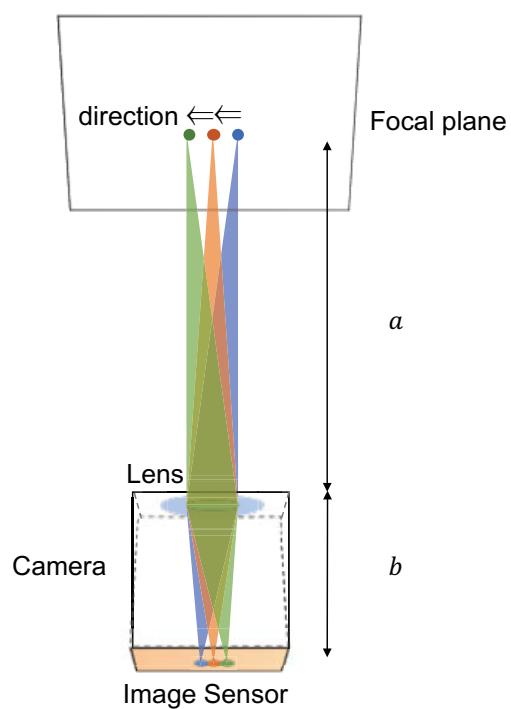


図 27: 被写体ブレの原理

5.2.2 合成露光

本研究ではまず、ボケ量を後から変更する合成開口に対し、ブレ量を後から変更する手法である合成露光を提案する。提案手法の入力は図 25 で定義される、多時間形式で表現された三次元光線時間とする。前節で述べた通り、シャッタースピードが短ければ短いほど光線の入射量は減り、ブレは少なくなり、長ければ長いほど光線の入射量が増え、ブレは増えるという比例の関係にある。このため、光線時間においても光線の取捨選択ができるということは撮像素子への光線の入射量につながる。図 25 はある動く被写体の一点から発生された光線を撮像素子上に到達するまでを表した模式図である。物体は連続的に A から B へ動くため、得られる光線は撮像素子上の X から Y 間で観測される。また時間 i, j, k で観撮像素子上で観測された点をそれぞれ $(i), (j), (k)$ とする。観測された点 $(i), (j), (k)$ の中から一つだけ選択することで、シャッタースピードを短くした時と同じように撮像素子上のある一点で一本の光線のみが観測されたことと同義になるため全焦点画像が生成される。逆に観測された点 $(i), (j), (k)$ に到達した光線全てを使用することは複数の光線が重なり合い、撮像素子上のある一点に集光しないことと同義である。多時間画像群の量は被写体が動いた時に得られた光線の量と等価であり、多時間画像群を重ねることと等価であると考え。動画時間を T_P とし、動画のフレーム数を F_P としたとき、得られる画像枚数 N_P は

$$N_P = \frac{T_P}{F_P} \quad (19)$$

である。被写体のある一点あたりに N_P 本の光線の入射した時の結果 $S_e(u, v, t)$ は取得された光線時間 $I = P(x, y, t)$ を用いて

$$P(u, v, t) = \frac{1}{N_P} \sum_{t=1}^{N_P} I(u, v, t) \quad (20)$$

と表すことができる。これは図 25 で観測された点 $(i), (j), (k)$ の画像を重ね合わせることで実現している。

5.2.3 リパニング

リパニングとは再びを意味する接続辞「re」と流し撮りを意味する「panning」からなる造語である．本論文では被写体ブレが発生している写真に対して，後から注目する被写体を変更することをリパニングと呼ぶ．本節ではリパニングに対して提案を行う．図 28 のように物体 A が奥行き Z_A にあり，時刻 t_0 の時カメラ (x, y) で撮影された物体 A のある一点の強度は画像座標 (u_0, v_0) で記録される．時刻 t_0 から t 秒進んだ際， (u_0, v_0) で記録されていた強度は時刻 t では (u_t, v_t) で記録される． (u_t, v_t) は画像座標の移動量 $([d_t]_u, [d_t]_v)$ を用いて，

$$u_t = u_0 + [d_t]_u \quad (21)$$

$$v_t = v_0 + [d_t]_v \quad (22)$$

と表すことができる．次に，光線時間の取得を行うシーン図 31 に対して，物体 A と B それぞれの移動量だけ画像を平行移動する．物体 A と B について A は u 方向へ B は v 方向へそれぞれ移動する．また，通常の光線取得では，動画時間 t 秒間の観測を行うが，この例では $t = 0, 1, 2, 3, 4$ の時間から行うことにする．図 32 にて観測された光線時間を多時間形式にした画像を示す．この光線時間を画像群として見なした時，例えば物体 A は画像間で $[d_A]_u$ 画素だけ平行移動して加算することにより，図 33 のような物体 A に注目した画像を得ることができる．上記と同様に物体 A は画像間で $[d_B]_v$ 画素だけ平行移動して加算することにより，図 34 のような物体 B に注目した画像を得ることができる．このとき注目した物体と同じ運動をしていない物体は，画像上でそれぞれずれて重なり合い，このずれが被写体ブレに相当する．

リパニングの画像は以下のように定式化できる．撮影された動画の時間方向を N_P ，ある時刻 t_0 における画像座標 (u, v) から時刻 t に平行移動して得られたリパニング結果 $R(u, 0)$ は，取得された光線空間 $I_P = P(u, v, t)$ を用いて

$$R(u, v) = \frac{1}{N_P} \sum_{t=1}^{N_P} P(u + [d(t)]_u, v + [d(t)]_v, t) \quad (23)$$

と決定される．この時， $d(t)$ は $t - t_0$ 間での物体の動きベクトルを示す．

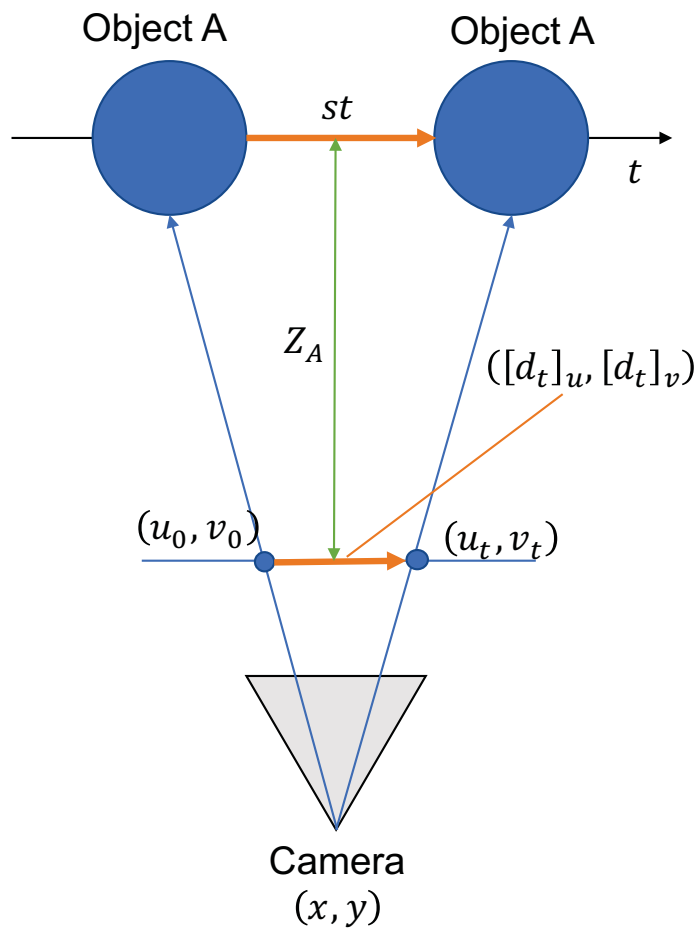


図 28: 物体の移動量と画像座標の関係

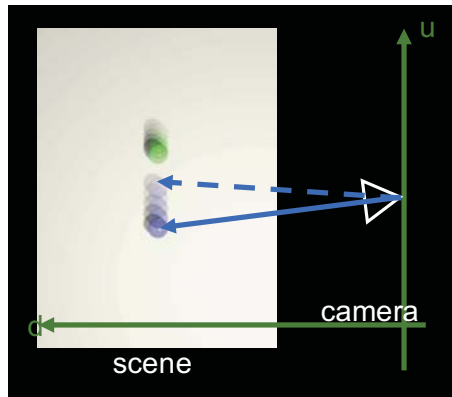


図 29: カメラと物体 A に注目したシーンの関係

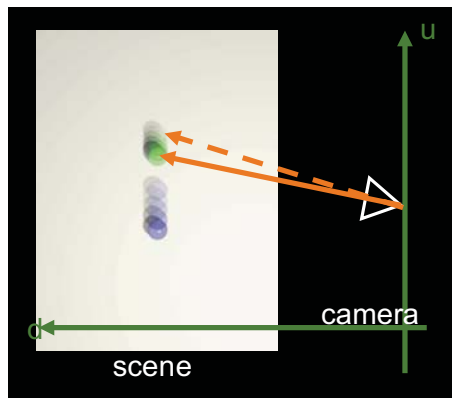


図 30: カメラと物体 B に注目したシーンの関係

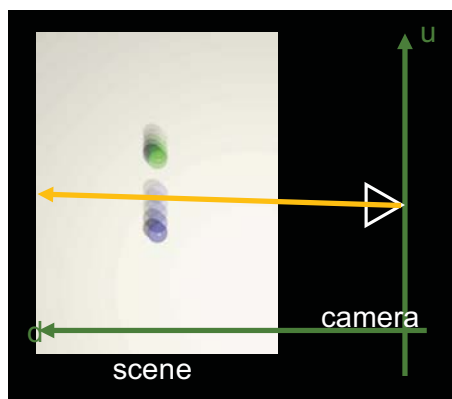


図 31: カメラと実際に撮影したシーンを上から見た模式図

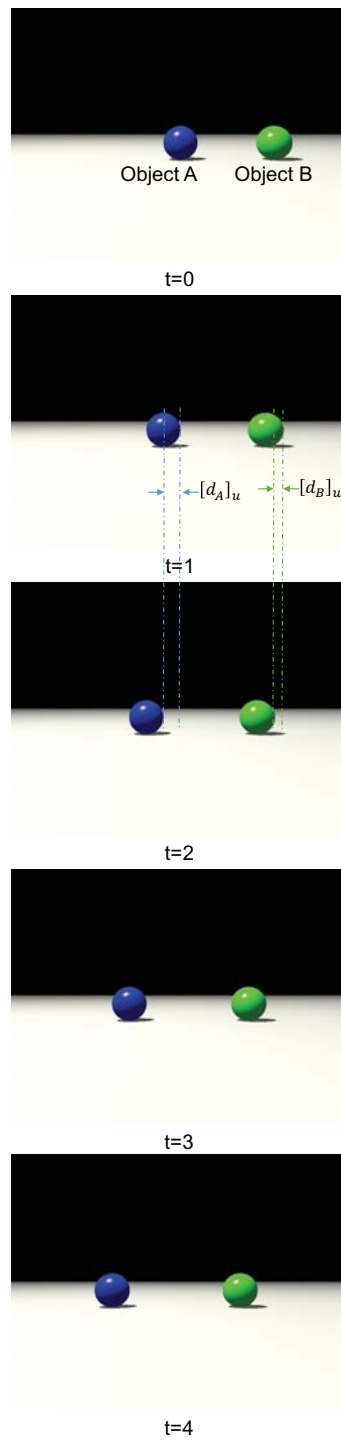


図 32: 多時間形式に変換

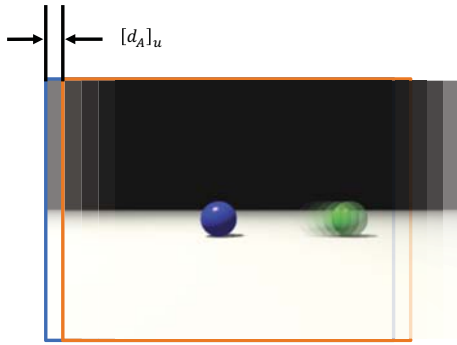


図 33: 物体 A にリパンニング

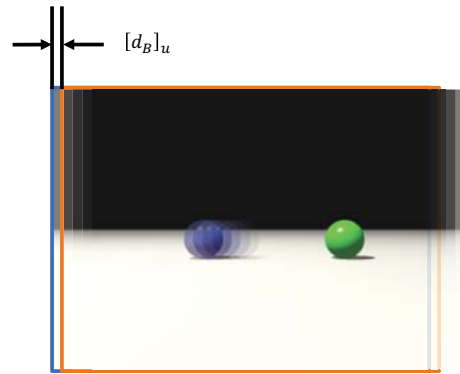


図 34: 物体 B にリパンニング

速度が一定であった場合

もし仮に、物体が等速直線運動であった場合に、動きのベクトルは一定であると考えられる。そのため、動きベクトルは図 28 より、奥行き Z_A で物体の速度 S の時、焦点距離 f と時刻 t を用いて

$$\mathbf{d}(t) = \frac{sf}{Z_A} t \quad (24)$$

と計算できる。

6. 光線時空間による合成撮像

3において説明したプレノプティック関数を用いて光線空間の光線の強度を $I = P(u, v, x, y)$, また光線時間の光線の強度を $I_t = P(u, v, t)$ と記述を行った. 光線時空間は光線空間と光線時間の変数の集合と捉えることができるため, 光線時空間における光線 p_s を

$$P_s = (u, v, x, y, t) \quad (25)$$

と定義する. P_s より光線時空間中の光線の強度を

$$I_s = P(u, v, x, y, t) \quad (26)$$

とする. この時, 図 35 ような視点平面上 (x, y) , 時間平面上 (t) における画像平面上の点 (u, v) に届く光線として表現する.

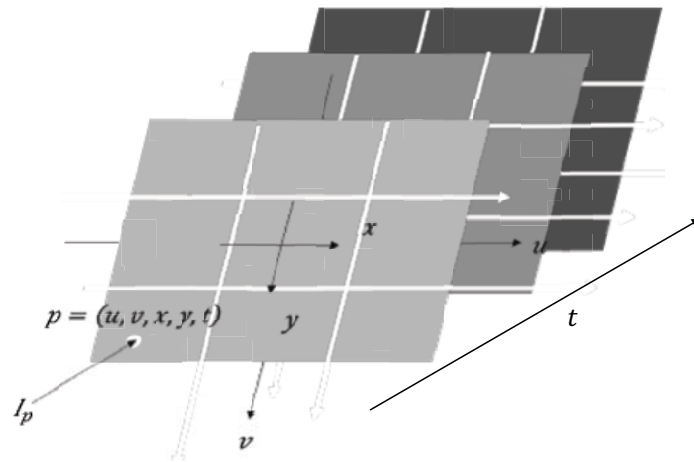


図 35: 多時間、多眼式

6.1 光線時空間の取得

光線空間においては様々な視点での光線記録, 光線時間では様々な時間での光線記録が必要であった. このことより, 光線時空間においては様々な視点かつ時間での光線記録が必要であると考え. すなわち, 光線時空間中の光線強度の取

得は光線空間カメラでの動画撮影によって実現できると考える．この時，時間 t で得られる光線空間の強度は全て同じ時間情報 t を保有する必要がある．このため，実在する三種の光線空間カメラのうち，可動ステージ式のものは使用することができないことに留意したい．

6.2 合成撮像と光線時空間の統一的枠組み

第3章，第4章で行われたイメージングであるリフォーカスとリパンニングを統合し，一つの枠組みでボケとブレが操作可能であることを説明する．また，本論文ではリフォーカスとリパンニングの統一的枠組みで得られるイメージのことを合成撮像イメージと呼ぶ．式13と式23より，リフォーカス，リパンニング共に画像間の移動量（前者が視差，後者が運動ベクトル）だけ平行移動することで実現している．このため，光線時空間においてはカメラ間の視差と物体の運動ベクトルを合成したものが移動量になると考えられる．基準となる時刻と視点 (x_0, y_0, t_0) における画像座標 (u, v) から，任意の時刻と視点 (x, y, t) の画像を平行移動して取得される合成撮像イメージは， x 軸方向のカメラの個数 N_x ， y 軸方向のカメラの個数 N_y ， t 秒間に取得した画像枚数 N_t ，深度 z ，光線時空間の強度 $I_s = P(u, v, x, y, t)$ を用いて，

$$R_z(u, v) = \frac{1}{N_x \times N_y \times N_t} \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} \sum_{t=1}^{N_t} P(u + d_x(z) + [d(t)]_u, v + d_y(z) + [d(t)]_v, x, y, t) \quad (27)$$

と表現できる．この時， $d_x(z)$ ， $d_y(z)$ はカメラ間の視差， $[d(t)]_u$ ， $[d(t)]_v$ は時刻変化による物体の運動ベクトルを表す．また，カメラ間隔と物体の速度が一定で会った場合に，式17，式18，式25より，

$$d_x(z) + [d(t)]_u = \frac{B_x f}{z} + \frac{S_x f t}{z} \quad (28)$$

$$d_y(z) + [d(t)]_v = \frac{B_y f}{z} + \frac{S_y f t}{z} \quad (29)$$

のように，変数 z を持つ式として書くことができる．以上より，リフォーカス，リパンニングは変数 z の移動量による画像の平行移動によって統一的枠組みでの操作が可能である．

7. 実験

提案手法を用いたリフォーカス，リパンニングの操作について，その有効性を確かめるために実験を行った．第1節では合成露光とリパンニングの有効性について示し，第二節ではリフォーカス，リパンニングの合成撮像について検証を行う．

7.1 光線時間に着目した実験

本節では実際に合成露光がブレ量を変更できるか，リパンニングが流し撮りのような効果を得られるか検証する．

7.1.1 得られる運動量が一定である

実験では図 36 のような環境で行う．コンシューマー向けカメラである Nikon 社の D5500 を使用する．カメラを固定した状態で動画撮影を 3 秒間行い，得られた動画を 1 フレーム 30 秒でクリッピングを行う．得られた 90 枚の画像 (図 37) を使用し，実験を行った．また，対象は平行移動ステージで，一定速度で移動する．表 1 にカメラと物体間，物体と物体間の距離、表 2 にそれぞれの速度と方向に示す．この際右方向に動く物体をマイナス、左方向に動く物体をプラスと表記する．提案手法を用いて合成露光を行った結果を図 38 示す．図 38 では (B) に注目し，(A) のブレ量が画像枚数に比例するように増加していることが確認できる．(C) は (B) の背後にあるため，全焦点画像では確認できないが，ブレ量を変化していくと (C) の被写体ブレが確認できる．

物体	物体間の距離 (cm)
カメラー物体 (A)	100
物体 (A) ー物体 (B)	10
物体 (B) ー物体 (C)	10

表 1: 物体間の距離

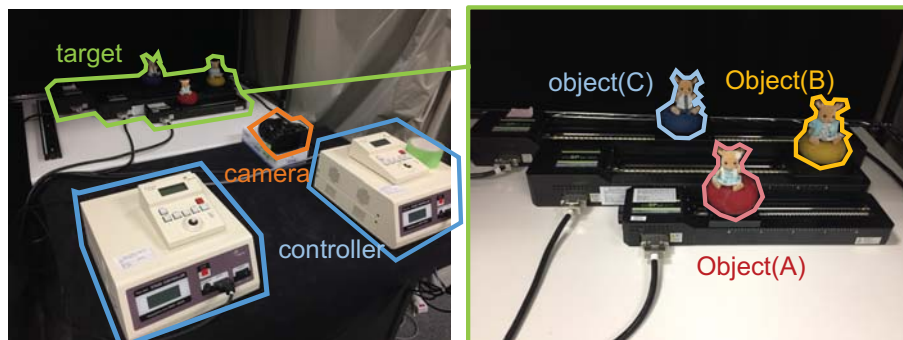


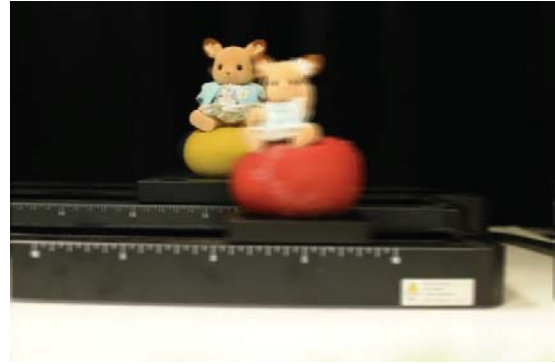
図 36: 実験環境と対象物体



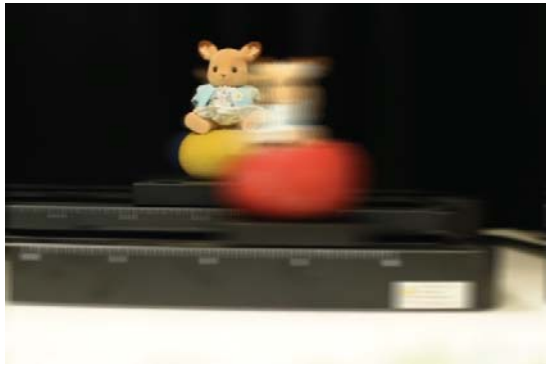
図 37: 撮影された動画



(a) 画像枚数 1 枚



(b) 画像枚数 3 枚



(c) 画像枚数 9 枚



(d) 画像枚数 33 枚



(e) 画像枚数 73 枚

図 38: 合成露光の結果

物体	物体の速度 (cm/s)
物体 (A)	+4.0
物体 (B)	-4.0
物体 (C)	+4.5

表 2: 物体の速度

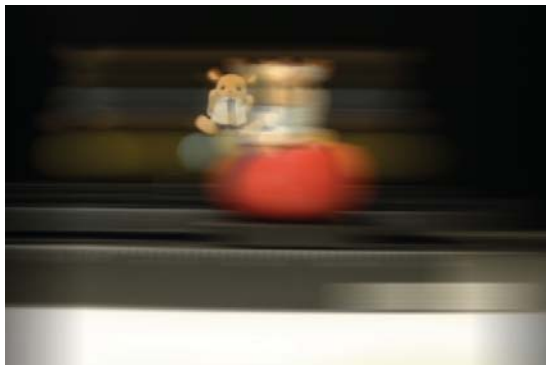
次に, (A), (B), (C) のそれぞれにリパンニングを行った結果を図 39に示す. (A) に注目した際, (B) は非常に大きな被写体ブレが起きているのに対して (C) はブレ量が小さい. 同じように (C) に注目した際, (B) は非常に大きな被写体ブレが起きているのに対して (A) はブレ量が小さい. 逆に (B) に注目した際, (A), (C) とともにブレ量が非常に大きいことが確認できる. これは, (B) が右に移動移動するのに対し, (A) と (C) は左に移動するため (B) と (A), (C) では大きく移動量が違うためであると考えられる. また, (A) と (C) は画像間の運動量が非常に近いためにブレ量が非常に近い値をとる取ると考えられる.



(a) A にリパンニング



(b) B にリパンニング



(c) C にリパンニング

図 39: リパンニング結果

7.1.2 得られる運動量が一定ではない

次に得られる運動量が一定ではない場合に，リパニングが可能であるか検証を行う．得られる運動量が一定ではないシーンとして，本実験ではジャグリングしているシーンを使用する．実験ではNikon社のNikon-1-J5を使用する．カメラを固定した状態で動画撮影を行い，得られた動画を1フレーム400秒でクリッピングし，そのうちの7枚(図40)を使用して実験を行う．運動量を計測するためにオプティカルフローを用いて計算する．本実験において，Farneback法[8]を用いてオプティカルフローを計算した結果を図41に示す．図53のように色相はオプティカルフローの角度，彩度はオプティカルフローの大きさを示す．この際，対象(C)のオプティカルフローは観測されていないように確認できるが，これは球が鉛直投射した際に最高点に達し，速度が0になったためであると考えられる．このオプティカルフローを用いて対象(A)(B)(C)にそれぞれリパニングした結果を図42に示す．対象(青)に着目した際，速度が0になるために移動していない背景や人物にも注目することが確認できる．

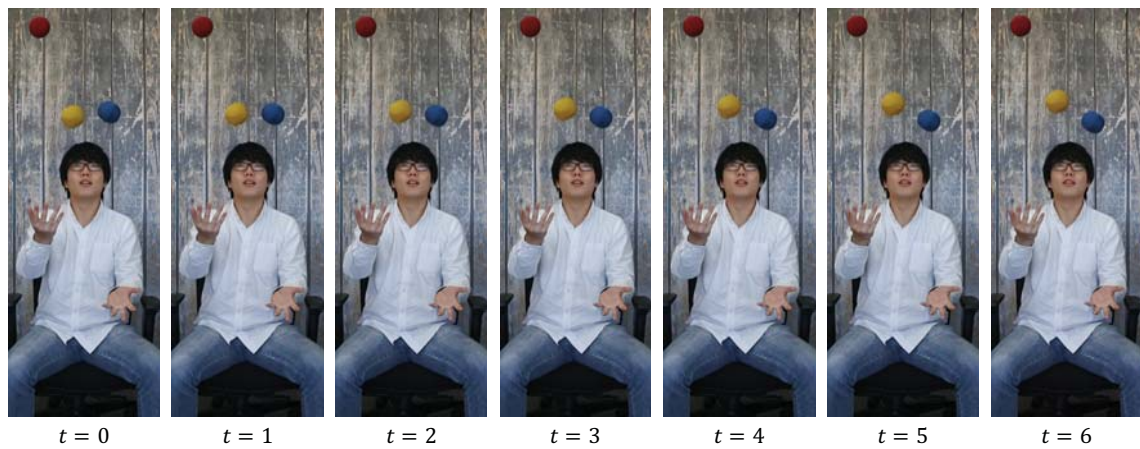


図 40: 撮影されたシーン

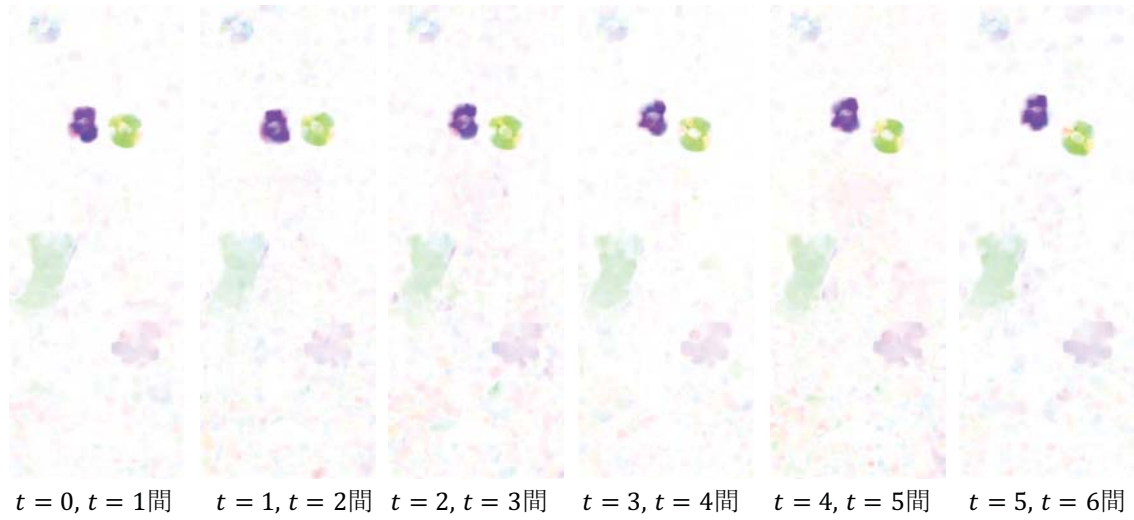


図 41: オプティカルフロー

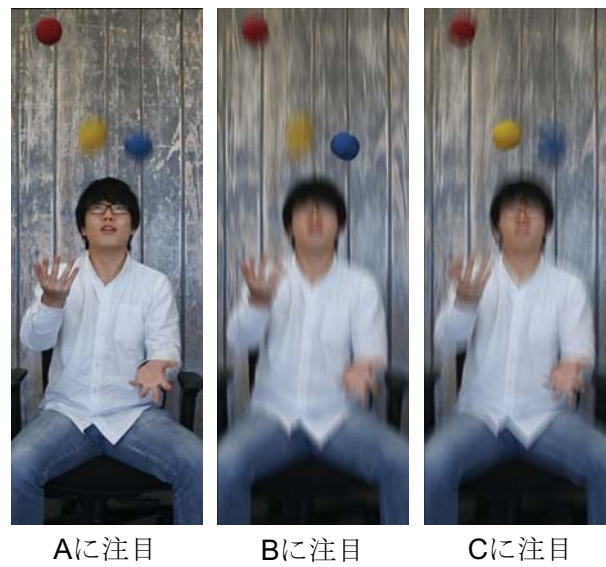


図 42: リパニング結果

7.2 光線時空間に着目した実験

本節ではリフォーカス，リパンニングの合成撮像によって，同じ焦点距離または同じ移動量の物体に対して適応できるか確認する．

7.2.1 得られる移動量が一定である

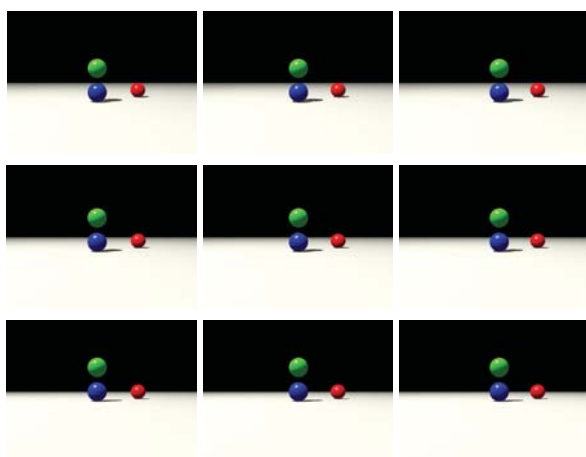
本実験ではそれぞれのカメラ間隔，物体の移動量が一定である CG による光線時空間データセット (図 43) を使用する．また図 44 より緑の球を (A)，青の球を (B)，赤の球を (C) とする．本実験で利用した光線時空間データセットは POV-Ray[1] によってレンダリングされている．光線時空間の角度方向分解能は 3×3 視点，時間方向分解能は 3 フレームである．また表 3 で図中の対象物体の位置と各時間における移動量を示す．この際右方向に動く物体をマイナス，左方向に動く物体をプラスと表記する．中心のカメラ位置は $(-1, 3, -30)$ に存在し， x 軸方向に隣接するカメラは $(-1, 0, 0)$ 座標， y 軸方向に隣接するカメラは $(-1, 0, 0)$ 座標だけ平行移動した位置に存在する．

物体	中心視点かつ $t=0$ での座標 (x, y, z)	各時間ごとの移動量 (x, y, z)
物体 (A)	$(0, 6, 0)$	$(0.5, 0, 0)$
物体 (B)	$(0, 1, 0)$	$(0.7, 0, 0)$
物体 (C)	$(11, 1, 10)$	$(1, 0, 0)$

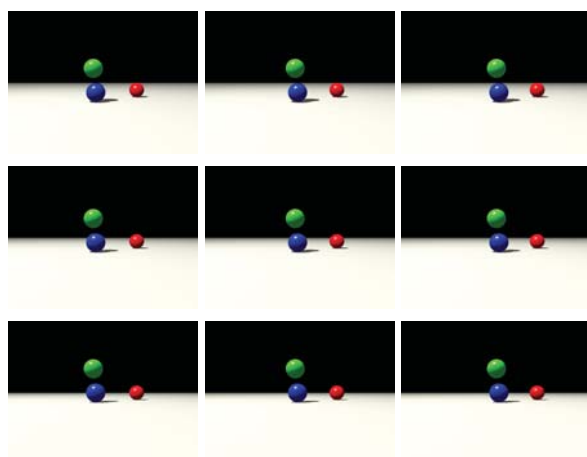
表 3: 物体座標と移動量

リフォーカスのみを行った結果が図 45 である．対象 (B) に注目した際，対象 (A) にも注目され，対象 (C) には t 注目されない．また，対象 (C) に注目した際，他の球はぼやけて見えることが確認できる．これは対象 (B) と対象 (A) が同じ焦点距離を有するのに対して，対象 (C) のみ焦点距離が異なるためである．

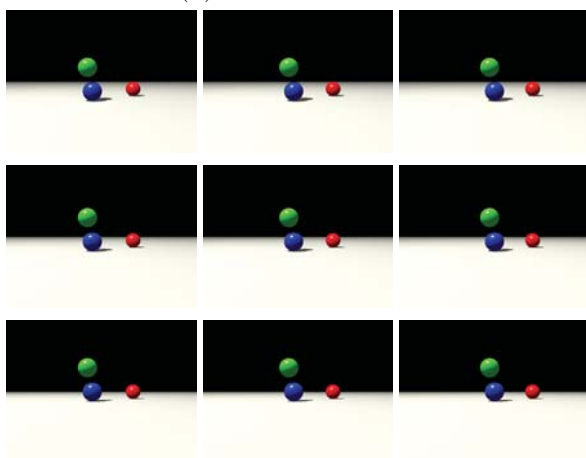
次にリパンニングのみを行った結果を図 46 に示す．対象 (B) に注目した場合，対象 (C) も注目され，対象 (A) はブレていることが確認できる．逆に，対象 (A) に注目した場合，対象 (赤)，対象 (B) には注目されないことが確認できる．これ



(a) $t=0$



(b) $t=1$



(c) $t=2$

図 43: 光線時空間データ

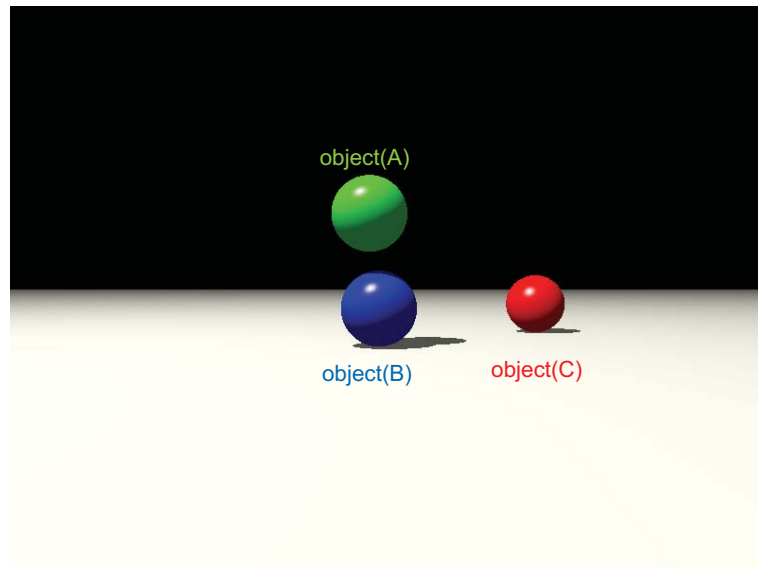
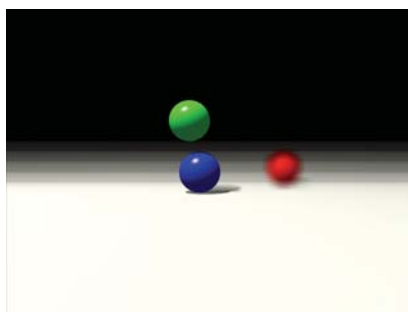
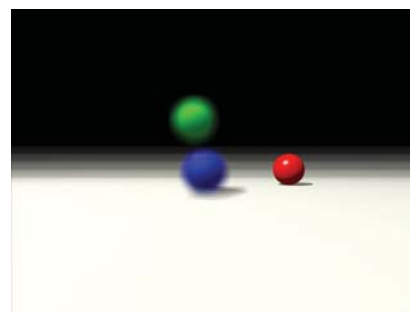


図 44: 対象物体



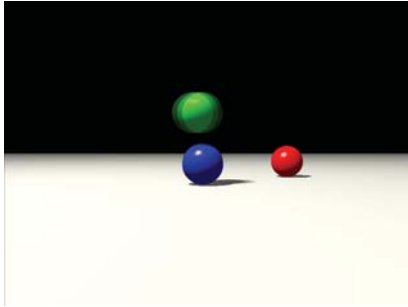
(a) 前面にリフォーカス



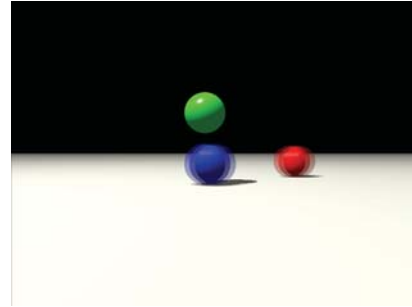
(b) 後面にリフォーカス

図 45: 光線時空間データ

は対象 (B) に対して対象 (赤) は同じ運動量を持ち、対象 (A) は違う運動量を保持するためである。



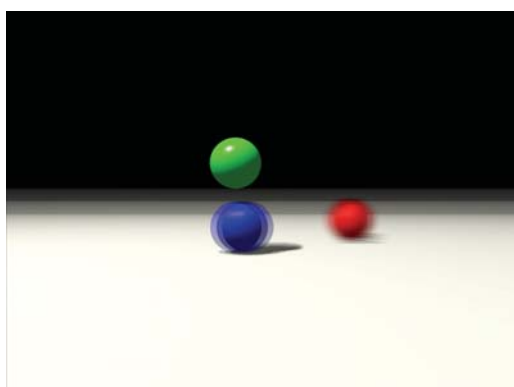
(a) 速度が遅い物体にリパンニング



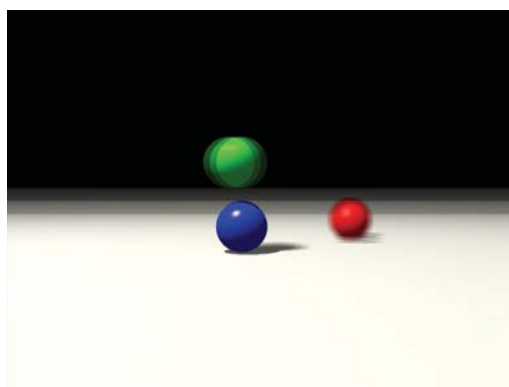
(b) 速度が速い物体にリパンニング

図 46: リパンニング結果

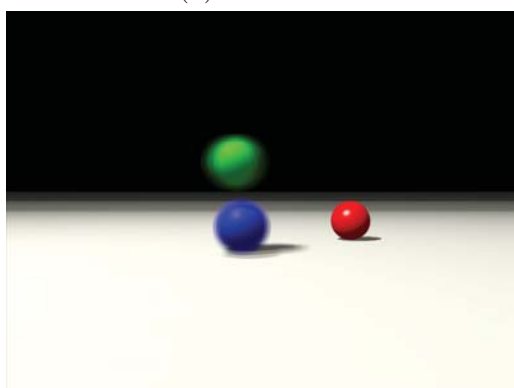
以上により、リフォーカス、リパンニングによって注目したい被写体ではなくとも、速度や深度が近いため、注目されることが確認できた。次に、合成撮像により、各対象一つずつに注目されるか確認する。合成撮像の結果を図 47に示す。対象 (A) に注目した場合、リフォーカスとリパンニングの結果を見比べると、合成撮像における対象 (C) ではリフォーカスした結果のように焦点ボケが発生し、対象 (B) ではリパンニングした結果のように被写体ブレが発生していることが確認できる。対象 (B)、対象 (C) の結果においても同様のことが言える。



(a) $t=0$



(b) $t=1$



(c) $t=2$

图 47: 合成撮像結果

7.2.2 得られる移動量が一定ではない

本実験では光線空間カメラ *LytroTM Illum* で連続撮影した光線時空間データセットに対して行った合成撮像を行った。 *LytroTM Illum* で動物体を撮影する際、イメージセンサから記憶媒体への画像書き込み速度が、動画撮影の速度に追いつかないという問題点が存在する。このため、本実験では動画での撮影ではなく、物体を動かし、撮影を行うことを繰り返す連続的な撮影を行っている。実験環境としては図 48 の通りである。本実験において、カメラを固定する必要があるが、動画撮影とは違い、シャッターを切る必要があるため、カメラが移動する可能性が存在する。このため、シャッターを切る際にはコンピュータを用いて遠隔での操作を行う。また、物体は平行移動ステージに乗せ、移動させる。この時、対象の移動速度と方向は表の通りである。得られた光線時空間データセットを図 49 に示す。光線時空間の角度方向分解能は 5×5 視点、時間方向分解能は 5 フレームである。

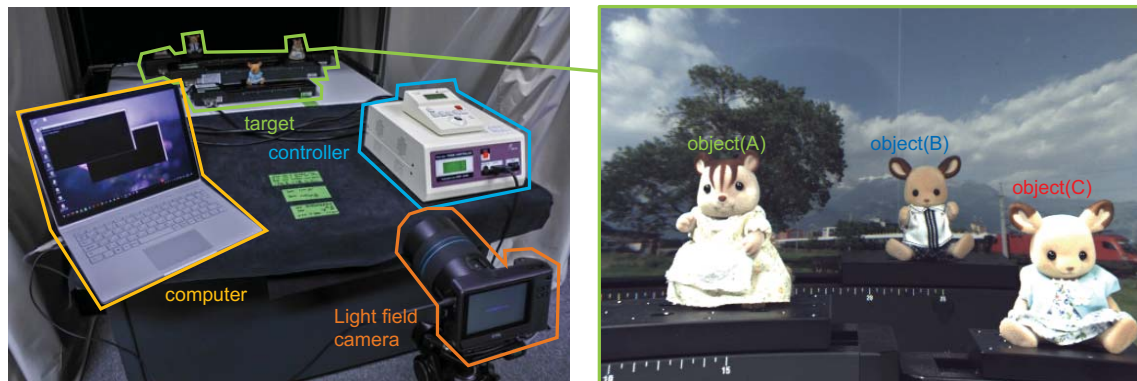
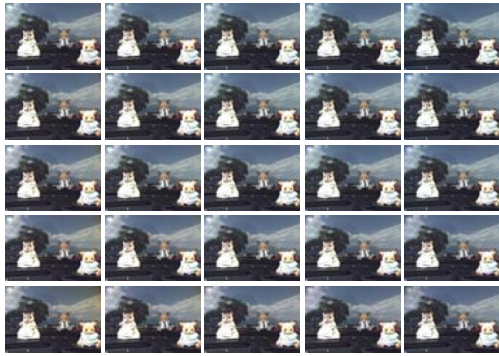


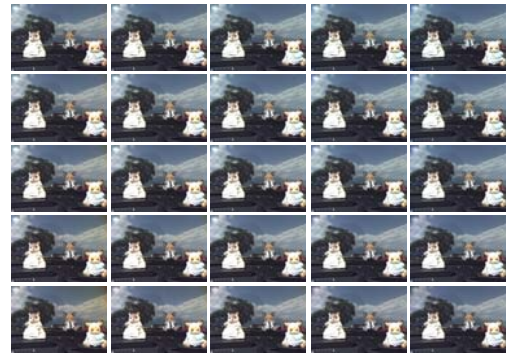
図 48: 実験環境

まず、リフォーカスのみを行うために、視差推定を行う。視差推定にはステレオマッチング [23] を使用し、得られた結果を図 50 に示す。次に、得られた視差よりリフォーカスを行った結果を図 51 に示す。対象 (A) と対象 (C) に注目した場合、非常に似通った像が取得されている。これは *LytroTM Illum* ではマイクロレンズアレイを使用する関係上、画像間での間隔が狭くなるためであると考えられる。

次にリパンニングのみを行うために、オプティカルフロー推定を行う。図 52 に



(a) $t=0$



(b) $t=1$



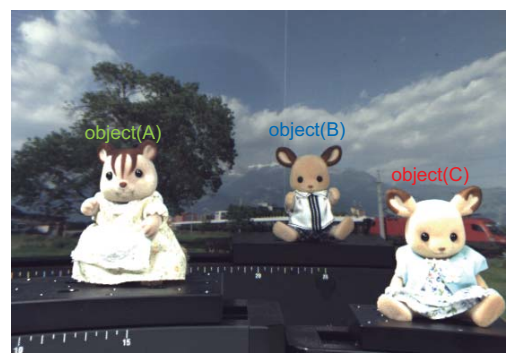
(c) $t=2$



(d) $t=3$



(e) $t=4$



(f) 被写体

図 49: 光線時空間データセット

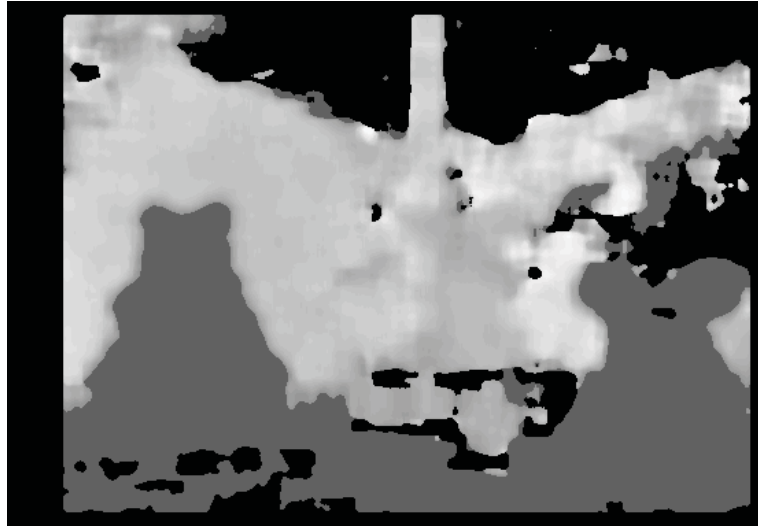


図 50: ステレオマッチングより得られた視差

推定したオプティカルフローを示す．本実験ではオプティカルフロー推定には Farneback 法 [8] を使用する．得られた結果を図 54 に示す．また，図 53 のように色相はオプティカルフローの角度，彩度はオプティカルフローの大きさを示す．結果は全て似通った像が表示されているが，これは各物体の運動量が非常に近いためである．

最後に，合成撮像を行った結果を図 55 に示す．それぞれ各物体に注目されていることが確認確認できる．リフォーカス，リパンニングでは違いが微小で似通った結果になったのに対して合成撮像では注目対象に注目されことについて考察を行う．リフォーカス，リパンニングにおいて，画像の平行移動量が似通った値を取ってしまったと考えられるが，式 27 において各平行移動量を足し合わせることによって，大きく差異が生まれたのではないかと考えられる．



(a) A にリフォーカス



(b) B にリフォーカス



(c) にリフォーカス

図 51: リフォーカス結果

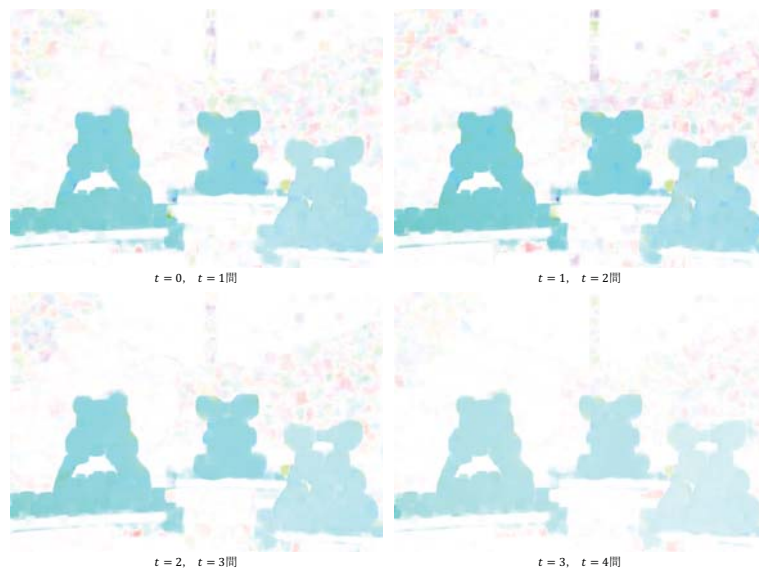


図 52: 得られたオプティカルフロー

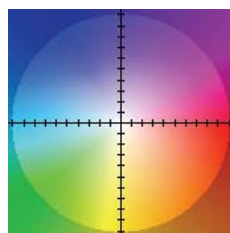


図 53: 色相と角度情報



(a) A にリパンニング



(b) B にリパンニング



(c) C にリパンニング

図 54: リパンニング結果



(a) A に注目



(b) B に注目



(c) C に注目

図 55: 合成撮像結果

8. まとめ

本論文では，焦点ボケと被写体ブレに注目し，光線空間による焦点ボケを操作するための合成開口とリフォーカス，光線時間による被写体ブレを操作するための合成露光とリパンニングを提案し，両者を統一的な枠組みで操作できるか検証を行った．光線空間の持つ多眼形式画像の積分と光線時間の持つ多時間式画像の積分は後から注目する被写体を変更する合成開口と合成露光が可能であることを確認した．また，画像を平行移動し，積分するリフォーカスとリパンニングにおいて，移動量の定式化を行い，イメージングを実現した．さらに，リフォーカスとリパンニングの二つの要素を持つ合成撮像において，希望の焦点距離かつ速度に合わせて注目した画像の生成ができることを確認した．本実験において，平行移動のための移動量はリフォーカス，リパンニング共に古典的な手法を利用しているが，別の手法を利用することにより精度の向上が期待できる．今後はこリフォーカス，リパンニングの選択を行える UI の開発により，有効性と実用性を示すことを目指す．

謝辞

本修士論文は、筆者が奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 博士前期課程在学中に、光メディアインタフェース研究室において行った研究をまとめたものです。本研究は、指導教員を引き受けてくださった先生方をはじめとする、数多くの方々からのご支援によるものです。この場を借りてお礼申し上げます。主指導教員を務めて頂いた向川康博教授には、勉強会やミーティングと研究全般にわたり丁寧にご指導、ご助言して頂きました。厚くお礼を申し上げます。研究資金獲得プロジェクトにおいて、行き詰まっている時に助言とアイデアをくださったことは今でも鮮明に覚えています。心より感謝申し上げます。また、本研究の遂行にあたり、有益なご助言、御鞭撻を頂いた環境知能学研究室の萩田紀博客員教授に厚くお礼を申し上げます。学内での発表では、萩田教授から頂いたご指摘より、どこが不明瞭だったか説明不足なのか明白になり、より一層研究活動をより良いものとすることができました。深く感謝いたします。光メディアインタフェース研究室の舩富卓哉准教授には研究に対して多くのご助言、ご指導を頂きました。厚くお礼を申し上げます。舩富先生には数え切れないほど、事象の解説や発表資料の添削など、遅い時間までご指導を頂き心から感謝いたします。また、本研究に多大なるご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室の久保尋之助教授に厚くお礼を申し上げます。時差があるなかでも親身にご意見や暖かな励ましを頂き、元気付けられました。心より感謝申し上げます。光メディアインタフェース研究室、田中賢一郎助教授には研究活動だけではなく、学生生活においても数々のご指導を頂きました。厚くお礼を申し上げます。使用したことのないツールに混乱している時には丁寧に解説していただきました。心から感謝いたします。

また、研究室生活において様々な支援をして頂いた、光メディアインタフェース研究室秘書、登淑恵さんに厚くお礼を申し上げます。学会の手続きやCICPでの予算の管理など複雑な手続きにも柔軟に対応していただき、深く感謝いたします。私自身頭になかった研究資金獲得プロジェクトを紹介、支援していただいた国立情報科学研究所 Computational Imaging and Vision 研究室特任研究員の青砥隆仁氏に厚くお礼を申し上げます。発表資料作成や発表練習には非常に多くの時

間と助言と励ましをかけてくださいました。心から感謝いたします。光メディアインタフェース研究室博士後期課程の岩口堯史さん、高谷剛志さん、櫛田貴弘さん、Arnaud Delmotteさん、ロボットビジョン研究室の秋山解さんには多くの助言と手助けをしていただきました。疑問を一つ一つ解決厚して下さったおかげで自分自身の理解を深めることができました。本当にありがとうございます。光メディアインタフェース研究室博士前期課程の池谷信寛さん、大野大志さん、梶原武紘さん、北野和哉さん、佐藤祐紀さん、鈴木大介さん、坪田一総さん、西川雅清さん、峰友佑樹さん、宮田明裕さん、井上裕太さん、上田朝己さん、中西由希子さん、藤田紘樹さん、連孟さん、山本皓平さんと研究室で共に過ごし、切磋琢磨したことは私の絶対的な支えになると思います。自分の至らないところが多い中で、実験の被写体になっていただいたり、実験を手伝って頂いたり、何度も助けて頂き、本当にありがとうございました。

本学での2年間の学びは、大変楽しく、有意義なものでした。最後まで私の好きなようにと支援し、応援して頂いた父と母に感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Pov-ray. <http://www.povray.org>.
- [2] Edward H. Adelson and James R. Bergen. The plenoptic function and the elements of early vision. In *Computational Models of Visual Processing*, pages 3–20, 1991.
- [3] Edward H. Adelson and James R. Bergen. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE, PAMI*:14, 1992.
- [4] Amit Agrawal and Ramesh Raskar. Resolving objects at high resolution from a single motion-blurred image. *CVPR2007*, 2007.
- [5] Sunghyun Cho and Seungyong Lee. Fast motion deblurring. *SIGGRAPH2009*, 2009.
- [6] Shengyang Dai and Ying Wu. Removing partial blur in a single image. *CVPR2009*, 2009.
- [7] Daniel Donatsch, Siavash Arjomand, Philippe Robert, and Matthias Zwicker. Hand-held 3d light field photography and applications. *CGI2014*, 2014.
- [8] Gunnar Farneback. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion. *SCIA2003*, 2003.
- [9] Rob Fergus, Barun Singh, Aaron Hertzmann, Sam T. Roweis, and William T. Freeman. Removing camera shake from a single photography. *SIGGRAPH2006*, 2006.
- [10] Amit Goldstein and Raanan Fattal. Blur-kernel estimation from spectral irregularities. *ECCV2012*, 2012.
- [11] Natsumi Kusumoto, Shinsaku Hiura, and Kosuke Sato. Uncalibrated synthetic aperture for defocus control. *CVPR2009*, 2009.

- [12] Chia-Chen Lee and Wen-Liang Hwang. Sparse representation of a blur kernel for blind image restoration. *CVPR2015*, 2015.
- [13] Anat Levin, Rob Fergus, Frédo Durand, and William T. Freeman. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. *SIGGRAPH2007*, 26, 2007.
- [14] Marc Levoy, Billy Chen, Vaibhav Vaish, Mark Horowitz, Ian McDowall, and Mark Bolas. Synthetic aperture confocal imaging. *SIGGRAPH2004*, 23, 2004.
- [15] Lytro. The lytro camera. <https://lytro.com>.
- [16] Ren Ng, Marc Levoy, Mathieu Brédif, Gene Duval, Mark Horowitz, and Pat Hanrahan. Light field photography a hand-held plenoptic camera. *Stanford Tech Report CTSR2005-02*, 2005.
- [17] Ramesh Raskar, Amit Agrawal, and Jack Tumblin. Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter. *SIGGRAPH2006*, 25, 2006.
- [18] Dairoku Sekiguchi, Masahiro Matsuyama, and Shigesumi Kuwashima. Development of profusion 25. *CVIM*, 2008-CVIM-162, 2008.
- [19] Vaibhav Vaish, Gaurav Garg, Eino-Ville Talvala, Emilio Antunez, and Bennett Wilburn. Synthetic aperture focusing using a shear-warp factorization of the viewing transform. *CVPR2005*, 2005.
- [20] Ruxin Wang and Dacheng Tao. Recent progress in image deblurring. *CVPR2014*, 2014.
- [21] Bennett Wilburn, Neel Joshi, Vaibhav Vaish, Eino-Ville Talvala, Emilio Antunez, Adam Barth, Andrew Adams, Mark Horowitz, and Marc Levoy. High performance imaging using large camera array. *SIGGRAPH2005*, 24, 2005.

- [22] Li Xu and Jiaya Jia. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring. *ECCV2010*, 2010.
- [23] 奥富正敏. chapter14 ステレオビジョン. In デジタル画像処理 [改定新版]. CG-ARTS 協会, 2015.
- [24] 斎藤英雄. chapter7 画像の復元と生成. In デジタル画像処理 [改定新版]. CG-ARTS 協会, 2015.