Vol.2019-CVIM-216 No.12
2019/3/8

短時間露光画像列の演算による リパンニングの実現

山本 皓平[1]　津田 香林[1]　田中 賢一郎[1]　久保 尋之[1]　舩冨 卓哉[1]　向川 康博[1]

概要：動いている被写体がぶれず，背景がぶれることにより被写体の躍動感を表現する写真の撮影技法である流し撮りは，動く被写体を追従しながら長時間露光撮影するため，難易度の高い撮影技法とされてきた．そこで本研究では，高速度カメラで撮影した短時間露光画像列を撮影し，撮影後に被写体を指定することで自由に流し撮りの効果を再現できるリパンニングを提案する．また，撮影した画像列をフレーム補間することで，高速度カメラを用いずに通常のカメラでも良好な背景ぶれを合成できることを示す．さらに従来手法であるライトフィールドカメラを用いたリフォーカスと本手法のリパンニングの併用が可能であることを示す．

1. はじめに

一般的なカメラには，撮影前に設定するパラメータが多数あり，代表されるものでは F 値，焦点位置，露光時間，ISO 感度などが挙げられる．認識処理などへの入力として用いる画像を撮影する場合には，焦点ぼけや動きぶれのない鮮明な画像の撮影が求められることが多く，画像処理にこれらを除去する deblurring と呼ばれる手法が多く開発されてきた [5], [6]．これに対し，写真撮影における表現技法として，被写体だけに焦点を合わせて背景を敢えてぼかした写真が美しく感じられ，好まれることもある．その 1 つとして，流し撮り (panning; パンニング) は動きぶれを利用した撮影技法であり，動く被写体に対して十分短い露光時間で通常撮影した場合は図 1(a) のように被写体を止めたような写真が撮影されるが，長時間露光で動く被写体を追従しながら撮影することで，図 1(b) のように動いている被写体はぶれず背景がぶれた写真を撮影することができ，被写体の躍動感を表現することができる．しかし，流し撮りでは被写体の動きに合わせて適切にカメラを動かしながら，適切な露光時間で撮影することが求められるため，非常に難易度の高い撮影技法である．

前述の deblurring のように劣化画像を処理することでぼけのない画像を復元するのではなく，撮影後の計算処理を前提とした撮像を行う，コンピュテーショナルフォトグラフィの研究が近年盛んになっている．焦点ぼけについては，撮像系を工夫することで deblurring の品質を向上させる符号化開口 [2] のようなぼけ除去や，ライトフィールドカメラと呼ばれる特殊な撮像系と計算処理を合わせることにより，撮影後に焦点位置を変更することによりぼけを自在に操るリフォーカスという技術が提案されている [7]．この手法では，空間を飛び交う光線が持つ 4 次元の情報を 2 次元平面に符号化して記録し，演算によって多視点画像として復号したものを焦点位置に応じて平行移動して足し合わせることで，後から焦点位置を変更する機能を実現している．

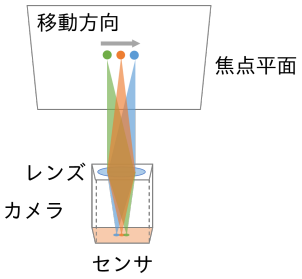
(a) 通常の撮影　(b) 流し撮り

図 1: 流し撮りの例

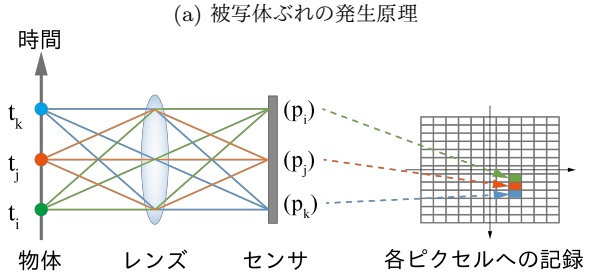
動きぶれについても，複数枚の画像を撮影してこれらを演算処理することによって deblurring を実現する手法が提案されている [3], [8], [10], [12]．これに対し本研究では動きぶれを除去するのではなく，表現技法としての流し撮りに着目し，撮影した後から自由に被写体を設定し，それ以外の背景がぶれた画像を合成することで，任意の被写体を対象としてその躍動感を表現するリパンニングを提案する．理想的な動きぶれを再現するためには多数の短時間露光画像を入力することが必要であり，一般的にはハイスピードカメラの利用が想定されるが，比較的少数の短時間露光画像が入力された場合でもフレーム補間技術を利用すること

[1] 奈良先端科学技術大学院大学
〒 630–0192 奈良県生駒市高山町 8916–5

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan



(a) 被写体ぶれの発生原理



(b) 撮像素子上への動物体の光線記録

図 2: 露光中に物体が動くと複数の撮像素子上に光線が記録され被写体が発生する

によって，通常のカメラでも良好な動きぶれが実現可能であることを示す．

本研究で提案するリパンニングは，本来は撮影前に定められるべきパラメータを撮影後に変更することを許容する技術である．ISO 感度の変更は RAW 画像を記録しておくことで実現されており，先行研究で取り扱われたリフォーカスは F 値や焦点位置を後から自在に変更することを許容していた．これに対し，露光時間について後から自在に変更する技術があったとは言えず，本研究はその空白を埋める技術として位置づけられる．この観点から，リフォーカスとリパンニングは統一的に定式化することが可能であり，これらが両立できることを実験的にも示す．

2. リパンニング

2.1 流し撮り

写真撮影において，図 2(a) に示すようにカメラ位置が固定されているとき，動きのある被写体を長時間露光して撮影すると動きぶれが発生する．十分短い露光時間で撮影すれば，被写体からカメラに届く光線は撮像素子上の一画素内に収まり，動きぶれを抑えることができる．しかし，図 2(b) に示すように，時刻 $t = t_i, t_j, t_k$ において，物体の光線がそれぞれ撮像素子上の複数の画素 p_i, p_j, p_k に集光される場合，$t \in [t_i, t_k]$ の間に露光すると，動きぶれとして記録される．

流し撮りはこの動きぶれを利用していて，露光中に動く被写体を追従してカメラを動かすことで，集光される画素位置を保持しながら撮影する技法である．これにより，目標となる被写体から届く光線は撮像素子上の一画素内に記録され，ぼけのない鮮明な画像を得ることができる．一方，背景などの被写体と異なる動きをしている物体から届く光線は，たとえ静止していたとしても撮像素子上の複数の画素に記録され，露光中にカメラが動いた分だけ動きぶれを発生させることができる．その結果として，図 1 のように被写体の躍動感を強調したような写真が撮影できる．

2.2 露光分割と演算による動きぶれの再現

カメラで記録される写真は，露光時間中に入射した光のエネルギーを積分した値を画素ごとに記録したものであると捉えることができる．その観点から，図 2 で示した $t = [t_i, t_k]$ の間に露光して得られる画像 $I_{[i,k]}$ は，短時間露光連続撮影で得られる 3 枚の画像について和を取った $I_i + I_j + I_k$ とほぼ同等になる．これを露光分割と呼び，本研究では短時間露光による露光分割された画像列が得られているときに，動きぶれを自在に操り再現する問題を扱う．

2.3 被写体の動きに合わせたリパンニング

流し撮りではカメラを操作して動く被写体を追従するが，その際のカメラの動きは一通りではなく，また動かし方によって背景のぶれ方も異なる．例えばカメラを並進させた場合，レンズが持つ透視投影変換の効果により，遠くの背景はあまり大きく動かず，カメラに近い被写体は大きく動く．一方カメラを光学中心周りに回転させるパンを行った場合，近い被写体よりも遠くの背景は比較的大きく動く．このうち，カメラの並進では手前の物体による遮蔽などによって画像内のシーン構造が変化するため，撮影後にその効果を再現することはできないが，パンについては撮影画像を射影変換することによって等価な効果を得ることができる [9]．この原理は例えばパノラマ合成に用いられており，多くの市販のカメラに搭載されている．

流し撮りにおいて困難な点は，動く被写体をながら手持ちでカメラを制御することである．先述の通り，短時間露光で連続撮影を行えば，後から画像を加算することによって長時間露光したのとほぼ同等な画像を得ることができる．この際，撮影者は被写体に合わせてカメラの姿勢を手持ちで操作したとしても，動く被写体を撮像素子の一画素内で捉え続けることができるとは限らない．しかし，短時間露光した画像それぞれについて撮影後にパンを調整し，被写体が撮像素子の一画素内で捉え続けられるように変換してから加算すれば，失敗なく流し撮りの効果を再現することができるようになる．

カメラによって捉えたシーンには様々な物体が写っており，撮影者によるカメラの制御，物体の動きや距離によって，それぞれの位置は様々に変化する．これらの中で，動きぶれを抑えて躍動感を表現すべき被写体は 1 つに限定されるとは限らない．そこで本研究では，注目すべき被写体は撮影後に自由に指定できるものとし，画像上で指定された領域から調整すべきパンを推定することで，自在に流し

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

撮りの効果を再現する．

先述の通り，パンによる効果は厳密には射影変換によって再現されるべきであるが，射影変換の推定にはカメラの内部パラメータなどが必要となる．パノラマ合成などのように大きな動きを再現する場合には射影変換の推定が重要であるが，流し撮りにおけるパンの調整では比較的微小な変換が想定され，推定結果の誤差が結果に大きく影響することはない．そこで現実的な近似として，本手法では画像全体を一定量シフトさせることによってこれに代えることとする．

被写体の見かけのシフト量は，短時間露光画像列における隣接画像間 I_i, I_j でオプティカルフローを計算することで得る．先述の通り，画像全体では領域によって異なるフローが得られるが，本手法では被写体として指定された領域に対応するフローによってシフト量 $T_{j,i}$ を定める．具体的な例として，図 3(a) に示すような物体 A と物体 B がそれぞれ異なる速度で動いているシーンを考え，カメラを固定して撮影した時刻 $t = t_0, t_1, t_2, t_3, t_4$ の画像列を図 3(b) とする．$i = 0, \cdots, 3$ について，I_{i+1} から I_i へのオプティカルフローを計算し，そのうち物体 A,B に対応するものをそれぞれ $T^A_{i+1,i}, T^B_{i+1,i}$ とする．

隣接した全ての画像対でシフト量を求めたのち，全ての画像で被写体が同一の画素に集光するよう，画像 I_i 全体に適用するシフト量を

$$T_i = T_{i,i-1} + \cdots + T_{1,0} \qquad (1)$$

として求める．例えば，物体 A に着目した場合の画像 I_3 全体に対して適用するシフト量は $T^A_3 = T^A_{3,2} + T^A_{2,1} + T^A_{1,0}$ となり，この変換によって画像 I_3 における物体 A の領域は画像 I_0 の物体 A の領域と同じ位置になる．これによって各画像全体を変換し加算することによって，被写体は動きぶれがなく，異なる動きをする背景では動きぶれが再現された画像を生成することができる．物体 A,B それぞれに対して合成される流し撮りの結果を図 5 に示す．

なお，ここで加算する画像の枚数を増減することにより，動きぶれの大きさも調整することが可能である．このように撮影後に被写体を指定し，計算処理によって流し撮りを実現するため，動きの異なる複数の被写体に対してもそれぞれ異なる流し撮りを実現することが可能であり，また動きぶれの程度も調整が可能である．これがリパンニングの所以である．

2.4 補間による自然な動きぶれの合成

上記により理想的な流し撮りを実現するためには，露光分割して得られた各画像で被写体の動きぶれが抑えられるほど十分な短時間露光での撮影と，流し撮りにおいて被写体が動く量を十分密にサンプルするだけの画像枚数が必要となる．短時間で大量の画像を撮影するためには高速度カメラのような機材が必要となる．市販のカメラでも短時間露光画像の連続撮影は可能であるが，自然な動きぶれを表現するのに必要な撮影枚数を連写する能力はないことが多い．また動画撮影と異なり，フレーム間の時刻差もある程度以上小さく設定することができない． 2.2 節で述べたとおり，シーン中の物体の動きに対して十分にサンプルされていれば長時間露光した場合を同等の画像を合成することが可能であるが，物体の動きに比して画像枚数が少ない場合，合成された流し撮り画像は図 6 に示すように動きぶれが離散的となり不自然な結果となる．

そこで本手法では，一般的なカメラによる連写撮影のように，短時間露光ではあるが十分な撮影枚数が確保できない場合にも，得られた画像列の間では動きが単純であることを仮定して，画像間で補間を行い，これを以って密な撮

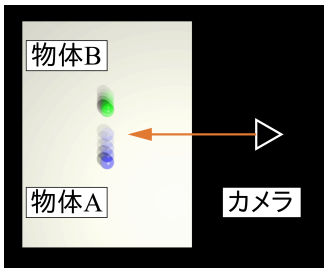


図 3: 撮影シーン

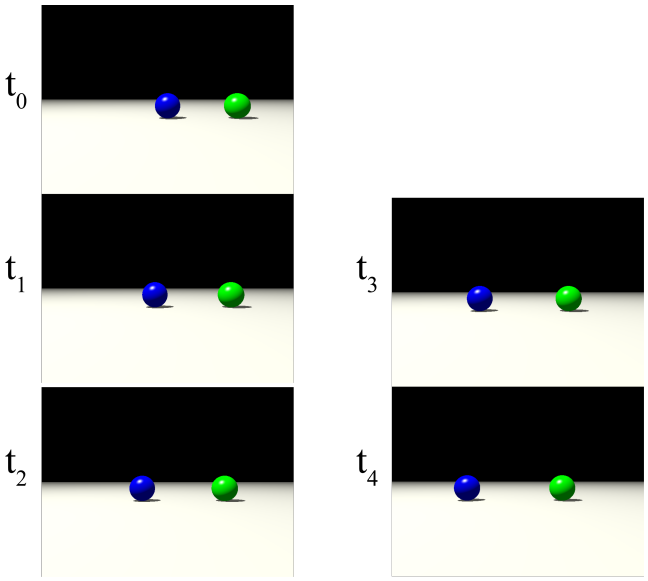
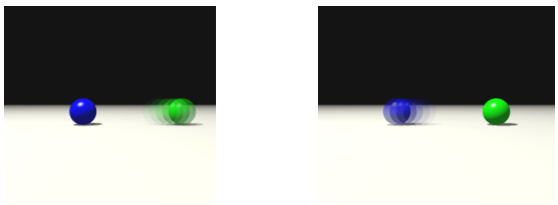


図 4: 短時間露光撮影によって得られる画像列


(a) A にリパンニング　　(b) B にリパンニング
図 5: 各物体へのリパンニング実行結果

(a) A にリパンニング　(b) B にリパンニング

図 6: 少数画像によるリパンニング実効結果

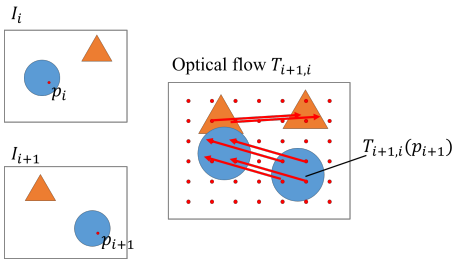


図 7: フレーム間のオプティカルフロー

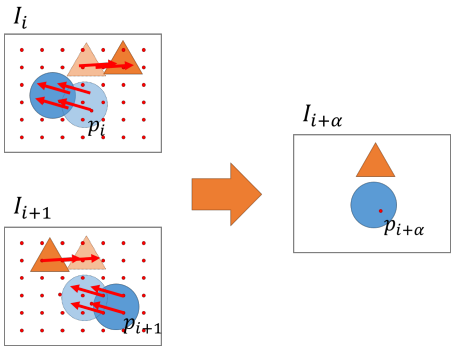


図 8: オプティカルフローを用いたフレーム補間

影に代える．補間処理によって動きによる変化が微小な画像を多数生成することができ，これらを足し合わせることによって自然な流し撮り画像を合成することが可能となる

具体的には，隣接画像間で計算されたオプティカルフローを用い，画像間を十分密に補間する．図 7 に示すように，2 つの隣接画像間でオプティカルフローによって対応づけられた画素 $I_i(p_i), I_{i+1}(p_{i+1})$ を考える．ただし，$p_i = T_{i+1,i}(p_{i+1}) + p_{i+1}$ とする．この時，$t = [t_i, t_{i+1}]$ を $\alpha : 1-\alpha$ で補間した画像の画素値 $I_{i+\alpha}(p_{i+\alpha})$ を以下のようにして得る．$\alpha = 0.5$ についての例を図 8 に示す．

$$\begin{aligned} p_{i+\alpha} &= (1-\alpha)p_i + \alpha p_{i+1} \\ I_{i+\alpha}(p_{i+\alpha}) &= (1-\alpha)I_i(p_i) + \alpha I_{i+1}(p_{i+1}) \end{aligned} \tag{2}$$

2.5 リフォーカスとリパンニングの併用

先述の通り，ぼかしやぶれは撮影技法として積極的に活用されており，そのうち焦点ぼけについてはライトフィールドカメラを利用することによって後から調整することができるリフォーカス技術が提案されている [7]．リフォーカス技術は，焦点位置に合わせて平行移動した多視点画像を足し合わせることによって，合成開口を実現している．本稿で提案したリパンニングも，撮影画像を被写体の動きに合わせて平行移動して足し合わせることによって動きぶれの合成を実現しており，これらのリフォーカスとリパンニングは統合して一貫した処理にすることができる．

そもそも画像は，シーンを飛び交う光の強度分布を記録したものと捉えることができ，Adelson ら [1] によって提唱された plenoptic function という概念で整理されている．Plenoptic function は空間を飛び交う光線の強度を表す 7 次元の関数 $P(\theta, \phi, \lambda, t, V_x, V_y, V_z)$ として定義されている．ここで $p = (\theta, \phi)$ は球面座標系で表現した光線の方向，λ は光の波長，t は時刻，(V_x, V_y, V_z) は 3 次元空間の座標である．例えばピンホールカメラで 2 次元画像を取得する場合，ピンホールの位置が $v = (V_x, V_y, V_z)$ に対応し，画像として得られる 2 次元の輝度分布はピンホール位置を通過する光線の方向 (θ, ϕ) についての強度分布に対応する．画像の輝度値は，カメラの分光感度特性に応じて λ について積分し，露光時間に応じて t について積分した値となる．また，多視点画像であれば v，短時間露光撮影した画像列は t のサンプリング数を増やしたものと捉えることができる．

このうちリフォーカスは，ある特定の奥行 z が与えられたとき，多視点画像を撮影した視点位置 v それぞれに対し，一般的には中央に位置する視点から得られた画像を基準として，z に対応する視差 $d_v(z)$ が定まる．この視差の分だけ各視点画像 I_v を平行移動して加算することによって合成開口が実現される．これを先述のリパンニングと統合して定式化すると，以下のような式が得られる．

$$I^{A,z}(p) = \sum_v \sum_t I_{t,v}(T^A_{p+t} - d_v(z)) \tag{3}$$

ここで，$I_{t,v}$ は時刻 t，視点位置 v から取得された画像 (図 9) であり，T^A_t は時刻 t に中央視点で得られた基準画像における被写体 A に対応したシフト量である．ここでは合焦位置の奥行 z を任意に設定できる定式化としたが，一般的には合焦位置は被写体 A の奥行に設定されると考えられ，[11] などの多視点画像を対象とした奥行き推定手法と組み合わせることで妥当なリフォーカス・リパンニング結果 $I^{A,z}(p)$ が得られると考えられる．

3. 実験と結果

様々なシーンに対して高速度カメラを用いた実験によりリパンニングを行った結果を示す．なお，オプティカルフローのアルゴリズムには Farneback 法 [4] を用いた．

3.1 撮影環境

本実験では高速度カメラとして Nikon1 J5 を用いた．通常，同製品は標準的なカメラに分類されるが高速度撮影機能を有しており，実験ではフレームレートを 120fps，露光

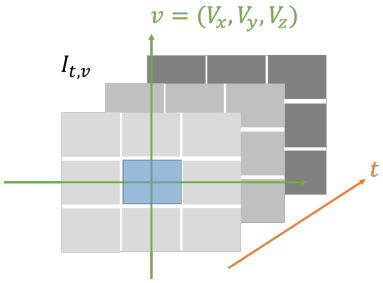


図 9: 時刻 t，視点位置 v から撮影した画像群として表現される光線空間

図 10: 撮影環境

図 11: 使用した画像列

図 12: リパンニング結果

時間 1/125 秒で図 10 に示すようなシーンの撮影を行った．

3.2 リパンニング結果

高速度カメラで撮影した動画像のうち，図 11 に示す 4 枚の画像列を用いてリパンニングを行った．今回の実験では 120fps で撮影しているため，4 枚の画像によるリパンニング結果は，通常のカメラで露光時間 1/30 秒に設定して流し撮りをした場合に相当する．図 12 にリパンニングを行った結果を示す．結果より，被写体のオプティカルフローから各画像のシフト量が正しく算出され，リパンニングが行えていることがわかる．

3.3 動きぶれ量の調節

次に，使用する画像枚数を変更することで，背景のぶれ量を変更した結果を示す．図 13 に示す，3.2 節の実験で用いた枚数の 2 倍である 8 枚の画像列を用いて同様にリパンニングを行った．

図 14 にリパンニングを行った結果を示す．図 12 に比べて動きぶれの量が増幅できていることが確認できる．

図 13: 使用した画像列

図 14: 動きぶれ調節結果

図 15: 補間画像を用いたリパンニング結果

図 16: 実際に流し撮りを行った結果

3.4 補間による自然な動きぶれの再現

図 12，図 14 に示した結果では動きぶれを合成することができたが，使用した画像枚数が少ないため動きぶれが離散的となり，不自然である．多量の画像列を用いて連続的で滑らかな動きぶれを生成するために，撮影した 120fps の画像列に対して補間を実行し，中間画像を合成することで 240fps での撮影と同等の枚数を用いてリパンニングを行った．

補間した画像列を用いてリパンニングを行った結果，図 15 に示すように連続的な背景ぶれが生成できており，図 16 に示すような実際に流し撮りを行った結果と比較しても遜色のない結果であるといえる．

また，通常のカメラの動画撮影の一般的なフレームレートは 30fps であるため，そのままのフレームレートで高速に動く被写体へのリパンニングは動きぶれの再現が困難である．そこで，30fps の低フレームレートの撮影においても補間を行うことでリパンニングが可能であるかどうか検証を行った．3.1 節で撮影した 120fps の画像列を 30fps 相当に間引き，それに対する補間によって 120fps 相当の枚数になるよう画像を合成した．補間後の画像列の一部を

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

図 17: 補間による合成画像の一部

図 18: 真値

図 19: 30fps 相当の画像列を用いたリパンニング結果

図 20: 補間による合成画像列を用いたリパンニング結果

図 17 に，撮影時の 120fps で取得した真値となる画像の一部を図 18 に示す．補間の結果，被写体のエッジ部分を中心にアーティファクトが生じているが，概ね真値に近い結果が得られた．30fps 相当での画像列とそれらから補間した合成画像を用いてリパンニングを行った結果をそれぞれ図 19，図 20 に示す．30fps で撮影した画像列を用いた結果では背景の動きぶれが離散的となっていたのに対し，補間後は自然な動きぶれを合成することができたため，補間の有効性が確認できる．また，用いた合成画像にはエッジ部を中心にアーティファクトが生じていたが，これは動きぶれの合成において平滑化され，大きな問題とはならないことがわかる．

3.5 動きの異なる物体に対するリパンニング

動きの異なる移動物体が混在するシーンに対してリパンニングを行い，異なる被写体に対するリパンニングを行った．図 21 に使用した撮影画像列を示す．撮影は Nikon1 J5 の高速度機能を用いた．フレームレートを 400fps，露光時間 1/400 秒で撮影を行った．図 22 に推定したオプティカルフローの結果を，図 23 に各球を被写体と設定してリパンニングを行った結果を示す．結果から，各球のオプティカルフローから画像のシフト量が正しく算出され，各球にリパンニングが行えていることがわかる．物体のオプティカルフローを推定してシフト量を変更することで流し撮り対象を変更できることを示した．

図 21: 使用した画像列

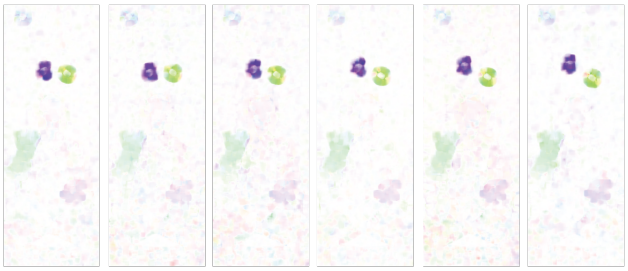


図 22: 推定したオプティカルフロー

(a) 赤球　(b) 黄球　(c) 青球

図 23: リパンニング結果

3.6 リフォーカスとリパンニングの併用

リフォーカスとリパンニングの併用についても検証を行った．図 24 に撮影環境を示す．今回の実験では民生用のライトフィールドカメラである Lytro Illum^{TM} を用い，奥行，移動速度がそれぞれ異なる 3 つの物体を撮影した．図 25 に示すように，各物体は平行移動ステージに設置し，物体 A は速度 0.5cm/s，物体 B,C はともに 1.0cm/s の速度で移動するよう設定した．また，物体 A，B はカメラから 70cm 離れた場所にあり，物体 C は 90cm 離れた場所に配置した．各ステージの移動とカメラの撮影を計算機で同時に制御した．カメラの撮影時の設定は F 値が 16，露光時間 1/3.2 秒，ISO 感度を 100 とした．

図 26,27,28 にそれぞれリフォーカスとリパンニングの併

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

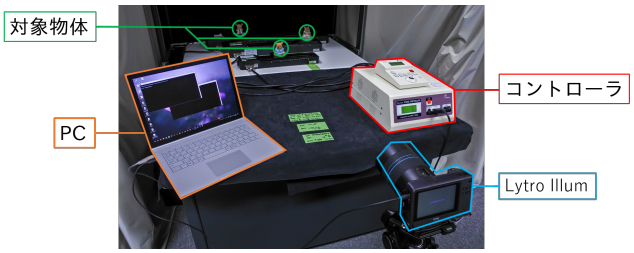


図 24: 実験環境

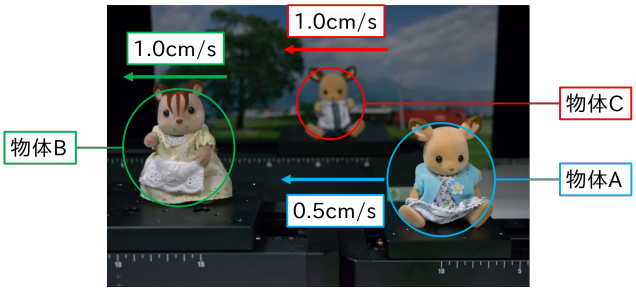


図 25: 撮影したシーン

(a) 物体 A にリパンニング　(b) 物体 B，C にリパンニング

図 26: 物体 A,B に合焦させてリパンニングした結果

用した結果を示す．図 26 はリフォーカスにより物体 A，B に合焦させた後にリパンニングを行っている．図 26(a) では物体 A と B は同じ奥行に位置するが，移動速度が異なるために物体 B には動きぶれが合成されていることが確認できる．図 26(b) では，物体 B，C は同じ速度で動いているためリパンニングによる動きぶれは物体 C にあまり発生していないが，奥行が異なるため焦点ぼけが生じている．

図 27 はリフォーカスにより物体 C にフォーカスを合わせたのちリパンニングを行っている．図 26(a) では物体 A に動きぶれは発生していないが，焦点ぼけが生じている．図 26(b) では，物体 B，C の移動速度が同じであるためリパンニングによる動きぶれはあまり発生していないが，奥行が異なるため焦点ぼけが生じいる．

図 28 は全焦点画像を用いてリパンニングを行った結果である．通常のリパンニング同様に各移動物体の速度に合わせたシフト量を計算し，正しくリパンニングを行えていることがわかる．

4. まとめ

本研究では，写真撮影における表現技法である流し撮りを撮影後に実現できる手法として，短時間露光で連続撮影した画像列を入力に用いるリパニングを提案した．流し撮

(a) 物体 A にリパンニング　(b) 物体 B，C にリパンニング

図 27: 物体 C に合焦させてリパンニングした結果

(a) 物体 A にリパンニング　(b) 物体 B，C にリパンニング

図 28: 全焦点画像を用いてリパンニングした結果

りは，被写体をカメラで追従して同じ位置に捉え続けながら撮影する必要があるため，オプティカルフローを用いて算出した被写体の移動量に応じて取得した画像列をずらして足し合わせることで，対象となる物体にはブラーが生じないようにした．さらに，算出したオプティカルフローを用いて取得した画像列のフレーム間を密に補間することで，滑らかな動きぶれの再現ができるようになった．しかしながら，撮影中の被写体に遮蔽が生じるとオプティカルフローが正しく求まらないことが予想されるため，より遮蔽に頑健な手法に置き換えることが今後の課題である．また，画像列へのフレーム補間を外挿として適用することで，さらにぼけ量を大きくするなどといった演出的手法の実現も課題としてあげられる．

謝辞　本研究の一部は JST CREST (JPMJCR1764) の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Adelson, E. H. and Bergen, J. R.: The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision, *Computational Models of Visual Processing*, MIT Press, pp. 3–20 (1991).

[2] Changyin Zhou, Student Member IEEE, S. K. N.: Computational Cameras: Convergence of Optics and Processing, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 20, No. 12, pp. 3322–3340 (2011).

[3] Choi, B., Jung, S. and Ko, S.: Motion-blur-free camera system splitting exposure time, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 54, No. 3, pp. 981–986 (online), DOI: 10.1109/TCE.2008.4637576 (2008).

[4] Farneback, G.: Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, *Scandinavian Conference on Image Analysis*, pp. 363–370 (2003).

[5] Inoshita, C., Mukaigawa, Y. and Yagi, Y.: Ringing Detector for Deblurring based on Frequency Analysis of PSF, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 3, pp. 236–247 (online), DOI: 10.2197/ip-

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

sjtcva.3.236 (2011).

[6] Levin, A., Weiss, Y., Durand, F. and Freeman, W. T.: Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms, *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1964–1971 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206815 (2009).

[7] Ren Ng, Marc Levoy, M. B. G. D. M. H. P. H.: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, *Stanford Tech Report CTSR*, pp. 1–11 (2005).

[8] Sonogashira, M., Funatomi, T., Iiyama, M. and Minoh, M.: Variational Bayesian Approach to Multiframe Image Restoration, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 26, No. 5, pp. 2163–2178 (online), DOI: 10.1109/TIP.2017.2678171 (2017).

[9] Szeliski, R.: Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1st edition, chapter 9 (2010).

[10] Tico, M.: Adaptive block-based approach to image stabilization, *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 521–524 (online), DOI: 10.1109/ICIP.2008.4711806 (2008).

[11] Wanner, S. and Goldluecke, B.: Variational Light Field Analysis for Disparity Estimation and Super-Resolution, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 36, No. 3, pp. 606–619 (online), DOI: 10.1109/TPAMI.2013.147 (2014).

[12] Wei, Z., Cao, Y. and Newton, A. R.: Digital image restoration by exposure-splitting and registration, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.*, Vol. 4, pp. 657–660 Vol.4 (online), DOI: 10.1109/ICPR.2004.1333858 (2004).

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan