

博士学位論文

単眼単視点による三次元画像計測
に関する研究

中京大学大学院 情報科学研究科 情報認知科学専攻

H10805D 望月 優介

目次

第1章	序論	
1.1	研究背景	1
1.2	単眼単視点計測について	2
1.3	単眼単視点計測の実現	2
1.4	単眼単視点計測の応用	3
1.5	本論文の流れ	4
第2章	焦点ボケ強度推定に基づく単眼単視点計測	
2.1	焦点ボケ強度の推定	5
2.2	焦点ボケ強度推定の課題	6
2.3	局所領域抽出による焦点ボケ強度推定	7
2.3.1	推定のアプローチ	7
2.3.2	局所領域の抽出	8
2.3.3	焦点ボケ強度の推定	10
2.3.4	推定された合焦点の評価実験 1	10
2.3.5	推定された合焦点の評価実験 2	12
2.3.6	市販のデジタルカメラによる実験	14
2.3.7	本手法の課題	16
2.4	リング特徴抽出による焦点ボケ強度推定	16
2.4.1	推定のアプローチ	16
2.4.2	焦点ボケ強度の定式化	17
2.4.3	合焦点推定アルゴリズム	21
2.4.3.1	エッジ強度正規化	21
2.4.3.2	合焦点推定	23
2.4.4	シミュレーション実験	23
2.4.4.1	推定された合焦点の評価	23
2.4.4.2	異なるエッジ強度を含む画像における合焦点推定	24
2.4.5	サンプル物体の撮像画像を用いた実験	26
2.4.6	光学系未知な画像の合焦点推定	28
2.5	まとめ	30
第3章	単視点距離画像による実物体の運動推定	
3.1	単眼単視点による任意物体の三次元運動推定	32
3.2	従来手法と問題設定	32
3.3	提案手法のアプローチ	33
3.4	仮想浮標を介した実物体の運動推定	35

3.4.1 概要	35
3.4.2 仮想浮標の設定	38
3.4.3 3D フローの仮想浮標への対応付け	38
3.4.4 仮想浮標の運動表出	40
3.4.5 パラメータ設定	40
3.4.6 仮想浮標の運動検出による実物体の運動推定	41
3.4.7 処理の流れ	42
3.5 シミュレーション実験	43
3.5.1 3D フローの検出誤差の影響	43
3.5.2 対象形状の影響	46
3.6 実画像を用いた実験と考察	47
3.6.1 平行移動運動の推定	47
3.6.2 回転運動の推定	50
3.6.3 変形を伴う運動の推定	51
3.6.4 検出速度と精度	52
3.7 まとめ	52
第4章 単眼単視点による三次元画像計測の応用	
4.1 概要	53
4.2 背景(前景)分離	53
4.3 裸眼立体視	53
4.4 三次元運動推定の応用	55
4.5 単眼単視点計測の産業応用(微小バリ計測)	58
4.6 まとめ	59
第5章 結論	
5.1 まとめ	60
5.2 今後の展望	61
謝辞	62
参考文献	63
研究業績	67

第 1 章

序論

1.1 研究背景

三次元画像計測はコンピュータービジョン分野における重要課題であり、これまでに様々な手法が提案されてきた[1][2]。三次元画像計測や距離画像処理は、特殊な計測装置や大量のポイントクラウド(Point Cloud : PC)データを扱う必要があるが、近年の計算機の発達や効率的な計測アルゴリズムの開発による装置の低コスト化・高速化などにより、三次元画像計測の実利用・応用は分野が大きく拡大してきている。例えば、対象に投光した光の位相差を計測することで、センサから被写体までの光の到達時間を推定し距離を計測する TOF(Time of Flight : TOF)センサ[3]や、Microsoft 社の KINECT のように対象シーンにパターン化された赤外光を投光し距離計測に用いる比較的安価なセンサなどが開発されている。一方、計測によって得られた PC データの利用例を見た場合も、3DTV や 3D プリンタ等の普及[4][5]により PC データ自体に大きな需要が生まれていることから、産業分野からエンターテインメント分野まで幅広く三次元画像計測技術の実利用・応用が拡大してきているといえる。

三次元画像計測は、その計測原理から能動的計測手法と受動的計測手法の 2 種類に大別することができる。能動的手法とは、レーザ[6]や赤外光の投光あるいは計測用のマーカ等の設置[7]によって、対象シーンに情報を付加することで計測する手法を指す。金属加工や機械部品の組み付けにおける工業部品の位置決め、ロボットの做合い制御等には高い計測精度が採用される為、能動的手法が比較的多く採用されてきた。一方、受動的手法は対象シーンに計測の為の情報を付加することなく、撮像された画像データのみから計測する手法を指す。受動的手法は計測対象までの距離が比較的遠い場合や屋外における外乱へのロバスト性等から、近年採用例が拡大している。例えば、先進安全自動車(Advanced Safety Vehicle : ASV) [6][8]や近年普及した 3DTV の映像コンテンツを撮影する 3D カメラ等にいくつかの採用例を挙げることができる。

三次元画像計測は目的に応じて最適な手法が選択される。例えば、安定した計測環境が確保でき精密な計測が要求される場合は、概ね能動的計測手法が選択される。また、ある程度の精度で良いが安全性やエリアのデプスデータを計測したい場合は、受動的計測法の多視点計測が選択される傾向にある。一方、能動的計測の為の特殊な装置および、

多視点計測におけるエピポラ幾何を解くための情報が無い場合は、画像の既知情報を用いて計測される[9]。このような計測は、対象とする画像以外は計測できない汎用性に欠くことから、一般的には三次元画像計測を行う場合、能動的計測手法か受動的多視点法を基にシステムが設計される。

1.2 単眼単視点計測について

能動的計測手法の為の特殊な装置および、多視点計測におけるエピポラ幾何を解くための情報が無いとは、入力データが一台のカメラのみによって撮影された一枚の静止画像のみであることを示す。カメラ一台(単眼)を用いて撮影された一枚の静止画像(単視点)から三次元を計測することから、ステレオカメラ等を用いた多眼多視点法やモーションステレオによる単眼多視点法と区別し、本研究ではこれを単眼単視点計測と呼ぶ。

単眼単視点法は、カメラ一台による計測である為、特殊な装置を要する能動的計測手法や、複数台のカメラを要するステレオ法と比較して、小型化・軽量化・低コスト化・省電力化・導入の容易さなど、様々な面で理想的である。また今後の三次元画像計測の研究の進歩によって、各手法の計測上の制約がそれぞれ限界まで軽減されたとすれば、能動的かつ多視点的アプローチによらない計測である点から、単眼単視点計測は、技術的な最終到達点において計測の適用可能範囲が三次元画像計測の中で最も広くなると考えられる。そこで本論文では、以上の単眼単視点計測の実現とこれを用いた画像処理応用について論じる。

1.3 単眼単視点計測の実現

前節で述べた技術的な最終到達点にある単眼単視点計測は、以下の3つの特徴を有すると考えられる為、極めて高い汎用性を有しているものと考えられる。

- ・ 一枚の静止画像のみから計測が可能
- ・ 能動的手段によって付与された、画像特徴を要さない
- ・ 特殊な光学素子を要さない

以上3つの特徴の中で、一枚の静止画像からの計測が可能な点、能動的な手法によらない点については、単眼単視点という計測原理であることを指す為、特殊な光学素子を要さない点を達成することで、単眼単視点の技術的な到達点に近づくことができるものと考えられる。これを達成する為のアプローチとしては、2つの方法を挙げることができる。1つ目のアプローチとしては、画像中の物体や環境などの既知の情報に基づく方法である。この方法は、高い汎用性と精度を確保する為に、膨大な既知情報を用意する

必要がある。2 つ目のアプローチは、既知の情報によらない方法である。具体的には、三次元が二次元に射影される際の光学的特性に基づく方法などが考えられる。2 つ目のアプローチで必要となる光学特性としては、焦点ボケ特徴を挙げることができる。焦点ボケ特徴は、ピントがずれた状態で画像を撮像した際に発生する、画像ボケを指す。この特徴は、光学系が有限の開口径を有する場合に発生するため、比較的多くの画像に含まれている。また、焦点ボケの強度を計測することは画像のピントずれ量を計測することに等しい。これは、多視点計測におけるエピポーラ幾何とは異なるアプローチによって、対象の三次元情報を推定可能であることを示している。一方、焦点ボケ特徴に基づく計測は次の 3 点の制約を有する。

- ・ ピントずれ量を対象までの実距離に換算する場合は、撮像系の情報が必須である為、単にピントずれ量の計測であれば、合焦点距離を基準とした相対的な距離計測となる点
- ・ 合焦点距離から前後それぞれの方向にピントを外した際に観測される焦点ボケは、光学的には同一のものになる為、ピントずれ量のみから計測された三次元情報がどちらの方向かを区別することはできない点
- ・ 画像中に見られる画像のボケが、焦点ボケであることを判別することが困難である点

焦点ボケ特徴に基づくアプローチは、上記の制約があるが、計測の汎用性の高さから、本研究では、焦点ボケ特徴に基づき相対的な処理計測を行う単眼単視点計測手法について提案する。

1.4 単眼単視点計測の応用

1.3 節で述べたアプローチによって単眼単視点計測が実現できたとすれば、以下のような様々な効果が期待される。

- ・ 既存の静止画像 1 枚から三次元再構成できる。すなわち、過去から現在までに蓄積されてきた膨大な画像データを三次元化することができる。
- ・ 既存のカメラシステムの多くに三次元画像計測機能を付加することができる。
- ・ 三次元画像計測の導入の容易さを向上させる。すなわち、小型化・軽量化・低コスト化・省電力化等の問題を解決することが可能となる。

本研究では、以上の効果を幾つかの応用例を通して実証する。

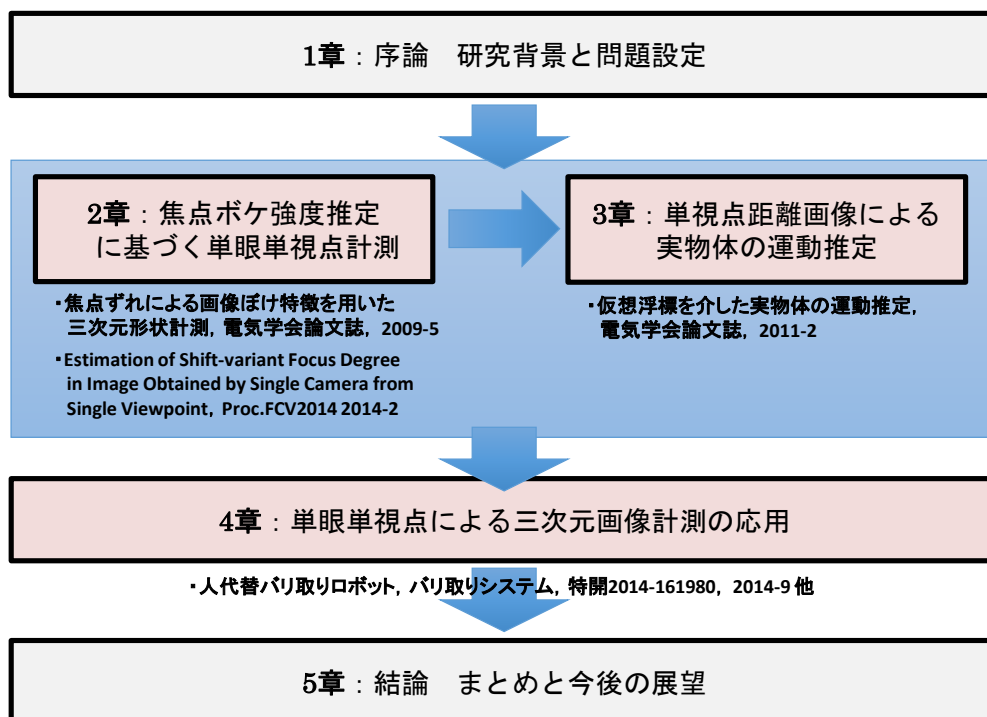


Fig. 1-1 本論文の構成図

ここで、単眼単視点計測の応用範囲の広がり考えた場合、静的な三次元形状計測に加え、三次元運動計測は必要不可欠である。例えば、監視カメラやロボットビジョン等を考えると、対象の形状だけでなく運動情報も必要であると考えられる。三次元運動推定は画像からの三次元再構成過程において二次的に生成される情報であるが、一般的には観測シーンにおいてスタティックな状況も含まれることを考えると、三次元形状計測と三次元運動計測が独立していることは望ましい。その意味で、単眼単視点計測によって三次元情報が時系列で得られた場合、それ(対象の三次元形状情報)を三次元運動推定に積極的に利用することは妥当である。そこで本研究では、単眼単視点で計測される時系列三次元情報を用いて任意物体の三次元運動を推定する手法を提案する。

1.5 本論文の流れ

前節までで、三次元画像計測の1つである単眼単視点計測の技術的な最終到達点での優位性について述べ、その実現方法や応用時に期待される効果について論じた。第2章では1.3節で述べた通り、三次元が二次元に射影される際の光学特性に基づくアプローチとして、焦点ボケ特徴に基づく単眼単視点計測について論じる。次に第3章では、1.4節で述べた単眼単視点における三次元運動計測について述べる。続いて第4章では、1.4節で述べた単眼単視点計測の効果について、幾つかの応用例を通して検証する。最後に第5章で結論を述べる。Fig.1-1に本論文の構成を示す。

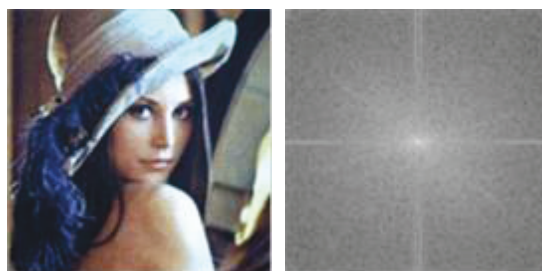
第2章

焦点ボケ強度推定に基づく単眼単視点計測

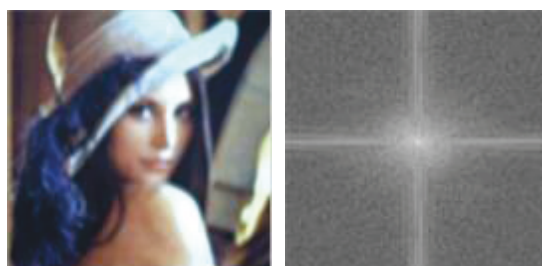
2.1 焦点ボケ強度の推定

撮影時のピントずれによって画像中に現れる焦点ボケ特徴は、ピントずれ量に比例する焦点ボケ強度、あるいは、撮像系のインパルス応答を示す点広がり関数(Point Spread Function : PSF)や線広がり関数(Line Spread Function : LSF)などによって表現される。焦点ボケ強度は、焦点ずれによる画像ボケの強さを表し、ボケ強度が強いほどピントずれ量が多いことを示す。対して PSF や LSF は点広がり径の大きさがピントずれ量を示している。三次元画像計測では、これらの情報からピントずれ量を推定することで対象までの距離を計測する。

画像の焦点ボケ特徴を推定する手法は、これまでに多くの手法が提案されているが、他の三次元画像計測と同様に、推定の方式から能動的手法と受動的手法の2種類に大別できる。能動的手法では、スポット光群を対象に投光しその投光点の形状から投光点のボケ強度を推定する手法[10]や、既知のマーカを撮影することで、マーカに発生するボケから対象地点の焦点ボケ強度を推定する手法[11]等が提案されている。一方、受動的手法では、画像を幾つかの小領域に分割し大域的に共通する周波数特性を抽出することで推定する手法[12]や、異なる焦点ボケ強度をもつ複数の画像から推定する手法[13]、特殊なレンズや絞りをもちつ光学系を用いて画像から PSF を優位にデコンボリューションする手法[14][15][16][17]等がある。[11][12]等による手法は、能動的な操作を用いず、[11]については単一の入力画像からの推定が可能である為、比較的導入が容易であるが、推定可能な PSF は空間不変性を有している必要がある。また、[14][15][16][17]の手法は能動的手法と同様に特殊な装置を要する等の制約がある。一般的に、焦点ボケ特徴の利用には上述した制約を解決する必要がある為、空間不変でない焦点ボケを有する静止画像一枚から、画像中の場所々々で変化する焦点ボケ強度を推定することは困難である。具体的な課題については次節で論じる。



(a) 焦点ボケ強度(弱)



(b) 焦点ボケ強度(強)

Fig. 2-1 焦点ボケ画像(左)とフーリエスペクトラム(右)

2.2 焦点ボケ強度推定の課題

焦点ボケ特徴は被写体が撮像系の被写界深度から外れた状態で撮像されることで発生する。このとき、撮像系の被写界深度の深さと被写体の被写界深度からのずれ量(ピントずれ量)によって、焦点ボケ強度やPSFが決定される。画像中の焦点ボケ強度が空間不変性を有するとき、この現象は画像の空間周波数から高周波帯域の振幅を減衰させることが広く知られている。具体的には、Fig.2-1に示すように、発生した焦点ボケのボケ強度が強まる程、振幅の減衰が発生する帯域が高周波帯域から低周波帯域に拡大し、その減衰量も大きくなる。焦点ボケは、焦点ボケ画像を $g(x, y)$ 、画像のPSFを $h(x - u, y - v)$ 、焦点ボケの無い画像を $f(u, v)$ としたとき、式2-1によって一般化される。

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - u, y - v) f(u, v) du dv \quad (2-1)$$

さらに、焦点ボケ画像 $g(x, y)$ 、全焦点画像 $f(x, y)$ 、PSF $h(x - u, y - v)$ の2次元フーリエ変換信号をそれぞれ $\hat{G}(\xi, \eta)$ 、 $\hat{F}(\xi, \eta)$ 、 $\hat{H}(\xi, \eta)$ とすると、式2-1における畳み込み演算は周波数空間では周波数成分の乗算に変換できることから、式2-2の単純な関係式が得られる。

$$\hat{G}(\xi, \eta) = \hat{H}(\xi, \eta) \hat{F}(\xi, \eta) \quad (2-2)$$

式 2-2 から、画像の PSF は式 2-3 に示すように焦点ボケ画像の空間周波数成分を全焦点画像の空間周波数成分で除算することで得られることが分かる。

$$\hat{H}(\xi, \eta) = \frac{\hat{G}(\xi, \eta)}{\hat{F}(\xi, \eta)} \quad (2-3)$$

しかし、これには入力に全焦点画像を用意する必要がある。また、仮に全焦点画像が得られたとしても、全焦点画像 $\hat{F}(\xi, \eta)$ の振幅成分を $F_r(\xi, \eta)$ 、位相成分を $F_i(\xi, \eta)$ としたとき $F_r(\xi, \eta)^2 + F_i(\xi, \eta)^2 = 0$ となる成分において 0 除算が発生する為、PSF の周波数成分が正しく算出できないなどの問題がある。

一方、式 2-2 から明らかなように、焦点ボケ画像の空間周波数と PSF の空間周波数の間には強い相関があることが分かる。したがって、焦点ボケ画像の空間周波数特性を分析することで焦点ボケ特徴を推定することができる。例えば、焦点ボケ画像の空間周波数上で減衰の発生している周波数帯域を分析することで、画像に発生している焦点ボケのボケ強度を推定する手法[18]がある。しかしながら、式 2-2 に見られる焦点ボケ画像の空間周波数と PSF の空間周波数の強い相関は、PSF が空間不変性を有している場合に限られる。画像の焦点ボケ強度が空間不変性を有していない場合は、焦点ボケ画像 $g(x, y)$ は式 2-4 で表される。

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y, u, v) f(u, v) du dv \quad (2-4)$$

式 2-4 からは式 2-2 のような単純な関係式は成立しない為、[18]等の焦点ボケ画像の空間周波数成分を分析する手法では焦点ボケ強度を推定することはできない。

2.3 局所領域抽出による焦点ボケ強度推定[19]

2.3.1 推定のアプローチ

焦点ボケ強度に空間不変性の無い画像は、式 2-2 が成り立たないことから、全焦点画像成分のデコンボリューションあるいは、空間周波数特性の概形から焦点ボケ強度を推定することは困難であることを前節で述べた。そこで本研究では、焦点ボケ画像中から式 2-2 が成り立つ焦点ボケ強度が空間不変な局所領域を抽出することで、前節で述べたアプローチによって焦点ボケ強度の推定が可能となる点に注目する。つまり、抽出領域毎に推定された焦点ボケ強度を統合することによって、画像の焦点ボケ強度分布を推定する手法を提案する。

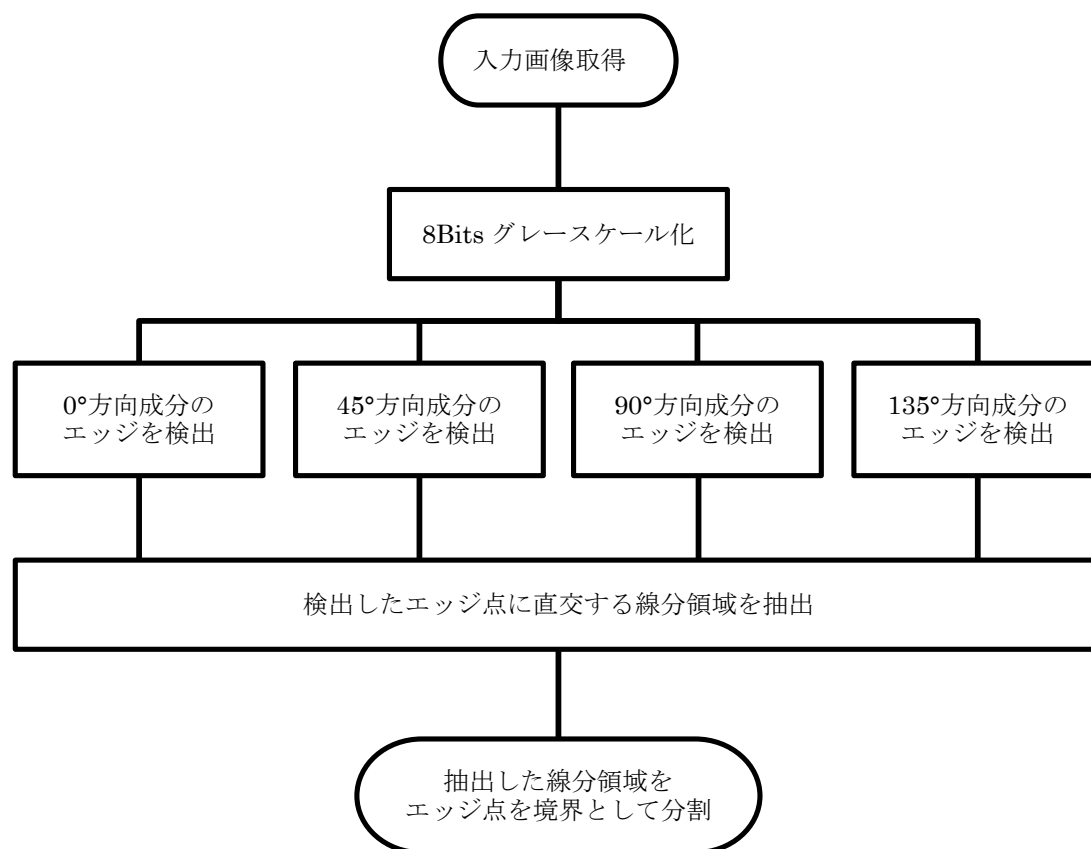


Fig. 2-2 局所領域抽出の流れ

2.3.2 局所領域の抽出

抽出される局所領域は、領域内の焦点ボケ強度が空間不変である必要があることに加え、局所領域は焦点ボケ特徴の推定に十分な面積を有している必要がある。しかし、推定の為に局所領域の面積を拡大したとき、領域内における焦点ボケ強度の空間不変性が損なわれる可能性が高まる。また、画像中の焦点ボケ強度は複雑に分布し、高い不規則性を有することが想定される為、画像を単純にブロック状に分割することで得られた矩形領域を、焦点ボケ特徴の推定に充てることはできない。ここで、焦点ボケが画像の周波数に与える影響が、画像中のエッジ近傍領域に現れることを考えたとき、抽出される局所領域もエッジ近傍領域に設定されることが望ましいといえる。また、画像の PSF が二次元正規分布によって近似可能であるとすれば、PSF の空間周波数特性は直流成分原点を中心とした同心円の円周上に近似する値が展開される。これは、焦点ボケ特徴の推定が空間周波数成分の中で、一方向成分のみによって達成可能であることを示している。つまり、局所領域を直線状に設定することで推定に必要なデータを除去できる為、領域内の焦点ボケ強度の空間不変性の確保をある程度容易にすることができる。なお、画像中のエッジが線状に分布するとき、焦点ボケ特徴の推定に有効な周波数成分

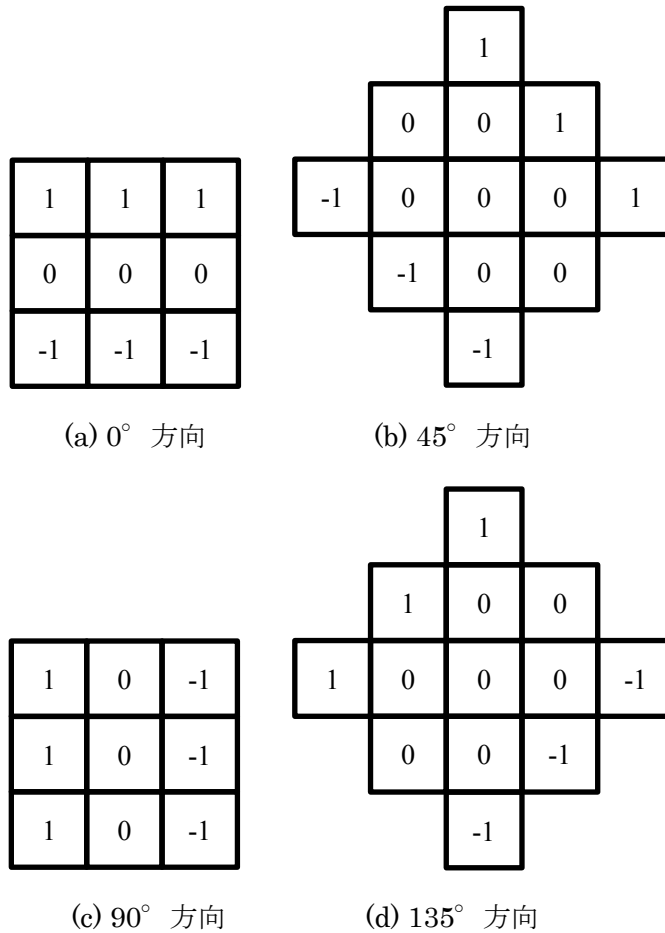


Fig. 2-3 Prewitt フィルタ

は、エッジ線に直交する方向のみである。一方、エッジ点が物体表面上のテクスチャによるとき、抽出された直線領域内の焦点ボケ強度は空間不変であるが、エッジ点が物体形状によるとき、直線領域内の焦点ボケ強度は、エッジ点を境界として異なる強度を有する。したがって、抽出した直線領域はエッジ点を境界とした2つの領域として推定に充てる必要がある。以上から、画像中の局所領域を Fig.2-2 に示す手順によって抽出する。まず、Fig.2-3 に示す係数と範囲をもつ Prewitt フィルタによって、それぞれ 0° , 45° , 90° , 135° の4方向成分におけるエッジ点を画像中から検出する。このとき、エッジ点を検出におけるしきい値は、注目画素を中心とした 3×3 の矩形領域における平均画素値によって動的に決定する。次に、検出した各方向成分に直交する線分領域から、エッジ点を境界とした2つの線分領域を抽出する。このとき、線分領域は焦点ボケ強度の推定に十分なデータ数を有するように抽出する。

2.3.3 焦点ボケ強度の推定

抽出された線分領域における輝度分布を一次元の入力信号として離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform : DFT) によって周波数解析し, 焦点ボケ強度を推定する. 画像中の PSF が二次元正規分布によって近似可能であるとすれば, 焦点ボケの現れた線分領域の振幅成分 $G_r(\xi)$ は, 直流成分 $G_r(0)$ を頂点として徐々に振幅の減衰量が大きくなる. そこで, 式 2-5 によって, 抽出された線分領域のフーリエスペクトルから強度 d を推定することを考える.

$$d = \sum_{\xi=0}^N \sqrt{\{\log G_r(\xi)\}^2 + \xi^2} \quad (2-5)$$

N はデータ数, ξ は周波数を示す. 式 2-5 はつまり, 対数スペクトルを示すグラフ上で直流成分原点から各成分値間のユークリッド距離を積算で焦点ボケ強度を表している. このように求めた値 d は対数振幅スペクトルの各成分値が高い程大きくなる. すなわち, 焦点ボケ強度に反比例した合焦点度を示している. しかし, 振幅値は入力とした局所領域内のエッジ強度に比例するため, 強度 d が局所領域のコントラストに影響を受けることになる. したがって, コントラストの影響を除去する為, 対数振幅スペクトルの最大 MAX と最小値 MIN からなる正規化項を式 2-5 に加えた式 2-6 によって合焦点度 d を推定する.

$$d = \sum_{\xi=0}^N \sqrt{\left\{ \frac{\log G_r(\xi) - MIN}{MAX - MIN} \right\}^2 + \xi^2} \quad (2-6)$$

算出した合焦点度は, それぞれ画像中の抽出領域に格納することで統合し, 入力画像の合焦点度分布を生成する. このとき, Fig.2-4 に示すように複数の抽出領域が重複する画素については, 複数の合焦点度が格納されるが, 格納された合焦点度の平均値を算出することによって統合する. 以上の処理によって, 空間不変でない焦点ボケ強度を有する画像から, 焦点ボケ強度に対応した合焦点度分布を生成する.

2.3.4 推定された合焦点度の評価実験 1

本手法で推定される合焦点度の妥当性を検証する為, 基礎実験を行った. この実験では, Fig.2-5 に示すような白色と黒色の領域で分割されたテクスチャを有する用紙を, 用紙の上部からカメラの高さを調整することで複数枚の画像を撮影する. 撮像された画像は,

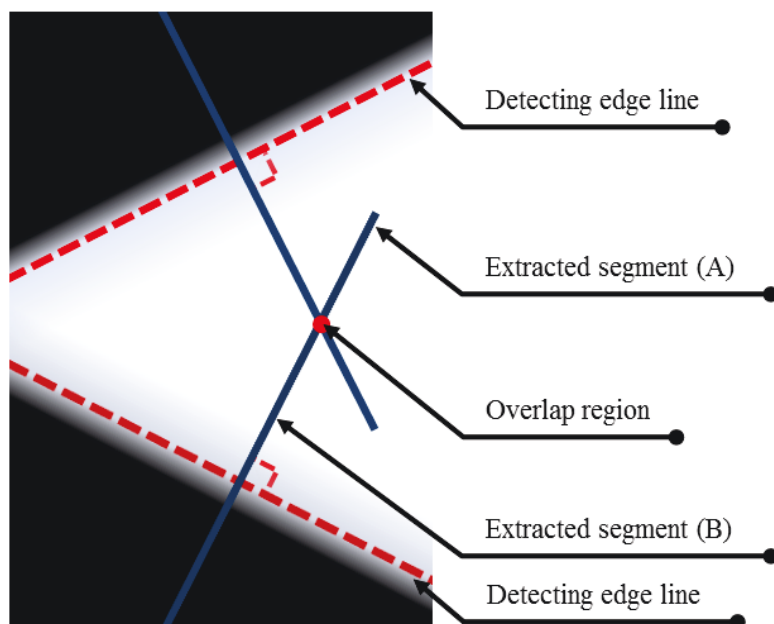


Fig. 2-4 合焦点の統合処理



Fig.2-5 白色と黒色の領域で分割されたテクスチャ

それぞれ異なる焦点ボケ強度を有し、画像のピントずれ量が既知である。したがって、これらの画像を入力として合焦点を推定することで、合焦点とピントずれ量の間係を検証する。Fig.2-6 に使用した実験装置の外観を示す。実験装置は、上下にスライド機構を有するスタンドと、デジタルカメラからなる。デジタルカメラは、Point Gray Research 社製のデジタルカメラ Flea に、Kowa 社製の CCTV レンズ LN6CR を取り付けて撮像した。撮像した画像の一部を Fig.2-7 に、合焦点を 0cm とし+1cm ずつカメラの高さを調整することで+14cm まで変更したときの合焦点の推移を Fig.2-8 に示す。ここで、グラフ中の縦軸は合焦点を、横軸は入力画像のピントずれ量を示す。また、グラフ中の合焦点は、入力画像中の白色・黒色領域によるエッジ点に直交する 64pixels の線分領域を入力として推定した合焦点を示す。グラフから、推定した合焦点がピント

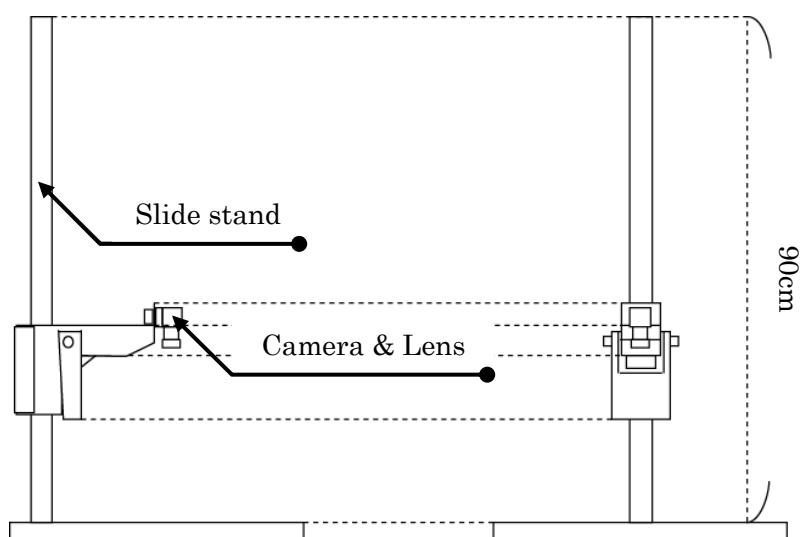


Fig.2-6 実験装置外観

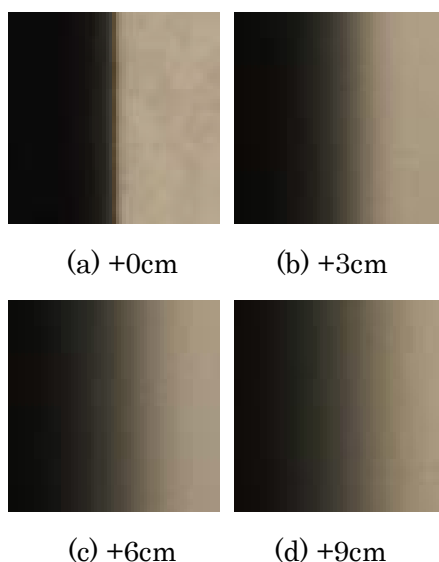


Fig.2-7 撮影画像

ずれ量に比例して焦点ボケ強度が強まる様子を捉えていることが分かる．絶対的な距離は使用するカメラ光学系によって異なるが，本手法による推定が，ある一定距離においては有効であることが分かる．

2.3.5 推定された合焦点の評価実験 2

本手法によって推定される合焦点分布の妥当性を検証する為，既知形状の物体群を用いて基礎実験を行った．実験では，Fig.2-9 に示す形状を有する既知物体群を Fig.2-6 に示す実験装置に配置し，カメラに最も近い部位に合焦することで空間不変でない焦点

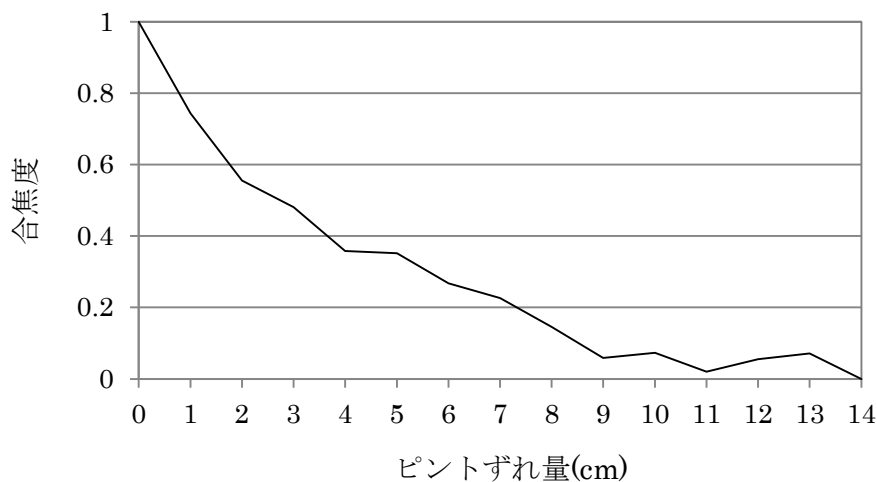


Fig. 2-8 推定された合焦度の推移

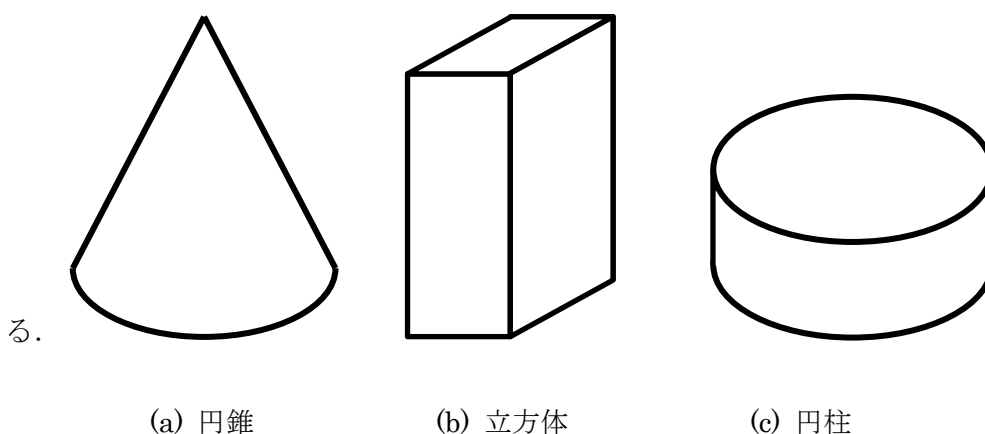
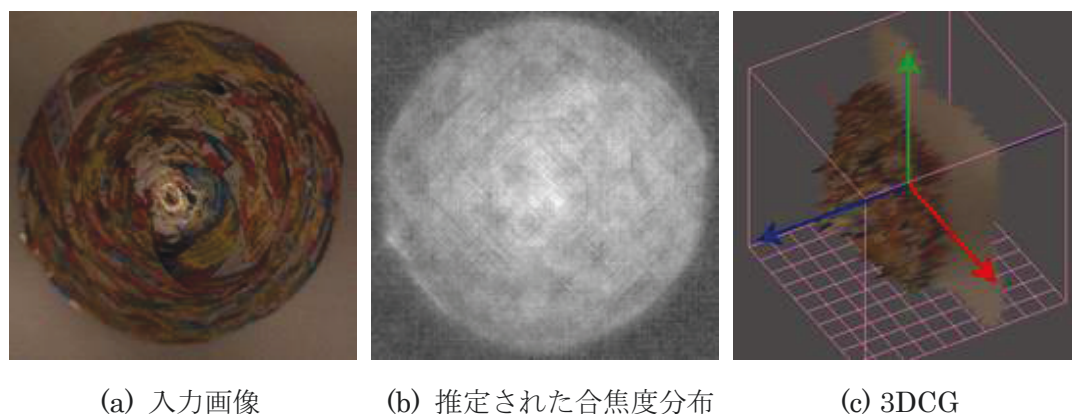


Fig.2-9 既知物体の形状

ボケ強度を有する画像を撮影した。既知物体が撮影された画像を入力とし、推定された合焦度分布から 3DCG を描画することで、撮影物体と比較検証を行う。既知物体にはそれぞれランダムなエッジパターンを有するテクスチャを張り付けた。撮影した画像を Fig.2-10(a)と Fig.2-11(a)に示す。使用したカメラシステムは前節と同様である。

Fig.2-10(a)に示す画像は、円錐形状を有する物体を円錐の頂点部位に合焦し撮影した画像である。局所領域の線分長を 64pixels×2 として本手法によって推定した合焦度分布を Fig.2-10(b)に示す。また、推定した合焦度分布に基づき生成した 3DCG を Fig.2-10(c)に示す。このとき 3DCG は画像の光軸方向を 3DCG 画像中の左下を示す矢印方向に合わせて描画した。Fig.2-10(c)より、円錐の頂点部位における合焦度が最も大きく、円錐の傾斜面上における焦点ボケ強度の推移が捉えられていることが確認できる。Fig.2-11(a)に示す画像は、Fig.2-9 で示した形状の物体群を組み合わせ撮影した画像である。Fig.2-10(a)における円錐のものと同様に局所領域の線分長を 64pixels×2 として

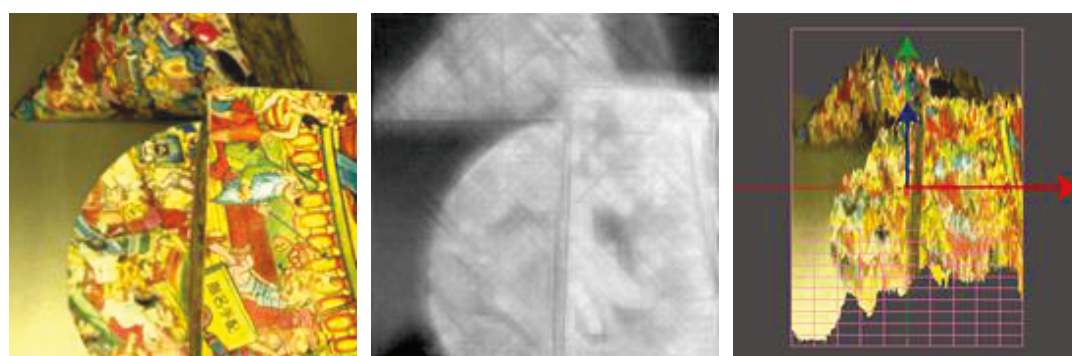


(a) 入力画像

(b) 推定された合焦度分布

(c) 3DCG

Fig.2-10 実験結果 1



(a) 入力画像

(b) 推定された合焦度分布

(c) 3DCG

Fig.2-11 実験結果 2

本手法によって推定した合焦度分布を Fig.2-11(b)に示す. また同様に, 推定した合焦度分布に基づき生成した 3DCG を Fig.2-11(c)に示す. このとき, 3DCG は入力画像の光軸方向を水平軸回転して描画した. Fig.2-11(c)より, 合焦点である立方体表面の合焦度が最も大きく, 円柱表面の合焦度が立方体表面と比較して小さいことから, 推定した合焦度分布がシーンの表面形状を捉えていることが分かる. また, 円柱と立方体の境界上における形状に由来するエッジ近傍において, 鮮鋭に合焦度を推定できていることが分かる.

2.3.6 市販のデジタルカメラによる実験

2.3.4 節および 2.3.5 節の基礎実験から, 焦点ボケ強度に空間不変性が無い画像から優位に合焦度分布を推定できることを検証した. しかしながら, 本手法は, 第1章で述べた通り, 一般に広く普及しているカメラシステムへの適用が望まれる. そこで, CASIO 社製デジタルカメラ EX-S600 を用いて撮影した画像を入力として, 画像シーン

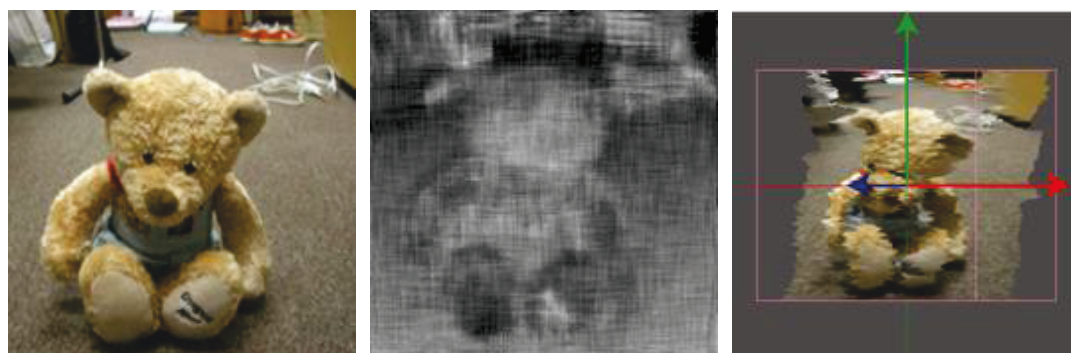


(a) 入力画像

(b) 推定された合焦点分布

(c) 3DCG

Fig.2-12 実験結果 3



(a) 入力画像

(b) 推定された合焦点分布

(c) 3DCG

Fig.2-13 実験結果 4

の合焦点分布の推定実験を行った。撮影時には、マニュアルモードで手前の物体にピン
トを合わせることで、空間不変でない焦点ボケ強度を有する画像を撮影した。実験では、
2.3.5 節と同様に推定した合焦点分布に基づき 3DCG を生成することで、市販のカメラ
システムにおける本手法の適用可能性を検証した。本手法で用いる局所領域の線分長は、
2.3.5 節の実験と同様に $64\text{pixels} \times 2$ とした。実験結果の例を Fig.2-12 および Fig.2-13
に示す。

Fig.2-12(a)に示す画像は、カーペットの敷かれた床を撮影した画像である。この画像
は、画像下端にピントを合わせて撮影されており、画像上端が最も焦点ボケ強度が強い。
Fig.2-12(b)に合焦点分布画像を、Fig.2-12(c)に 3DCG 画像をそれぞれ示す。このとき、
3DCG は画像の光軸方向を 3DCG 画像中の左下を示す矢印方向に合わせて描画した。
Fig.2-12(b)および Fig.2-12(c)から、撮影された画像シーンの合焦点分布とその距離関
係が優位に推定されていることが分かる。

Fig.2-13(a)に示す画像は、Fig.2-12(a)と同様にカーペットの敷かれた床を含むが、合
焦点距離付近にクマのぬいぐるみを設置し、焦点ボケ強度の強い背景領域に電気コード

や家具などのオブジェクト群が写りこんでいる画像である。Fig.2-13(b)に推定された合焦度分布を、Fig.2-13(c)に画像の光軸方向を水平方向にずらして生成した3DCGを示す。Fig.2-13(c)から、画像の大域的な合焦度の推移はFig.2-12(a)で示すカーペットのみの画像シーンのものに近いことが分かる。また、クマのぬいぐるみ領域において、画像上で同じ水平画素に含まれるカーペット領域よりも合焦度が高く、合焦領域のカーペット領域の合焦度と近いことから、クマのぬいぐるみの位置関係が優位に捉えられていることが分かる。しかしながら、クマのぬいぐるみの領域において、足の裏や腕部および頭頂部付近の領域で、低い合焦度が誤検出されていることが分かる。これは、局所領域内のコントラストが低いことが原因と考えられる。また反対に、背景領域におけるオブジェクト領域については高い合焦度が検出されていることが分かる。これは、背景領域における局所領域が焦点ボケ強度の空間不変性を獲得できていないことが原因であると考えられる。

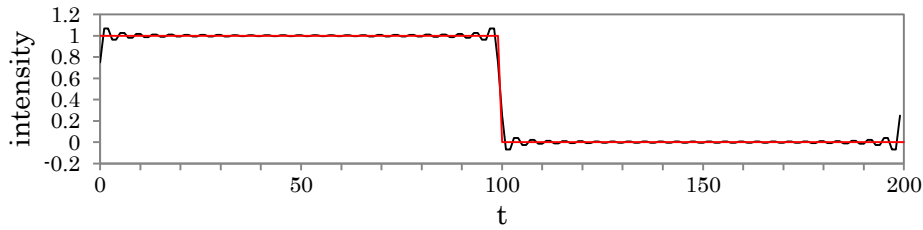
2.3.7 本手法の課題

以上2.3節では、画像中から焦点ボケ強度が空間不変である局所領域群を抽出し、各抽出領域で焦点ボケ強度を推定し統合することで、焦点ボケ強度に空間不変性が無い画像から画像中の焦点ボケ強度分布を推定する手法について論じた。また、提案手法によって推定した合焦度が、画像中の焦点ボケ強度に応じて算出されること、および推定された合焦度分布が画像中の焦点ボケ強度分布を捉えていることを実験によって示した。しかしながら、画像中から抽出する局所領域の空間分解能によっては、これを上回る複雑さをもつ焦点ボケ強度分布をもつ画像領域において、推定精度が損なわれる問題があることを示した。これは、提案手法が画像中から局所領域を抽出するというアプローチである以上、解決が困難であると考えられる。そこで、局所領域の抽出によらない手法について次節で述べる。

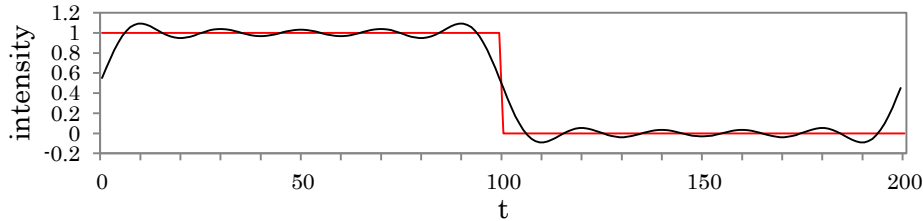
2.4 リンギング特徴抽出による焦点ボケ強度推定

2.4.1 推定のアプローチ

2.3節で述べた局所領域抽出による推定手法では、画像中から焦点ボケ強度が空間不変である局所領域を抽出する必要があるという性質上、手法の空間分解能に制約をもつという問題があった。この問題を解決する為には、手法のアプローチとして局所領域の抽出によらない大域的な画像解析手法が求められる。しかしながら、2.2節でも述べた通り、画像の大域的な空間周波数特性の概形から、局所的な焦点ボケ強度を推定することはできない。そこで本節では、画像の空間周波数から高周波帯域の周波数成分を除去



(a) 50Hz以上の周波数成分を除去



(b) 10Hz以上の周波数成分を除去

Fig.2-14 入力信号(赤線)と高域除去信号(黒線)

したときに、画像中の焦点ボケ強度と除去帯域の関係によって、復元信号に現れるリング特徴の有無が決定されるという特性を利用する手法を提案する。

2.4.2 焦点ボケ強度の定式化

入力信号から高周波数帯域の周波数成分を除去したとき、不足した周波数成分に応じて入力信号との間に誤差が検出される。この誤差は、入力信号中に見られるエッジ近傍で最大となり、エッジから離れるほど振動しながら減衰する。この現象は一般にリング現象と呼ばれ広く知られている。Fig.2-14に示すように、入力信号から除去する周波数帯域を高周波数帯域から低周波数帯域に拡大するほど、リングに見られる振動の間隔が広がる。反対に、除去する周波数帯域を縮小するほど振動の間隔が狭まり、最終的には0に収束して検出されなくなる。このとき、リングが検出されなくなる除去帯域は入力信号の滑らかさによって変動する。そこで Fig.2-15に示すように、周波数成分の通過帯域を θ Hz～最大周波数 M (データ数の半分)とし、最小通過周波数 θ を1Hz～ M (Hz)まで1Hzずつシフトしたとき、生成される高域通過信号群の総和 $S(t)$ について考える。リングは、エッジが急峻なほど最小通過周波数 θ が高い周波数まで検出され続ける。このとき、エッジ近傍を除く領域の誤差は振動しているため総和を計算によって相殺され、その絶対値をとると Fig.2-16に示すような高いピークがエッジ近傍に現れる。反対にエッジが滑らかなほど、リングが検出される高域通過信号は最小通過周波数 θ が低い周波数の場合のみとなるため、Fig.2-17に示すようにエッジ近傍に現れるピークは低くなる。ここで、最小通過周波数 θ の高域通過フィルタを $H_{\theta}(\xi)$ 、入力信号のフーリエ変換信号を $\hat{F}(\xi)$ とすると、高域通過信号群の総和 $S(t)$ は式 2-7によって表される。

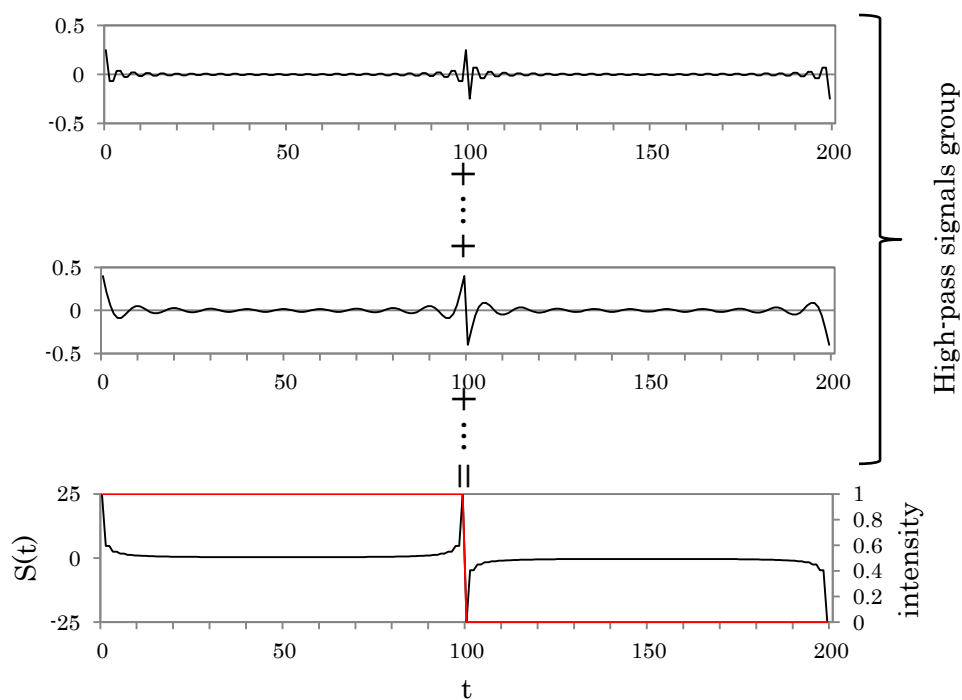


Fig.2-15 通過帯域の異なる高域通過信号群の総和 $S(t)$

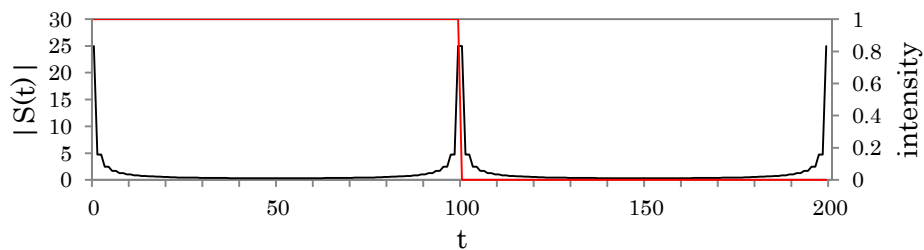


Fig.2-16 急峻なエッジにおける総和 $S(t)$ の絶対値
(赤線右軸：入力信号，黒線左軸：総和 $S(t)$ の絶対値)

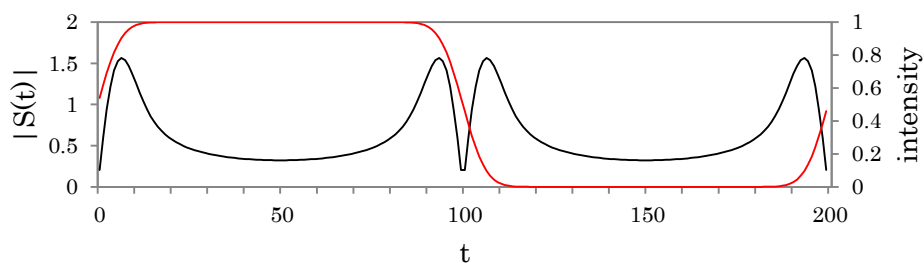
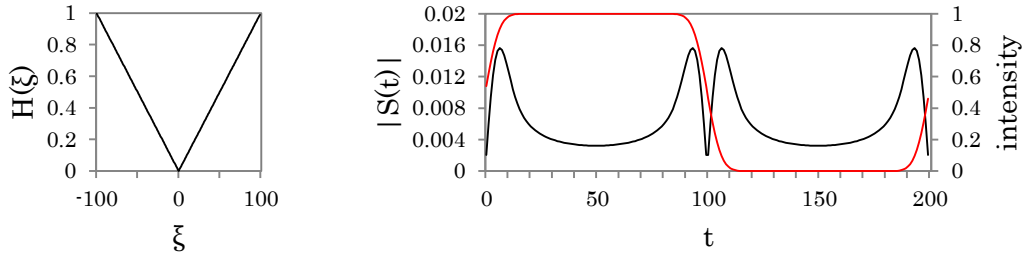
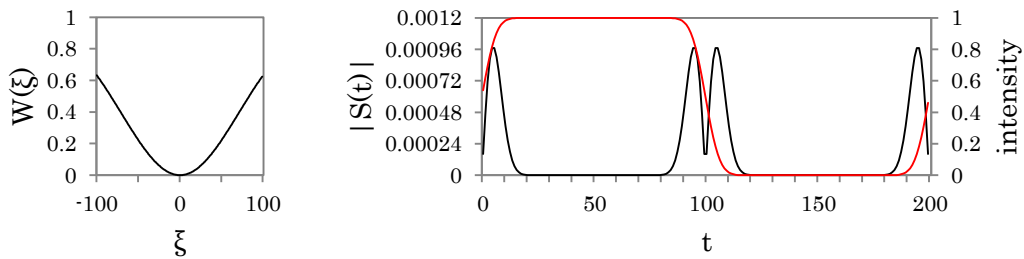


Fig.2-17 滑らかなエッジにおける総和 $S(t)$ の絶対値
(赤線右軸：入力信号，黒線左軸：総和 $S(t)$ の絶対値)



(a) 低域抑制フィルタ $H(\xi)$ (左)と出力信号(右)



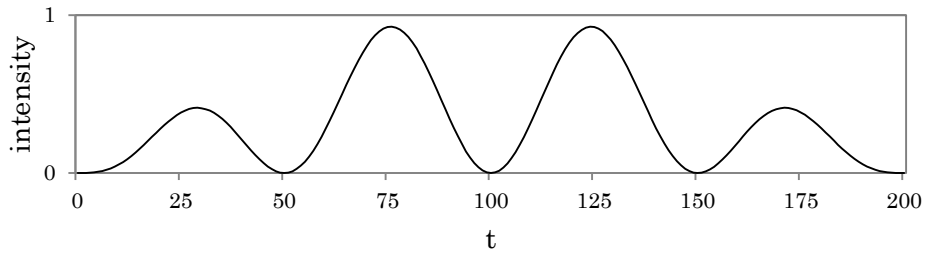
(b) 重み付き低域抑制フィルタ $W(\xi)$ (左)と出力信号(右)

Fig.2-18 提案フィルタによる出力信号の最適化

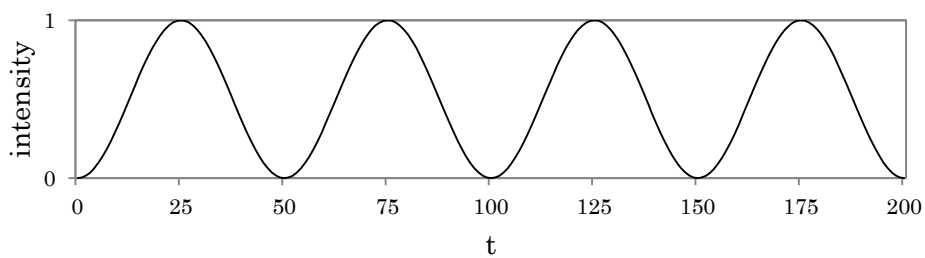
$$\begin{aligned}
 S(t) &= \text{IDFT} \left[\sum_{\theta=1}^M H_{\theta}(\xi) \hat{F}(\xi) \right] \\
 &= \text{IDFT} \left[\hat{F}(\xi) \sum_{\theta=1}^M H_{\theta}(\xi) \right]
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

IDFT は逆離散フーリエ変換(Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT)

式 2-7 から、高域通過信号群の総和 $S(t)$ は、 $\{H_1(\xi) + H_2(\xi) + \dots + H_{M-1}(\xi) + H_M(\xi)\}$ なる低域抑制フィルタ $H(\xi)$ を入力信号に適用することで算出できる。つまり $H(\xi)$ は、Fig.2-18(a)に示す通り高域程通過させやすい(高域程強調する)フィルタとなる。このフィルタは Ram-Lak フィルタ[20]と呼ばれ、CT 法において信号の鮮鋭化に用いられるフィルタと同一の機能をもつが、本手法では前述の通り、鮮鋭化としての機能ではなくフィルタ適用後の信号の強度に注目する。また、CT 法ではノイズ抑制の為、高周波成分の通過を抑制した Shepp-Logan フィルタ[21]があるが、本手法ではこれとは逆に、手法の空間分解能の観点から、不連続点近傍から外れた領域の強度を抑制する必要がある。そこで、Fig.2-18(b)に示すような正規分布的に高周波成分に重みをつけた低域抑制フィルタ $W(\xi)$ を提案する。 $W(\xi)$ は、 $H(\xi)$ と比較してよりリング成分中の高周波数



(a) 原信号



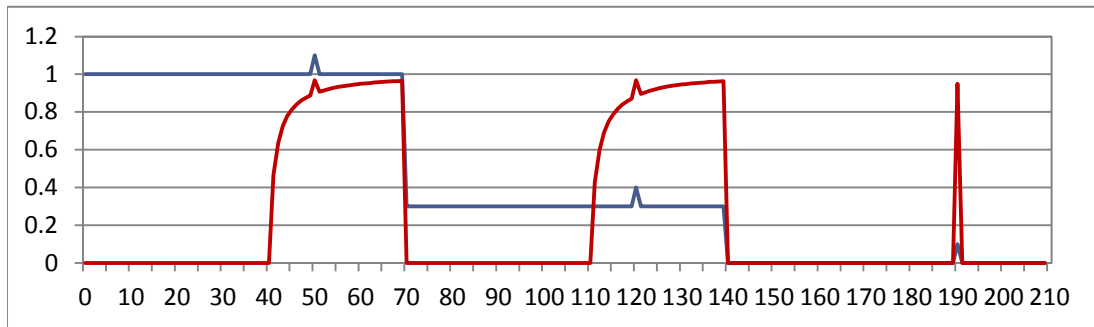
(b) エッジ強度正規化信号

Fig.2-19 エッジ強度正規化

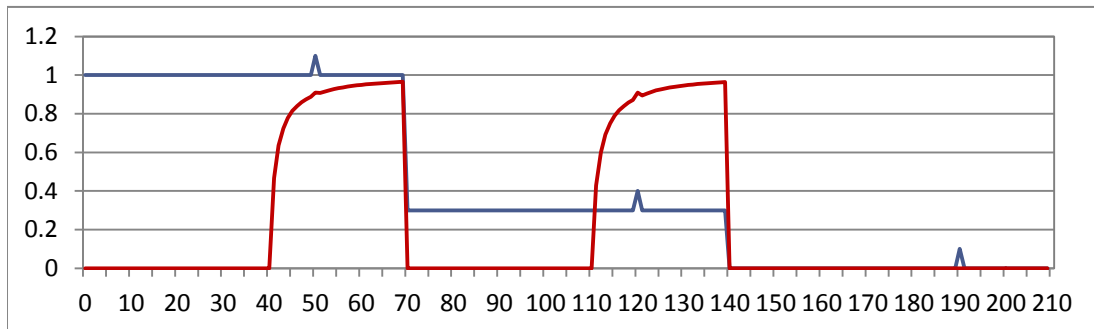
帯域を強調するため、通過した低周波成分による低域抑制信号 $S(t)$ のピークより外側の値を抑制しつつピーク値を強調し、さらにピークをエッジに近づけることができる。このように算出したピーク値は、エッジが滑らかなほど低く、反対にエッジが急峻なほど高い値となる。焦点ボケは、焦点ボケ強度が強いほど画像中のエッジを滑らかにすることから、低域抑制信号の絶対値 $|S(t)|$ のピーク値は焦点ボケ強度と相関があるといえる。

一方、リングングの誤差値はエッジ強度によって増減するため、エッジ強度が大きいほど合焦度が大きく計算されてしまう。したがって、 $|S(t)|$ からその影響を除去する必要がある。そこで、エッジの滑らかさを算出する前に、信号中のエッジ強度が均一になるように正規化する必要がある。具体的には、Fig.2-19に示すように信号中の隣接する極大値と極小値間の差分をエッジの滑らかさを損なうことなく均一にする。

以上の2つの処理によって算出した低域抑制信号の絶対値 $|S(t)|$ に現れるピーク値は、焦点ボケ強度が弱い（ピントずれ量が小さい）ほど高く、焦点ボケ強度が強いほど低く検出される。すなわち、本手法ではこのように算出された強度を合焦度とする。画像中の合焦度を推定するアルゴリズムを次節で説明する。



(a) ノイズ成分の強調を抑制しない処理例



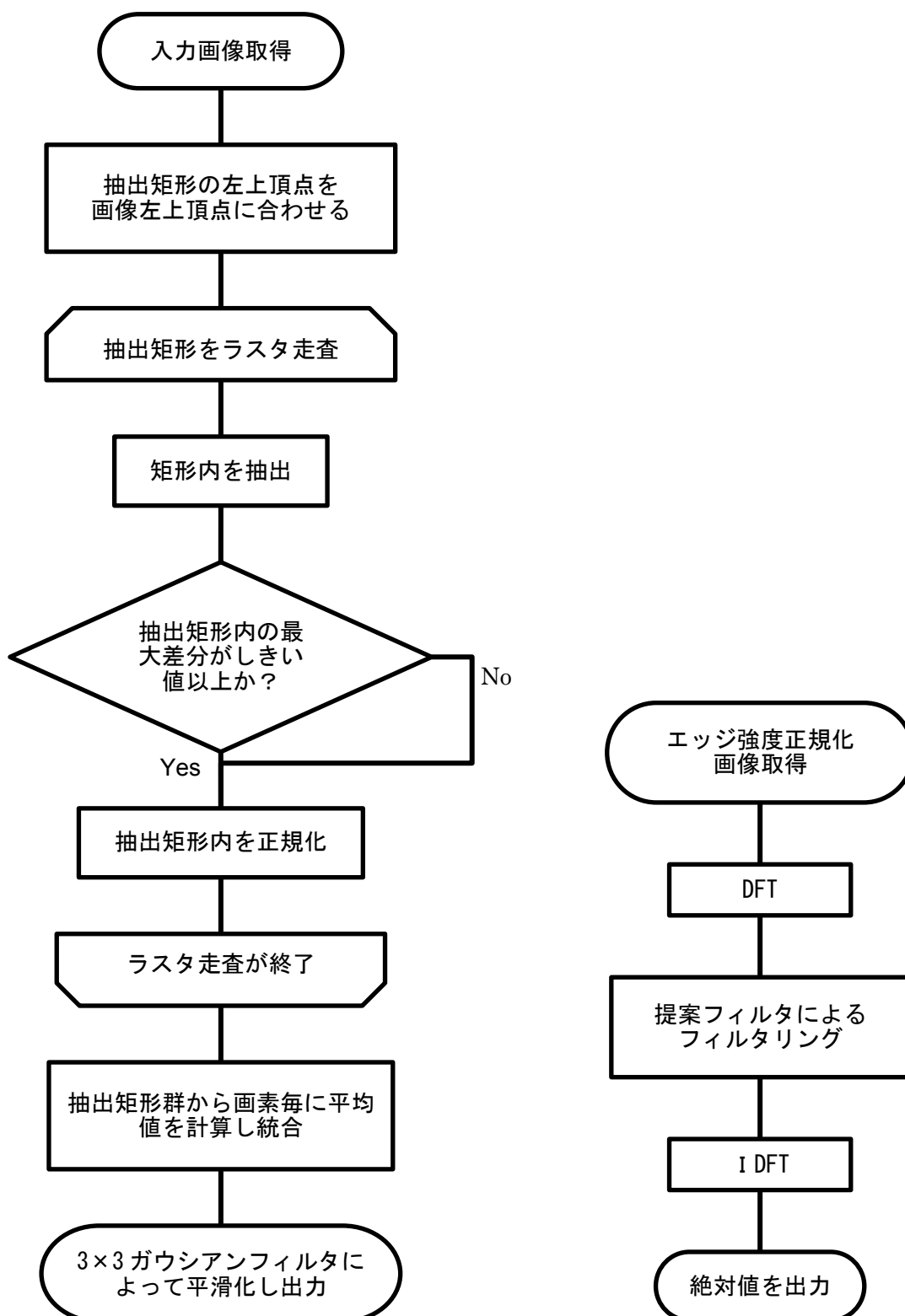
(b) ノイズ強調を抑制した処理例

Fig.2-20 エッジ強度正規化例(青線：入力信号，赤線：エッジ強度正規化信号)

2.4.3 合焦度推定アルゴリズム

2.4.3.1 エッジ強度正規化

前節で定式化した合焦度推定を 8bit 階調の 2 次元画像に適用するアルゴリズムを説明する。まず、画像の左上端から右下まで矩形の左上頂点座標を 1pixel ずつシフトさせながら任意サイズの矩形領域を抽出する。次に抽出した矩形内の輝度の最大差分値を求め、最大差分値がしきい値以上の場合、矩形内の輝度の値域を 0~255 に正規化する。差分値がしきい値未満の場合は正規化しない。正規化条件となるエッジ強度のしきい値は、画像の SN 比を考慮し、画像中のノイズを強調しないように設定する。最後に、画像中の各座標において、生成した矩形群から重複する画素値の平均値を計算する。このとき、波形のスケールが大きく変化している場合、含まれるノイズ成分も大きく強調されるため、 3×3 pixels のガウシアンフィルタを用いて平滑化する。以上の処理によってエッジ強度正規化画像を生成する。エッジ強度正規化処理の出力例を Fig.2-20 に示す。強度が異なるエッジがそれぞれ均一な強度をもつエッジに成形されていることが分かる。また、Fig.2-20(b)から信号中に含まれるノイズ成分の強調が抑えられていることが分かる。なお、入力画像がカラー画像の場合は、各成分について同様の処理を行う。エッジ強度正規化の流れを Fig.2-21(a)に示す。



(a) エッジ強度正規化の流れ (b) 合焦度推定の流れ

Fig.2-21 処理の流れ

2.4.3.2 合焦度推定

続いて、生成したエッジ強度正規化画像中の合焦度を推定するため、式 2-8 に示す重み付き低域抑制フィルタ $W(\xi, \eta)$ を生成する。

$$W(\xi, \eta) = 1.0 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sqrt{(\xi - \xi_M)^2 + (\eta - \eta_M)^2}}{\sqrt{2M^2}} \right)^2 \right\} \quad (2-8)$$

$$M = \begin{cases} \xi_M & , if \xi_M \geq \eta_M \\ \eta_M & , if \xi_M < \eta_M \end{cases}$$

ξ_M は画像における水平方向成分の最大周波数

η_M は画像における垂直方向成分の最大周波数

式 2-9 によって、 $W(\xi, \eta)$ とエッジ強度正規化画像のフーリエスペクトラム $\hat{G}(\xi, \eta)$ を乗算し、逆フーリエ変換によって算出された信号の絶対値を求め合焦度分布 $B(x, y)$ とする。合焦度推定の流れを Fig.2-21(b) に示す。

$$B(x, y) = |\text{IDFT}[W(\xi, \eta)\hat{G}(\xi, \eta)]| \quad (2-9)$$

なお、入力画像がカラー画像の場合は式 2-10 に示す通り、上記の処理を各成分について行い、画素毎に最大なる合焦度を選択することで統合する。

$$B(x, y) = \begin{cases} B_{bgr}(b: x, y) & , if MAX = B_{bgr}(b: x, y) \\ B_{bgr}(g: x, y) & , if MAX = B_{bgr}(g: x, y) \\ B_{bgr}(r: x, y) & , if MAX = B_{bgr}(r: x, y) \end{cases} \quad (2-10)$$

$$B_{bgr}(x, y) = |\text{IDFT}[W(\xi, \eta)\hat{G}_{bgr}(\xi, \eta)]|$$

2.4.4 シミュレーション実験

2.4.4.1 推定された合焦度の評価

Fig.2-22 に示すような、白（輝度値 255）黒（輝度値 0）の 2 色によるエッジをもつ 640×480 pixels のテクスチャを用意した。この画像に式 2-11 を点広がり関数(Point Spread Function: PSF)とし、 σ を変更しつつ適用することで擬似的に空間不定な焦点ボケ強度をもつ画像を生成した。

$$psf(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-320)^2 + (y-240)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-11)$$



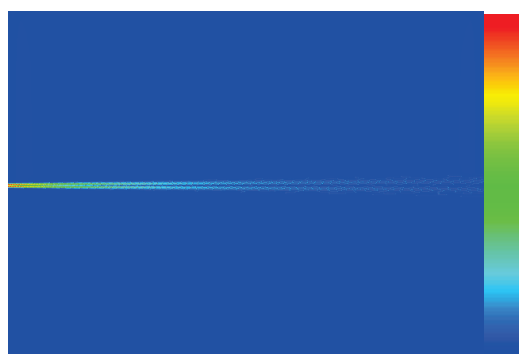
Fig.2-22 白(輝度値 255)黒(輝度値 0)の2色によるエッジをもつテクスチャ



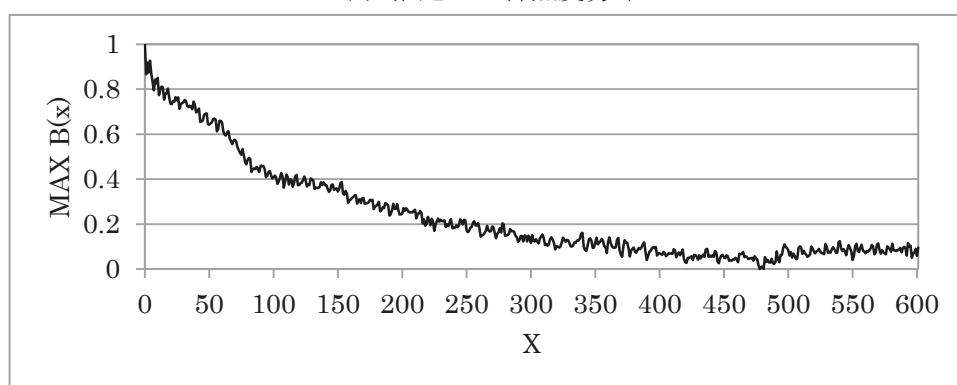
Fig.2-23：擬似的に生成した焦点ボケ画像

焦点ボケ強度は、Fig.2-23 に示すように画像左端を合焦点($\sigma = 1.0$)とし、右端($\sigma = 5.0$)に向かって等速にボケ強度を増加させた。以上によって生成したボケ画像の合焦点を提案手法によって推定した。推定した合焦点分布および、推定した合焦点分布における各縦軸上の最大合焦点の推移を Fig. 2-24 に示す。Fig.2-24(b)から、推定された合焦点が $x = 0$ (合焦点)のとき最大となり、以後 x の増加とともに徐々に低下している様子が推定されていることが分かる。またグラフ中で、推定した合焦点の減衰が等速で現れていないが、これは σ が大きくなるほど PSF の形状変化が穏やかになり、画像上においても近傍領域との差異が乏しくなる為である。

2.4.4.2 異なるエッジ強度を含む画像における合焦点推定



(a) 推定した合焦度分布



(b) 推定した合焦度の推移

Fig.2-24 推定した合焦度の推移

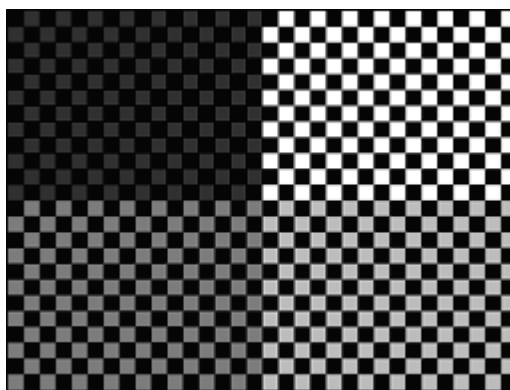


Fig.2-25 異なるエッジ強度を有するチェスボード状のテクスチャ

とで、擬似的に焦点ボケ画像を生成した。焦点ボケ強度分布を、画像中心を合焦点 ($\sigma = 1.0$)として画像端($\sigma = 5.0$)まで変化させた画像を Fig.2-26 に示す。また、合焦点をそれぞれ(160,120), (480,360)に持ち、各点から放射状にボケ強度を大きくし、同じく $\sigma = 1.0 \sim \sigma = 5.0$ まで変化させた画像を Fig.2-27 に示す。

以上の2枚のシミュレーション画像を入力とし、画像中の空間不定な合焦度を提案手

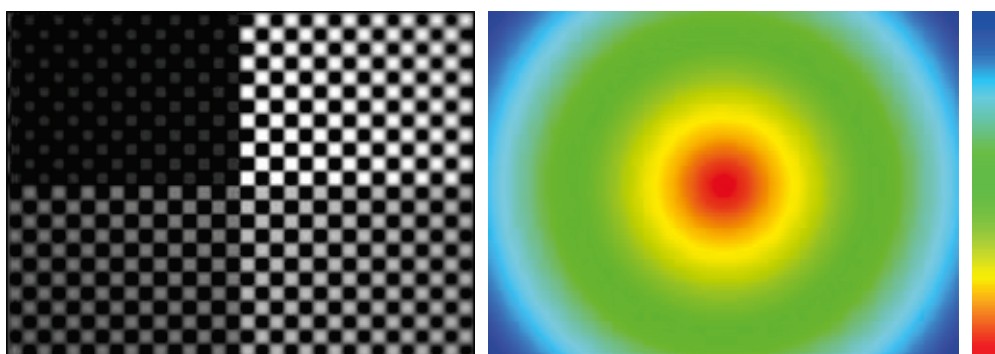


Fig.2-26 合焦点を中心にもつ擬似焦点ボケ画像(左)とボケ強度分布(右)

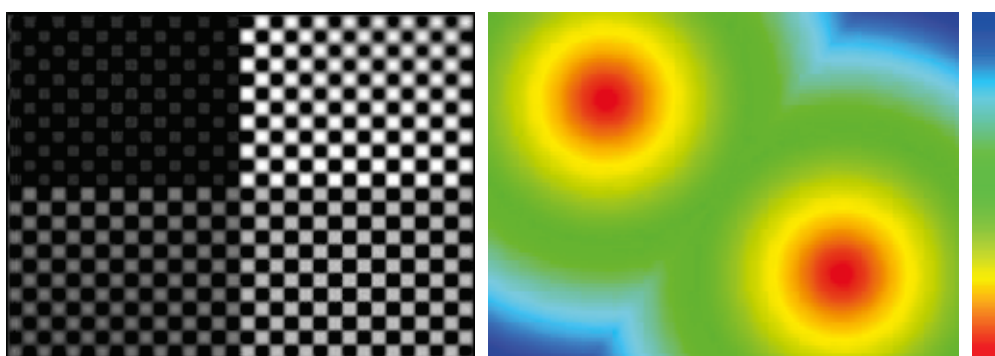


Fig.2-27 2つの合焦点をもつ擬似焦点ボケ画像(左)とボケ強度分布(右)

法によって推定した. エッジ強度正規化画像を生成する際の局所矩形サイズはいずれも 20×20 pixels とし, 正規化处理の際の矩形内最大差分値のしきい値はノイズが存在しない為 0 とした. 視認性を高めるため, 11×11 のガウシアンフィルタを 2 回適用した合焦点推定結果に基づき生成した $3D$ グラフを Fig.2-28 および Fig.2-29 にそれぞれ示す. いずれの合焦点推定結果においても, 提案手法によってエッジ近傍に合焦点を示すピークが現れていることがわかる. また, 推定された合焦点が, 合焦点から放射状に減衰する様子が正しく推定されていることが分かる.

2.4.5 サンプル物体の撮像画像を用いた実験

形状(ハイトフィールド)が既知の物体を撮像し, カメラから同じ距離にある面の推定合焦点を比較することによって, 高さ(絶対量)を基準として推定合焦点の正確さを評価した. Fig.2-30 に実験に用いたサンプル物体の例を示す. サンプル物体は, 約 0.8×0.8 mm 角のチェスボード状のテクスチャを有し, 底面から $10, 20, 30, 40$ mm の高さに 25 mm 角の正方形面と, 底面から 40 mm の高さまで連続する斜面を有する. これを, 直上約 200 mm から高さ 40 mm の正方形面に焦点を合わせて撮像した画像, 及び提案

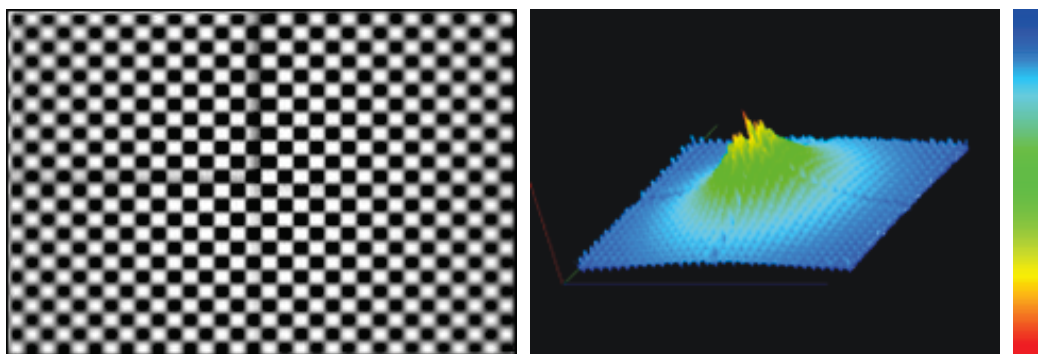


Fig.2-28 Fig.2-26 におけるエッジ強度正規化画像(左)と推定した合焦度分布(右)

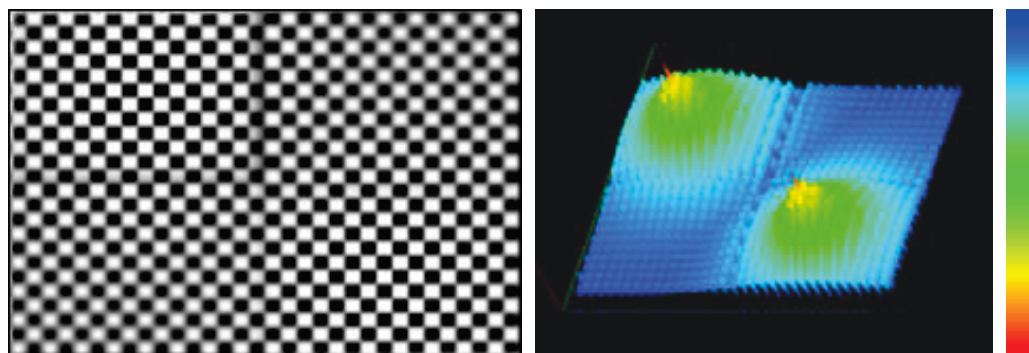


Fig.2-29 Fig.2-27 におけるエッジ強度正規化画像(左)と推定した合焦度分布(右)

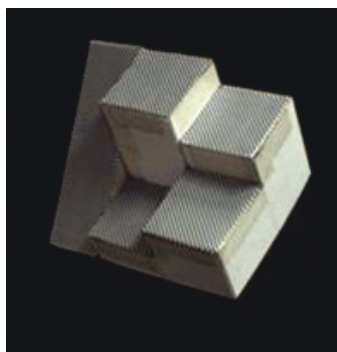


Fig.2-30 対象物体

手法によって推定した合焦度分布を Fig.2-31 に示す．なお撮影は，PointGrayRESEARCH 社製 Flea2FL2-14S3C に，PENTAX 社製の単焦点レンズ H1214-M をマウントし，最大開口径で行った．シミュレーション実験と同様，4 段の各面が下がるにしたがって，また斜面部については下るにしたがって合焦度が低下していることが分かる．

Fig.2-32 に最下点を 0 とし，高さ 40mm までの斜面の推定合焦度の推移と，4 つの

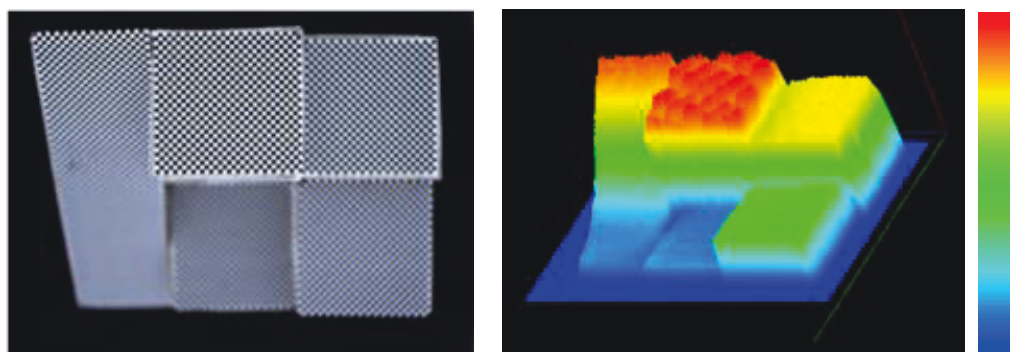


Fig.2-31 入力画像(左)と 3D 合焦度分布(右)

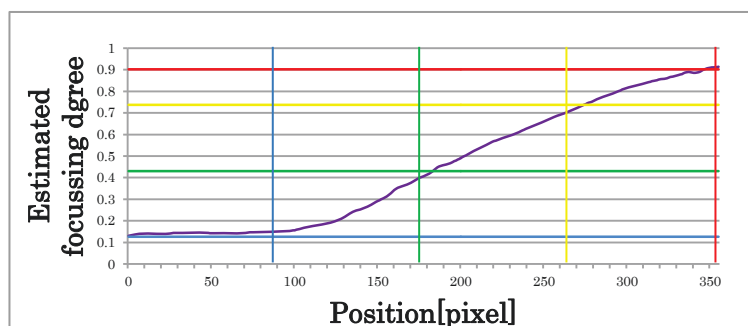


Fig.2-32 斜面領域の推定合焦度の推移

平面における推定合焦度の平均値を水平線で示したグラフを示す。なお、斜面の合焦度推移グラフも各高さ(画像上の横方向)の平均値とした。横軸はサンプル物体の縦方向長さに対応し、実寸 50mm、撮像画像上で 356pixel となる。ここで、斜面部は 356pixel で高さ 40mm となることから、Fig.2-32 の横軸上の 89pixel, 178pixel, 267pixel, 356pixel 目がそれぞれ高さ 10mm, 20mm, 30mm, 40mm に対応することになる。Fig.2-32 中の 4 本の垂直線はこの高さに対応する。これらの垂直線と各面の平均合焦度を表す水平線との交点近傍を、斜面の合焦度推移が通過すれば、提案手法による推定合焦度の正確さを示すこととなる。図より各高さにおいて推定合焦度で約 0.0222 の誤差があるが、これは全体のレンジの約 3%以下であり、提案手法の有効性が確認できた。

2.4.6 光学系未知な画像の合焦度推定

提案手法は、画像シーン中における最大合焦度を基準とした相対的な合焦度の推定手法である。したがって、例え画像の光学系が未知であっても推定が可能である。そこで、Fig.2-33 に示す光学系が未知な 2 枚の画像を入力とし、それぞれ合焦度を推定した。Fig.2-33(左)の画像におけるエッジ強度正規化処理の矩形サイズは 25×25pixels で正規化のしきい値は 25 である。Fig.2-33(右)の画像におけるエッジ強度正規化処理の矩形サ

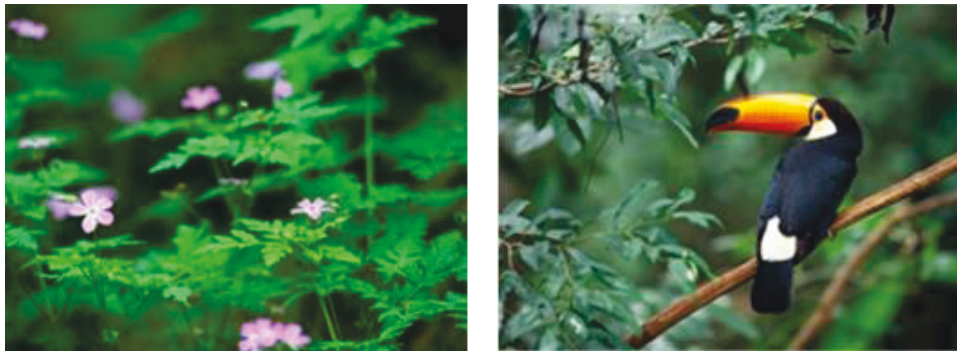


Fig.2-33 光学系が未知な画像



Fig.2-34 Fig.2-33 のエッジ強度正規化画像

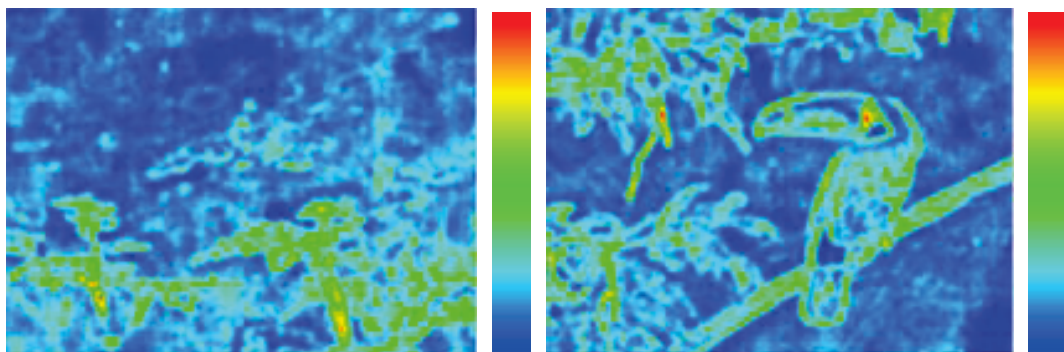


Fig.2-35 合焦度分布

サイズは 25×25 pixels で正規化のしきい値は 50 である. それぞれのエッジ強度正規化画像を Fig.2-34 示す. また, 11×11 pixels のガウシアンフィルタを 2 回適用した推定した合焦度分布を Fig.2-35 に, 合焦度分布の俯瞰図を Fig.2-36 に示す. Fig.2-35 および Fig.2-36 から, 各画像の合焦度の推移が推定されていることがわかる.

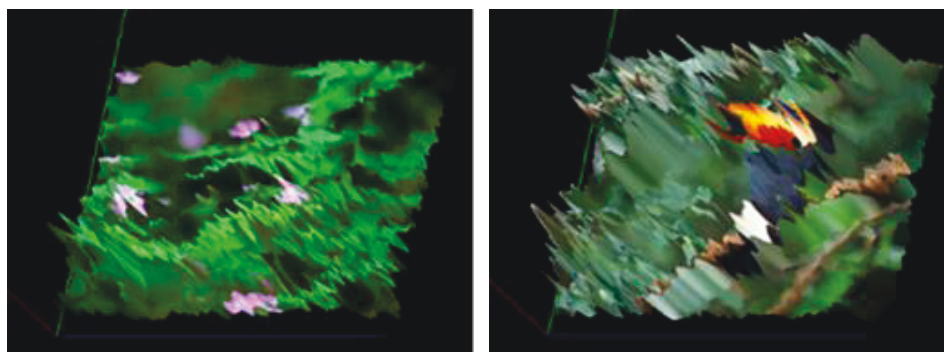


Fig.2-36 合焦点度俯瞰グラフ

2.5 まとめ

本章ではまず、焦点ボケ強度に空間不変性の無い画像から、全焦点画像成分のデコンボリューションあるいは、空間周波数特性の概形から焦点ボケ強度を推定することは困難であることを述べた。この問題に対し、次の2つの手法を提案した。

まず2.3節で、画像中から焦点ボケ強度が空間不変である局所領域群を抽出し、各抽出領域で焦点ボケ強度を推定し統合することにより、焦点ボケ特徴の推定が困難な空間不変でない焦点ボケ強度を有する静止画像中から焦点ボケ強度分布を推定する手法を提案した。

本手法では、まず、画像から抽出する領域を、画像中のエッジ点に直交する線分領域とし、物体の形状によるエッジを考慮してエッジ点を境界に分割した2つの線分領域とすることで、焦点ボケ強度の空間不変性が高い確率で確保されるように設定した。次に、抽出した線分領域内の輝度分布を一次元の入力信号としてDFTによって周波数解析し、0.0~1.0の値域に正規化した対数振幅スペクトラムと直流成分原点とのユークリッド距離の総和を求めることで、ピントずれ量に反比例する合焦点度を算出した。最後に、算出された合焦点度を抽出領域に格納し、他のエッジ点による抽出領域との重複領域では、格納された合焦点度群の平均値を格納することで、画像シーンの合焦点度分布を推定した。

実験では、推定した合焦点度が画像中の焦点ボケ強度に応じて算出されることと、推定された合焦点度分布が画像中の空間不変でない焦点ボケ強度分布を捉えていることを確認した。また、市販のカメラシステムによって撮影された空間不変でない焦点ボケ強度を有する画像からの合焦点度の推定実験では、画像中の大域的な焦点ボケ強度を推定することが可能であることを確認し、本手法の妥当性を検証した。しかしながら、本手法が、設定した局所領域以上の空間分解能を要するような複雑な焦点ボケ強度分布を有する領域において、推定される合焦点度の精度が低下する問題を確認した。

その問題に対して次に2.4節で、画像の空間周波数から高周波帯域の周波数成分を除去したときに、画像中の焦点ボケ強度と除去帯域の関係によって、復元信号に現れるリ

ンギング特徴の有無が決定されるという特性を利用する手法を提案した。本手法ではまず、入力画像中のエッジ強度を正規化した画像を以下の手順によって生成した。

- ・ 画像の左上端から右下まで矩形の左上頂点座標を 1pixel ずつシフトさせながら任意サイズの矩形領域を抽出する。
- ・ 抽出した矩形内の輝度の最大差分値を求め、最大差分値がしきい値以上の場合、矩形内の輝度の値域を 0~255 に正規化する。このとき、差分値がしきい値未満の場合は正規化しない。また、しきい値は、画像の SN 比を考慮し、画像中のノイズを強調しないように設定する。
- ・ 画像中の各座標において、生成した矩形群から重複する画素値の平均値を計算する。
- ・ 波形のスケールが大きく変化している場合、含まれるノイズ成分も大きく強調されるため、 3×3 pixels のガウシアンフィルタを用いて平滑化する。

次に、エッジ強度正規化画像に対して、空間周波数成分に対して正規分布的に直流成分原点から放射状に重み係数を増大させる低域抑制フィルタを適用し、絶対値を計算することで、画像の合焦度分布を推定した。

シミュレーション実験では、二次元正規分布を PSF として任意のボケ強度分布を有するシミュレーション画像を生成し、本手法によって推定される合焦度の妥当性を検証した。チェスボード状のテクスチャを有するシミュレーション画像では、推定された合焦度分布が、任意に設定した焦点ボケ強度分布における強度の推移の特性を捉えていることを確認した。また、異なるエッジ強度を有するシミュレーション画像からも、同様に任意に設定した焦点ボケ強度分布の強度の推移特性を捉えることができたことから、本手法によって、エッジ強度が異なる画像においても頑健に推定可能であることを確認した。

以上の通り、焦点ボケ特徴に基づくアプローチによって単眼単視点計測を実現した。

第3章

単視点距離画像による実物体の運動推定

3.1 単眼単視点による任意物体の三次元運動推定

本章では、単視点カメラ前の任意の剛体・非剛体物体の三次元運動(平行移動・回転の6自由度)を推定する一手法を提案する。画像情報から任意物体の運動を検出する問題においては、入力画像の種類や情報量によって解決手法が異なる。例えばアプリケーションやコストの制約から、基本的な入力画像として「濃淡画像」「カラー画像」、画像枚数として「単視点画像」「多視点画像」といった具合に様々な画像情報を対象とする場合が想定できる。ここで、第1章で述べた通り、ロボットビジョンや監視カメラ等何れのシステムへの搭載を考えた場合も、単眼単視点によって実物体の運動推定が実現できれば、三次元計測及び運動推定に起因する制約は最小限であり、システム本来の要求を達成ことに注力できる。加えて、三次元運動推定は画像からの三次元再構成過程において二次的に生成される情報であるが、一般的には観測シーンにおいてスタティックな状況も含まれることを考えると、距離画像推定と三次元運動推定が独立していることは望ましい。その意味で、前章までで得られる単眼単視点による距離画像が時系列で得られた場合、その距離情報(対象の三次元形状情報)を三次元運動推定に積極的に利用することは妥当である。そこで本章では、単視点で計測される時系列距離画像を用いて任意物体の三次元運動を推定する手法を提案する。

3.2 従来手法と問題設定

動画像・動距離画像から物体の6自由度運動パラメータを推定する問題については、様々な手法が提案されている。従来手法は二通りに大別できる。一つは、フレーム間においてオプティカルフローを算出し、これに基づいて物体の運動パラメータを推定する方法[22]-[30]である。もう一つは、対象とする物体の三次元形状モデルを利用する方法[31]-[37]である。前者に類する多くの手法では、オプティカルフローが正確に得られていることや、運動中に対象は変形しないことなど様々な仮定のもと、方程式を解くことによってボトムアップ的に運動パラメータを推定する。また本研究での主張と同様に処理の入り口から三次元情報を活用し、オプティカルフローではなく三次元シーンフロー

(3D フロー)を用いてモーション推定を行う手法[38]も提案されている。以上の手法は、入力画像が安定して仮定条件を満たす場合は有効であるが、実画像への適用には制約があると考えられる。また一般的に、検出されるフローベクトルは単視点からの画像に基づくため、視点に対して物体裏側のフローはセルフオクルージョンにより欠如している。従って、特に奥行き方向の回転推定は困難となる。これに対して、[38]の様に多視点情報を用いる方法もあるが、やはりアプリケーションによっては視点配置の制約条件が問題となる。一方後者は、対象の三次元形状モデルを用い、入力画像とのモデルベースマッチング等によって対象を追跡(姿勢変化も含めて)するトップダウン的な手法である。モデルベース法は一般的にノイズに対してロバストであるが、対象の三次元形状モデルが必要である。また以上二通りの手法に共通して、対象が完全な剛体でない場合(例えば人間や、ぬいぐるみ、紙 etc.)は適用が困難である。このことは、アプリケーションの制約となる。

以上を踏まえて、本研究では以下の課題の解決を試みる。

- ・単視点からの受動型計測による距離画像を用いる。
- ・コーナーやエッジ等の顕著な画像特徴が安定して検出できない場合にも対応する。
- ・入力される距離画像のノイズ・アウトライアに対応する。
- ・単視点からの画像を入力し、視点側の画像情報のみから対象の三次元運動を推定する。
- ・自由曲面を有する任意の剛体・非剛体物体の大域的な三次元運動(6自由度)をリアルタイムに推定する。
- ・非剛体物体が運動中に多少の変形を伴っても、全体としての運動を推定する。

3.3 提案手法のアプローチ

前節で整理した課題解決のため本研究では、運動推定の基礎データとして時系列距離から算出された3Dフローを用いる。検出された3Dフローを仮想空間における「流れ場(または力場)」に見立て、それを仮想的な「浮標」にマッピングし、仮想浮標の運動を簡易物理シミュレーションによって求める。この仮想浮標の運動をモニタすることによって実物体の運動を推定する。「浮標」は海流観測や、流体実験において流れを可視化・検出する際に使用される「うき」のことである。本研究では、離散的な3Dフローによる仮想的な「流れ」の大域的な運動をモニタ・推定する意味で、「仮想浮標」と呼ぶ。前述の通り、画像による運動推定法は二通りに大別できるが、3Dフローによって運動する仮想モデルを用いる点で中間的といえる新たな手法を提案する。

ここで、運動推定に用いる時系列距離画像は、前章までで提案した焦点ボケ特徴に基づいて推定された結果を用いるところであるが、本章におけるアルゴリズム検討及び実験では Fig.3-1(a)に示す市販のステレオビジョンシステムを用いた。このことは主に研究過程の並列性が理由であり、本質的な問題ではない。つまり、本章で提案する三次元

運動推定手法は、その入力を時系列距離画像とすることとし、その計測デバイスについては制約条件がない。さらに、入力される時系列距離画像の画質についても前節でまとめた通り、あらゆる三次元距離画像計測デバイスにおいて最低限確保できるレベルを想定している。

あらためて、Fig.3-1(a)に実験装置、(b)に入力画像から生成した三次元CGおよび座標系を示す。本章では Point Grey Research 社製の 2 眼ステレオビジョンシステム (BumbleBee) を用いた。視差画像から、カメラを基準とした座標系における物体表面上の点の三次元座標 (x,y,z) と、カラー (r,g,b) が W (幅) $\times H$ (縦)点算出される。本章の以後の実験では $W=320$ 点、 $H=240$ 点に設定した。実験用に構築したアプリケーションでは、Fig.3-1(b)に示す通り、カメラ前の立方体領域をクリッピングできる。本章の以後の実験では立方体の一辺の長さ $L=0.50\text{m}$ 、カメラからの距離 $D=0.40\text{m}$ に設定した。三次元空間でクリッピング処理することにより、運動推定する対象物体と背景とを容易に分離することができる。なお、距離画像を用いた前景と背景の分離については第4章でもまとめる。

さて、本章で提案する運動推定手法は、時系列距離画像等から算出される 3D フローを入力とする。前述の通り計測デバイスや 3D フローの算出方法は任意である。例えば一般的なステレオマッチングにおける左右カメラの対応点探索と、時系列フレーム間での対応点探索を組み合わせた方法[39][40]によって得られた 3D フローが使用できる。本章では、中京大学の青木らが提案している HCH(高さ・カラーヒストグラム:Height Color Histogram)特徴量[41]に基づいて検出された 3D フローを用いた。時系列距離画像のフレーム間において対応点が算出できれば、それらを結ぶことにより直接的に 3D フローが検出できる。ここで問題になるのは対応点を検出するための特徴量である。HCH 特徴量ではまず、得られた物体表面の形状特徴に着目する。特に自由曲面物体に対しては、物体のエッジやコーナー等の特徴点安定して現れないことから、表面の形状特徴を利用することは有効である。ただし、ステレオビジョンから得られる距離画像には精度面や情報欠落等の問題がある。また、円筒や球体等、回転によって形状の変化が現れない物体の運動については適用することができない。そこで HCH 特徴量では、物体表面データの任意の点において、法線ベクトルに基づく形状特徴とカラー情報を統合する。物体表面データの注目点の法線ベクトル方向に対して、周囲点の相対的な高さ分布のヒストグラムを生成する。更に、各高さ階級における周囲点のカラー値 (r,g,b) から得られる色相・彩度・輝度の分布を付加したヒストグラムを生成する。つまり、HCH 特徴量は、物体表面の局所領域におけるカラー情報の相対的な高さ分布を表す。Fig.3-2 に HCH 特徴量に基づいて検出された 3D フローの一例を示す。図より、対象物体(クマのぬいぐるみ)の回転運動による 3D フローが検出されていることが分かる。

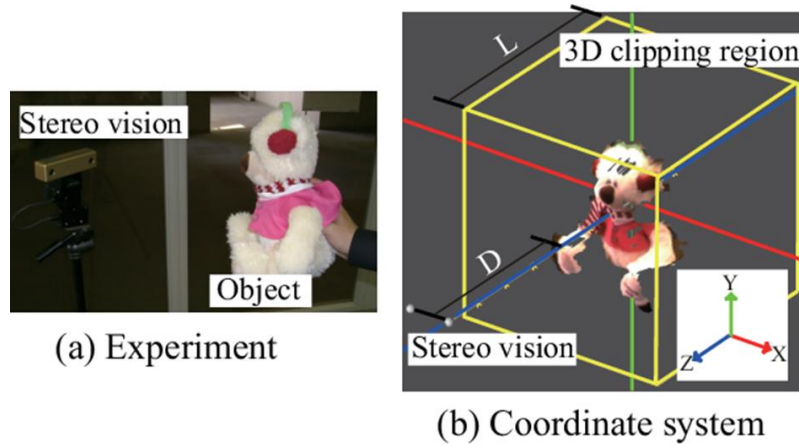


Fig.3-1 Stereo vision system

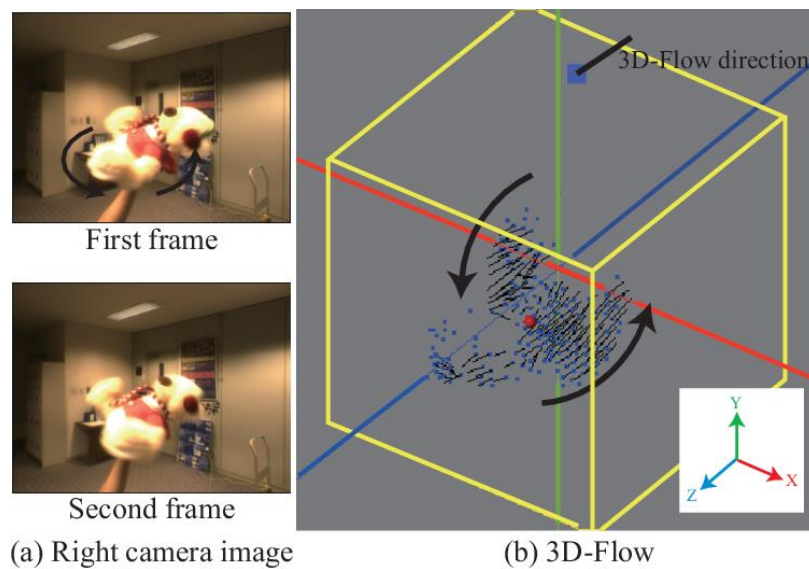


Fig.3-2 Calculation 3D-Flow by using HCH feature

3.4 仮想浮標を介した実物体の運動推定

3.4.1 概要

前述の通り, 本研究ではHCH 特徴量に基づいて検出された3Dフローを用いる. HCH 特徴量の特長から, コーナーやエッジ等の画像特徴が安定して検出されない場合や, 対象が非剛体で運動中に局所的な変形を伴う場合でも3Dフローを検出することができる. 従って, 本研究の課題解決に適當である. また, オプティカルフローと異なり, 局所的な三次元運動が検出されている点で, 物体全体の三次元運動の推定に有効である. ただ

し、一般的なオプティカルフローと同様、物体上の特定の点を継続的にトラッキングしているわけではない。従って従来手法と同様に、なんらかの方法で離散的なフローから物体全体の運動を推定する必要がある。

Fig.3-2 の例のように、3D フローは物体表面のある点のフレーム間における運動ベクトルである。従って、対象が完全剛体で、かつ誤差やアウトライアが含まれていなければ、全てのフローは同一の変換マトリクスに基づくはずである。つまり、解析的に平行移動・回転パラメータを算出することができる。しかし、一般的に実画像から得られたオプティカルフローや3D フローには誤差やアウトライアが含まれる。これは、画像中の局所領域の見え方(輝度勾配、色分布、エッジ、形状等の画像特徴)を手掛かりとして画素の移動方向を算出したり、フレーム間での対応点を求めるので、三次元空間で運動する物体を二次元画像に射影することによる情報欠落を本質的には回避できないことに起因する。特に、物体の切り立った凹凸部による画像中のジャンプエッジ付近は、フレーム間において見えなくなる(または、見えていなかった部分が見える)可能性が高く、3D フローの精度は落ちる。これに対しては、誤差最小化に類する解法や、アウトライアを削除する解法を用いることによっても運動パラメータの推定は可能である。しかし、対象が非剛体で、全体の運動中に局所的な変形を伴う場合は、検出されたフローから局所変形と大域的運動の成分を切り分けることは困難である。さらに、先ほど述べた誤差やアウトライアもこれに含まれるわけであるから、解法の難度はさらに高くなってしまふ。また、計算コストの増大は、実時間での処理を困難にする。一方、モデルベース手法を導入することによってノイズに対するロバスト性は向上するが、対象を限定してしまふ。

本研究では、フレーム間での変位ベクトル群である3D フローを統合する手法として、コンピュータグラフィックス分野で広く利用されているバネネットワークモデルによる簡易物理シミュレーション[42]-[44]を応用した手法を提案する。バネネットワークモデルは、剛体や弾性物体が外力・内力によって運動・変形する様子を、簡易にかつリアルタイムにシミュレーションする手法である。物体を質点に離散化し、それらをバネ・ダンパで接続してモデル化する。モデルに設定されるバネ係数等によって物体の性質が表現され、任意の外力が質点に作用した場合のアニメーションが生成される。つまり、離散的な外力ベクトル群が作用した場合の仮想物体の運動を表現できる。バネネットワークモデルを画像認識に応用した例として、顔表情解析の研究[46]がある。顔画像の表情による画素の輝度変化を外力として2次元のバネネットワークに付与し、ネットワークの変形から顔全体の変形特徴を検出している。一方本研究では、空間に固定しない三次元のバネネットワークモデルに3D フローを付与し、ネットワークの三次元運動から対象物体の大域的な運動を検出する。3D フロー群を仮想的な外力として球形のバネネットワークモデルの質点にマッピングし、それによって表出される球の運動から実物体の運動を推定する手法を提案する。3D フローを空間中の「流れ場(または力場)」に見

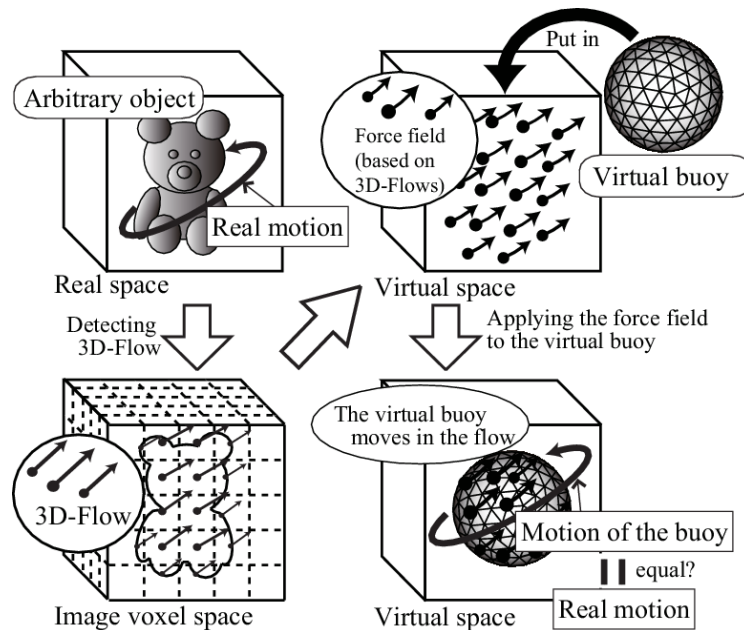


Fig.3-3 Concept

立てると、流れの中で平行移動・回転することから、本研究ではこの球形バネネットワークモデルを「仮想浮標」と呼ぶ。

Fig.3-3 に提案手法の概念図を示す。実物体の運動によって空間中に 3D フローが生成される。3D フローベクトル一つ一つを仮想外力にコンバートし、仮想浮標にマッピング・作用させる。仮想外力の合力が仮想浮標の全体の運動を促すため、検出された 3D フローがランダムな方向誤差を含んでいる場合でも、合力の算出においてそれらは相殺されることが期待できる。また、局所的変形による仮想外力は大域的な運動による仮想外力の合力より小さく、さらに局所的変形を含むフローの大域的運動方向の成分は運動推定に利用できることが見込める。従って、対象とした非剛体物体が運動中に多少の変形を伴っても、仮想浮標は物体の大域的な運動に追従する。また、実物体の視点側表面のみに存在する 3D フローのみで運動推定できる。つまり単視点情報のみ利用する。

ここで、仮想浮標は実物体の運動を直接シミュレーションするわけではなく、生成された「流れ場」の大域的な流れをモニタするためのモデルである。つまり、仮想浮標は空間中の任意点における変位ベクトルの集合である「流れ場」=3D フローを統合するための手段であり、仮想浮標の運動シミュレーションは実空間における物体の運動を物理的にシミュレートしている訳ではない。従って従来のモデルベースのアプローチと異なり、現実物体の三次元形状モデルを持つ必要はない。

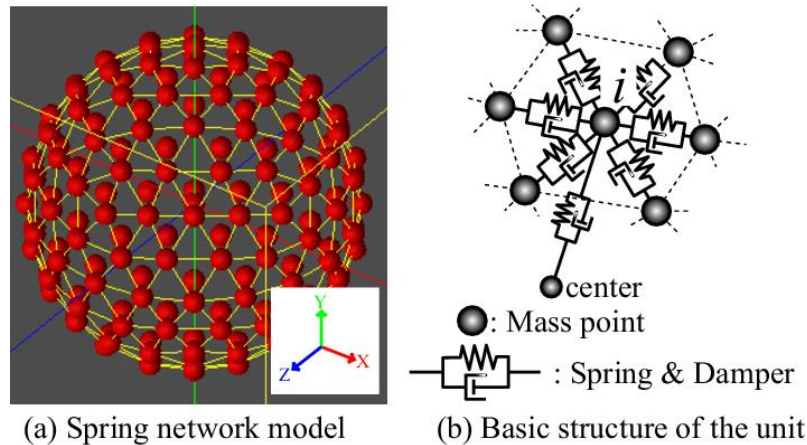


Fig.3-4 Virtual buoy (Spring network model)

3.4.2 仮想浮標の設定

前述の通り，本研究では球形の仮想浮標を用いる．球形以外も考えられるが，任意の実物体形状に広く対応するために，異方性のない球形とした．

球形の仮想浮標をバネネットワークモデルで記述する．Fig.3-4 に仮想浮標を示す．正 20 面体の各面を再分割し，三角形メッシュからなる球を生成する．このメッシュ交点に質点を配置する．Fig.3-4(b)の通り，各質点は隣接する 6 つの質点及び球の中心に配置した質点とバネ・ダンパにより接続されている．本章の以後の実験では，質点数 163，バネ本数 642 のバネネットワークモデルを使用した．生成した仮想浮標モデルにおけるバネ自然長の最大値と最小値の比は 1.18 : 1 であり，球表面上の質点間距離がほぼ均一である．

仮想浮標を構成する質点とバネの役割は二つに分かれる．まず，3D フローによる「流れ場」による外力を受けるのは，仮想浮標表面を構成する質点群である．一方中心質点の質量調整は，浮標全体の運動感度(平行移動及び回転のし易さ)を左右する．また，表面の質点群を繋ぐバネネットワークは，各質点に離散的に作用する 3D フローによる外力を互いに伝達し，仮想浮標全体の運動を表出する役割を担う．一方，仮想浮標中心の質点と表面質点を繋ぐバネは，浮標の球形状を維持する役割を担う．

3.4.3 3D フローの仮想浮標への対応付け

検出された 3D フロー群を「流れ場(仮想外力)」にコンバートし，仮想浮標に作用させる．具体的には，各 3D フローを仮想浮標表面の質点にマッピングする．手順を以下にまとめる．

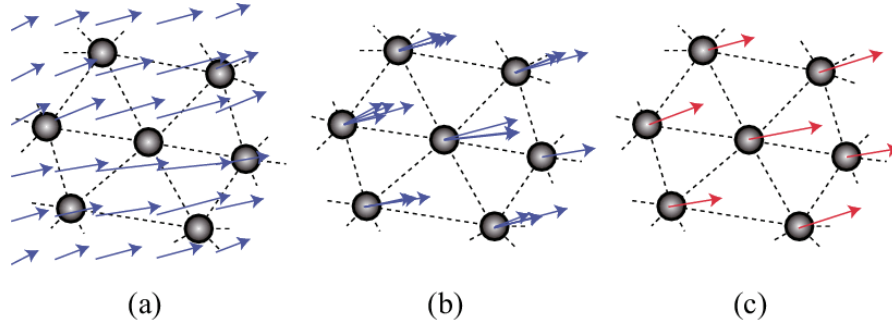


Fig.3-5 Conversion of 3D-Flow into Force

①3D フロー群の重心と、重心からの各 3D フローの検出位置までの平均距離を算出する．なお、重心を \mathbf{G}^{3DF} 、平均距離を L^{3DF} とする．

②3D フロー群の重心と仮想浮標の中心質点の位置を合わせる．なお、中心質点を \mathbf{G}_{buoy} 、各 3D フローの位置を \mathbf{x}_p^{3DF} (ただし、 $p = 0, 1, \dots, N^{3DF} - 1$)とする．位置合わせ後の各 3D フローの位置 $\mathbf{x}_p'^{3DF}$ は次式で表される．

$$\mathbf{x}_p'^{3DF} = \mathbf{x}_p^{3DF} + (\mathbf{G}_{buoy} - \mathbf{G}^{3DF}) \quad (3-1)$$

③各 3D フローの位置を仮想浮標のサイズにスケーリングする．なお、仮想浮標の半径を R_{buoy} 、 \mathbf{G}^{3DF} から \mathbf{x}_p^{3DF} に向かう単位ベクトルを \mathbf{e}_p^{3DF} とする．スケーリング後の各 3D フローの位置 $\mathbf{x}_p''^{3DF}$ は次式で表される．

$$\mathbf{x}_p''^{3DF} = \mathbf{x}_p'^{3DF} + (\alpha R_{buoy} - L^{3DF})\mathbf{e}_p^{3DF} \quad (3-2)$$

ただし、 α はスケーリング係数で、マッピングの広がり进行调整する．スケーリングによって、任意の大きさの物体に対応できる．

④算出された $\mathbf{x}_p''^{3DF}$ と仮想浮標表面の各質点位置を比較し、模式図 Fig.3-5 の(a)から(b)のように、各 3D フローベクトルを近傍の質点に対応付ける．

⑤仮想浮標表面の質点に複数の 3D フローが対応付けられた場合は、Fig.3-5 の(b)から(c)に示すように、その合成ベクトルが仮想外力の方向となる．最終的に質点 i に作用する仮想外力 \mathbf{F}_i^{3DF} は次式で表される．

$$\mathbf{F}_i^{3DF} = \beta \sum_q \mathbf{M}_q^{3DF} \quad (3-3)$$

ただし、 \mathbf{M}^{3DF} は質点 i に対応付けられた 3D フロー、 q は質点 i に対応付けられた 3D フローのインデックス、 β は 3D フローの仮想外力への変換係数である． β は検出された 3D フロー数に反比例する値、つまり検出 3D フロー数 N^{3DF} が少ないほど大きくなる可変値とする．これによって、撮像条件の変化等で安定して 3D フローが検出されない場合や、対象物体が小さく、3D フローの検出数が少ない場合も仮想外力がスケーリングされ、安定して仮想外力を作用させることができる．

以上①～⑤の処理により、撮像状態に影響されず、3D フローが仮想浮標の質点に仮想外力としてマッピングされる．

Table 3-1 Parameter configuration

item	symbol		value
Range image processing	L	side length of cubic region	0.5
		max. number of 3D-Flow points	32×32 points =1024
Virtual buoy (Spring network model)		number of mass points	163
		number of springs	642
	R_{buoy}	radius of buoy	0.13
		mass (surface mass point)	0.20
		mass (center mass point)	1.5
	k	spring constant number	3.0×10^4
	K_d	damping constant number	30
Assigning 3D-Flow to Virtual buoy	α	scaling number	1.5
	β	conversion number	20~50
Simulation	C_d	viscosity number	0.20
	τ	cycle time	1.0×10^{-3}
	I	iteration count	20

3.4.4 仮想浮標の運動表出

仮想浮標の表面質点*i*に働く力 F_i は、質点に接続されているバネ・ダンパのバネ力とダンパ力、粘性項、及びマッピングされた仮想外力=3D フローの総和からなる。

$$F_i = \sum_j \{k(l_{ij} - l_{ij}^0) - K_d(v_i - v_j)\}e_{ij} - C_d v_i + F_i^{3DF} \quad (3-4)$$

ここで、 k はバネ定数、 l_{ij} は質点*i*と隣接する質点群*j*間のバネ長、 l_{ij}^0 は自然長、 K_d は減衰定数(ダンパ)、 v_i と v_j は質点の速度、 e_{ij} は質点*i*から*j*への単位ベクトル、 C_d は仮想空間の粘性係数である。粘性項は運動方程式を解くときの数値的な不安定性の抑制のために付加した[43]。

式 3-4 をニュートンの運動方程式に代入し、数値積分を用いて各質点の変位を求める。このとき、微小刻み時間を τ とし、イタレーション回数*I*によって1フレーム間における終了条件を設定する。

以上の処理によって、仮想浮標が「流れ場」によって平行移動・回転する。この運動は、検出位置と方向が三次元的に分布する 3D フロー群を統合した結果である。

3.4.5 パラメータ設定

以上で使用する仮想浮標、及び仮想浮標の運動表出のためのシミュレーションに係るパラメータを Table3-1 にまとめる。Fig.3-1(b)のクリッピング立方体(1辺 $L=0.50$ m)で、XY投影面上で最大 32×32 点の 3D フローを入力とした。仮想浮標が 3D フローに追従運動し、かつ球形状を維持できるようにパラメータを設定した。具体的には、計算機内

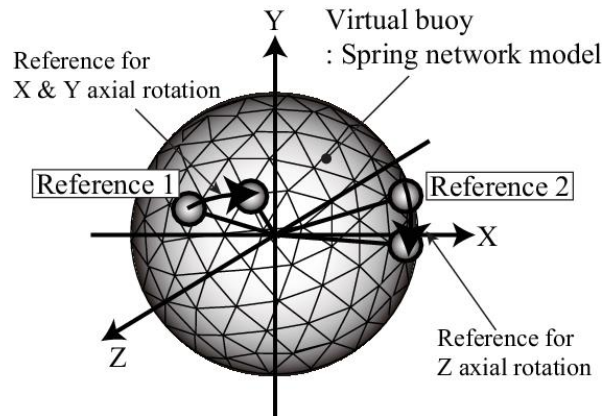


Fig.3-6 Motion detection

で対象物体の CG モデルを作成し、それをアニメーションさせたときの正解 3D フローを仮想浮標に付与し、対象物体の運動に仮想浮標が安定(簡易物理シミュレーションにおける数値計算の不安定性を回避できるように)して追従するように各パラメータを調整した。1 フレーム間におけるイタレーション回数 I は、仮想浮標の各質点の変位が安定する回数とする。仮想浮標と対象物体の運動の同期をとるには、特に仮想浮標の中心質点の質量と、3D フローの対応付けにおける変換係数 β の下限値と上限値を調整する。なお CG モデルによる実験については「3.5 シミュレーション実験」に後述する。

前述の通り、仮想浮標の運動シミュレーションは実空間における物体の運動を変形等も含めて物理的にシミュレートしている訳ではない。従って、簡易物理シミュレーションにおけるパラメータを対象の材料的性質に合わせて調整する必要はない。仮想浮標は単に 3D フローに基づいて運動しており、かつ 3D フローの分布範囲と検出本数はスケールリングされて球状の浮標にマッピングされるので、3D フローが検出できていれば任意形状の物体に適用できる。

3.4.6 仮想浮標の運動検出による実物体の運動推定

仮想浮標の運動をモニタすることにより、実物体の運動を推定する。推定はフレーム間で行い、Fig.3-1(b)に示したワールド座標系に対する各軸方向の移動と、浮標の重心を原点に固定した場合の各軸回りの回転を推定する。回転運動は回転軸・回転半径の推定が必要であるが、本研究では対象物体の重心回りの回転を検出することになる。これは、回転半径が大きい場合は微小時間における運動は平行移動の組み合わせで表現されるためである。物体の重心回りの回転は物体の向きの変化を表す。

Fig.3-6 を用いて仮想浮標の運動検出について説明する。仮想浮標の重心をワールド座標系に置いた場合のフレーム間での各軸に対する回転運動の検出には、Reference 1 と 2 の基準質点の動きをモニタする。Reference 1 はあるフレームにおいて Z 座標が最

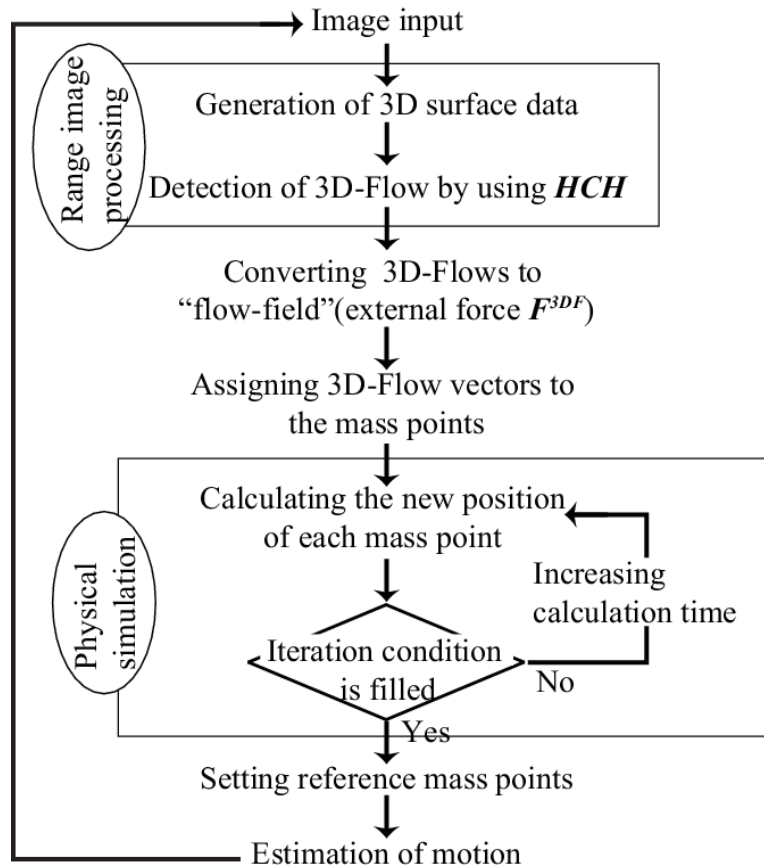


Fig.3-7 Processing Flow

大の質点, Reference2 は X 座標が最大の質点である. X 軸および Y 軸回りの回転検出には Reference1 の各軸振れ角を, Z 軸回りの回転検出には Reference2 の振れ角を検出する. ただし, フレーム間において基準質点の変動する場合は, 振れ角を計算する間は同一の質点を基準とし, 計算後に基準質点を更新する. 平行移動の検出には仮想浮標の中心質点を基準質点として, そのフレーム間での変位を求める. 以上の処理により, フレーム間における仮想浮標の運動が検出され, それを通して実物体の運動が推定される.

3.4.7 処理の流れ

Fig.3-7 に全体の処理の流れを示す. 処理は大きく 4 段階に分かれる. まず, 距離画像から HCH 特徴量を用いて 3D フローを検出する. 次に, 検出された 3D フローを仮想浮標に付与する「流れ場」に変換する. 次に, バネネットワークモデルによる運動シミュレーションを行う. 最後に仮想浮標の運動を検出し, 実物体の運動を推定する. 以上の処理を繰り返す.

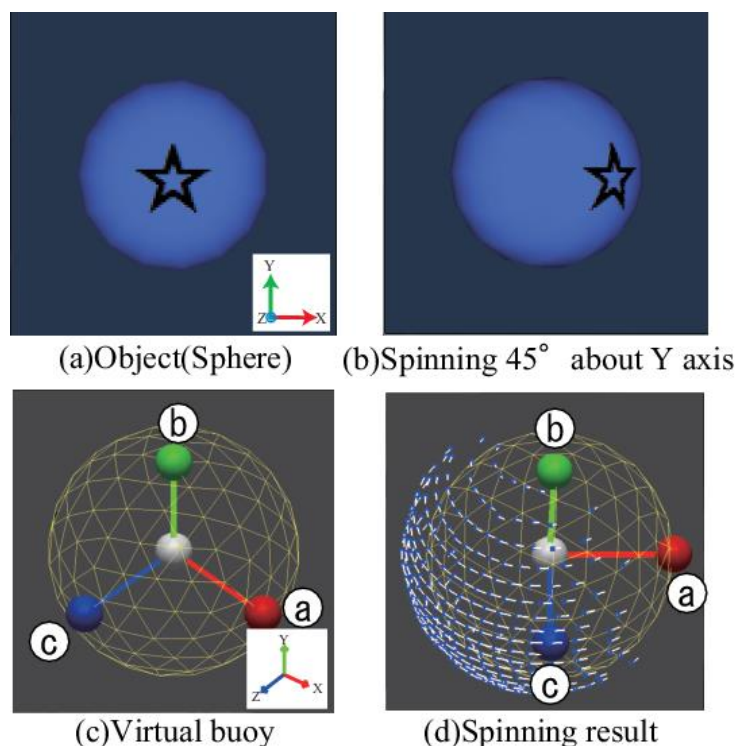


Fig.3-8 Simulation: Motion estimation by using correct 3D-Flow

3.5 シミュレーション実験

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーション実験を行った。実験では、運動検出の対象となる物体も計算機内で作成し、それをアニメーションさせたときの運動を、仮想浮標を用いて検出した。

3.5.1 3D フローの検出誤差の影響

Fig.3-8 に球体の運動を検出した例を示す。Fig.3-8(a)から(b)の状態へ Y 軸回りに 5° ずつ 45° まで回転させた場合の運動を検出した。回転運動が分かるように、物体には星マークをテクスチャマッピングした。Fig.3-8(c)と(d)はそれぞれ(a)と(b)の状態の時の仮想浮標である。なお、(c)と(d)では仮想浮標の三次元での運動が分かるように、カメラ視点ではなく斜め上からの視点で描画している。また、回転運動が推定できていることが分かるように、仮想浮標のローカル座標軸(a,b,c)を描画した。(d)中の線分群は最後の回転における 3D フローである。この 3D フローはアニメーションの際の座標変換行列を基に計算した正解値である。(d)中のローカル座標軸(a,b,c)の動きから、球体の運動と同様に仮想浮標も 45° 程度回転していることが分かる。実際の推定値は 44.98° であった。

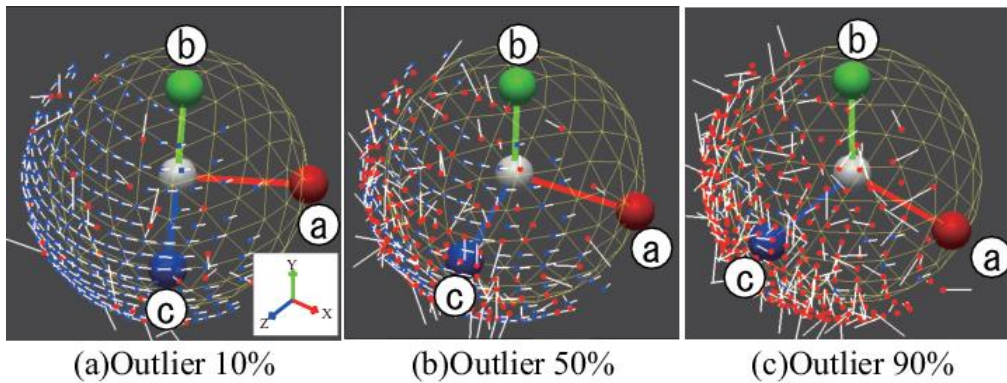


Fig.3-9 Effect of outlier

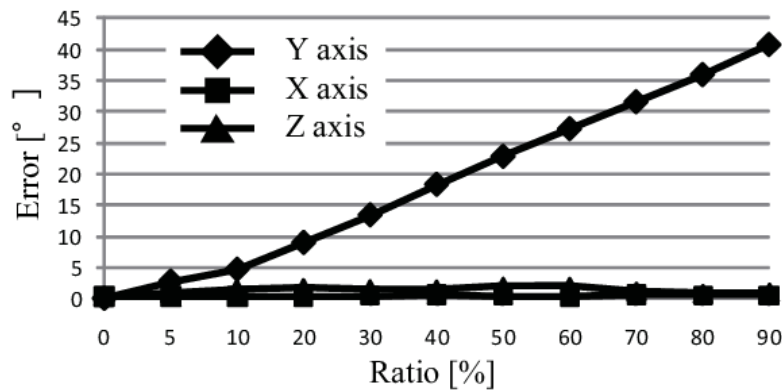


Fig.3-10 Effect of outlier

正しく検出された 3D フローによる実験を基準に、以下では 3D フロー群に誤差やアウトライアが含まれている場合の仮想浮標の挙動について調べる。

Fig.3-9 は、Fig.3-8 と同様に球体をアニメーションさせた時の仮想浮標の最終状態を表している。ただし、用いる 3D フローを任意の割合でランダムに選択し、アウトライアに変換した。またアウトライアは、フロー長=0.00~0.05m、方向=全方向でランダムに発生させた。本実験では正解フローの最大長が約 0.01m であることから、十分にアウトライアであるといえる。(a), (b), (c)それぞれ、含まれるアウトライアの割合が 10%, 50%, 90%の結果である。Fig.3-8(b)の正しい 3D フローによる結果と比較すると、アウトライアが 10%含まれる場合でも、概ね 45°の回転を検出できていることが分かる。また、アウトライアが 50%含まれる場合も、仮想浮標は元の球体の回転に追従している。Fig.3-10 は、含まれるアウトライアの割合を 0~90%まで変化させた場合の各軸の推定結果の誤差の絶対値(Y は 45°, X 及び Z は 0°との差)である。なお、1 プロットは試行 10 回の平均値である。当然、アウトライアの割合が大きくなると表出される仮想浮標の回転量が減少するが、X 軸、Z 軸周りには僅かしか回転していない。

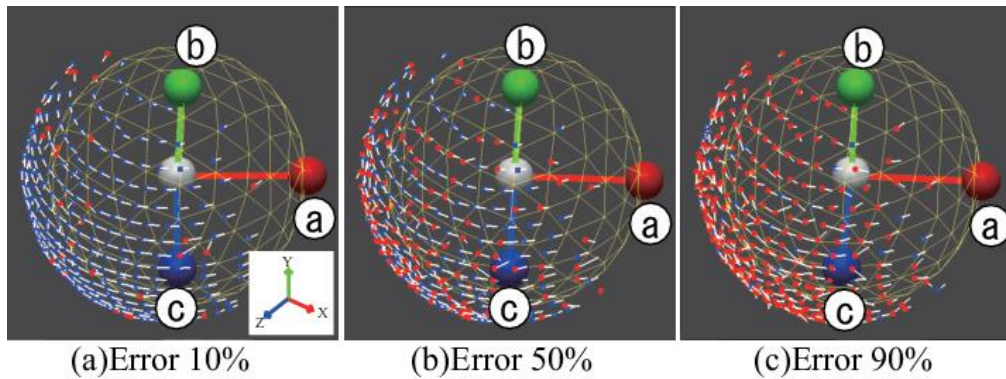


Fig.3-11 Effect of some error

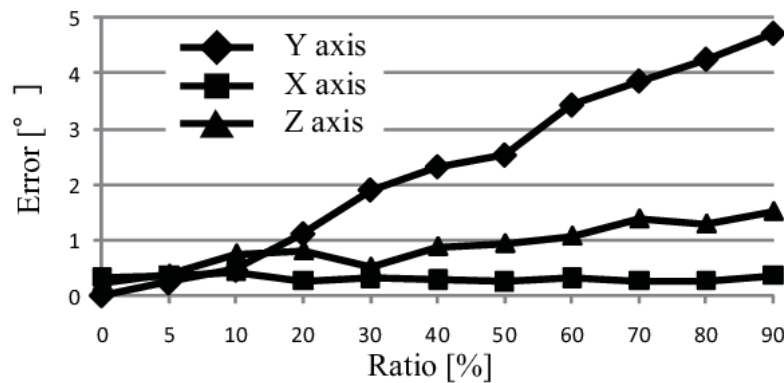


Fig.3-12 Effect of some error

次にアウトライアに変換する代わりに、ランダムに選択した 3D フローに誤差を加えた実験結果の例を Fig.3-11 に示す. なお, 正解フロー長を最大として正解フローの終点位置をランダムな方向にずらすことで誤差を与えた. つまり選択された 3D フローは, 長さが最大で 2 倍, 方向が最大で 45° ずれる. [41]の実験例では, HCH 特徴量を用いて検出された 3D フローの方向誤差が約 14° とあり, ここで与えた誤差は十分に大きい. Fig.3-8(b)の正しい 3D フローによる結果と比較すると, 誤差を含む 3D フローを用いても大域的な回転運動は推定できていることが分かる. また Fig.3-10 と同様に, 誤差を加えた 3D フローの割合に対する各軸の回転誤差を Fig.3-12 に示す. 図よりこの実験では, 誤差を含む 3D フローの割合が 20%程度あっても, 回転量の誤差は 2%程度(45° に対して約 1°)であることが分かる.

以上のシミュレーション実験より, 提案する仮想浮標はマッピングされる 3D フローの誤差やアウトライアの影響を受けにくい特長を持つことが分かる. これは, 仮想浮標の質点に近傍の 3D フローが合力としてマッピングされること, 及びバネネットワークを介してその合力が互いに影響して浮標全体の運動が表出することから, 誤差やアウトライアが相殺されるためである. また, 加えたアウトライアや誤差を元の物体が

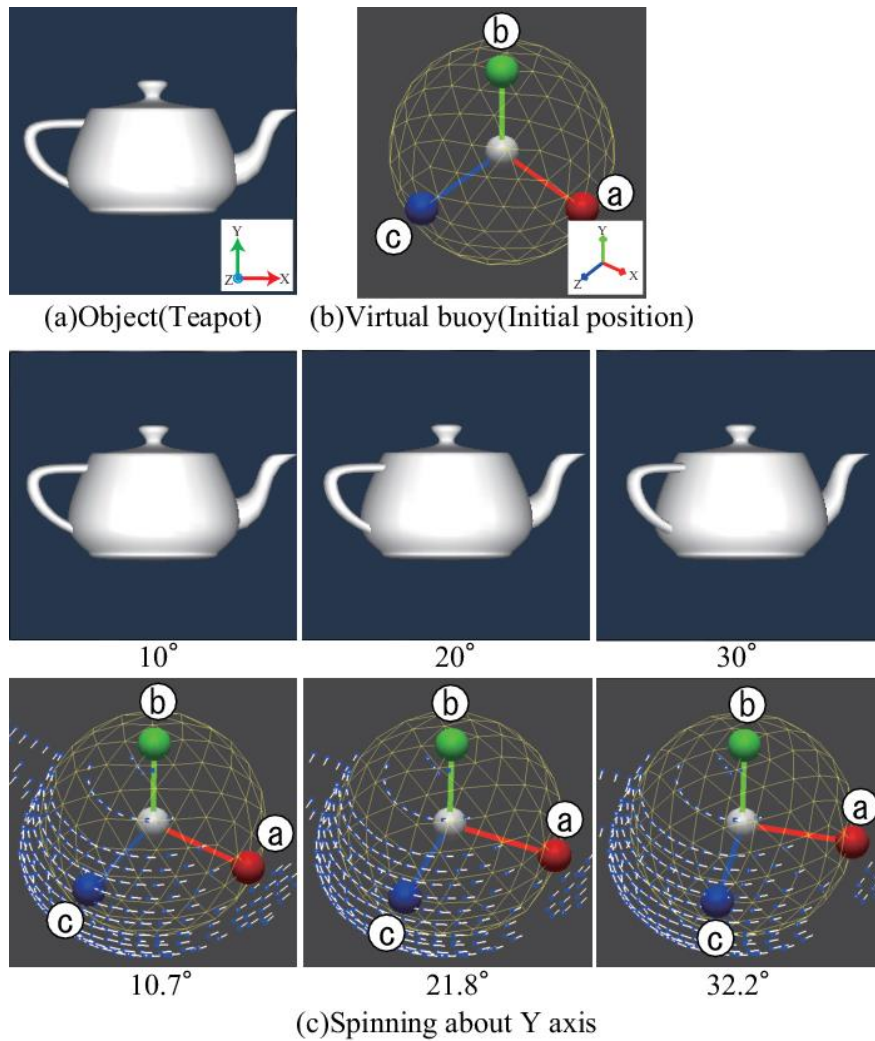


Fig.3-13 Simulation: Teapot

非剛体であるが故の局所変形であったと仮定すれば、そうであっても物体全体の大域的運動が推定できると考えられる。

3.5.2 対象形状の影響

Fig.3-13 にティーポットの運動を検出した例を示す。先の球体を用いた実験と同様に Y 軸回りに 5° ずつ 30° まで回転させた場合の運動を検出した。(a), (b) がそれぞれティーポットと仮想浮標の初期姿勢、(c) が運動の様子である。(c) 中の角度表示はそれぞれの状態における正解回転量と推定回転量である。また、物体を円柱にした場合の結果例を Fig.3-14 に示す。対象が球形でない場合は、回転方向によっては、偶力として

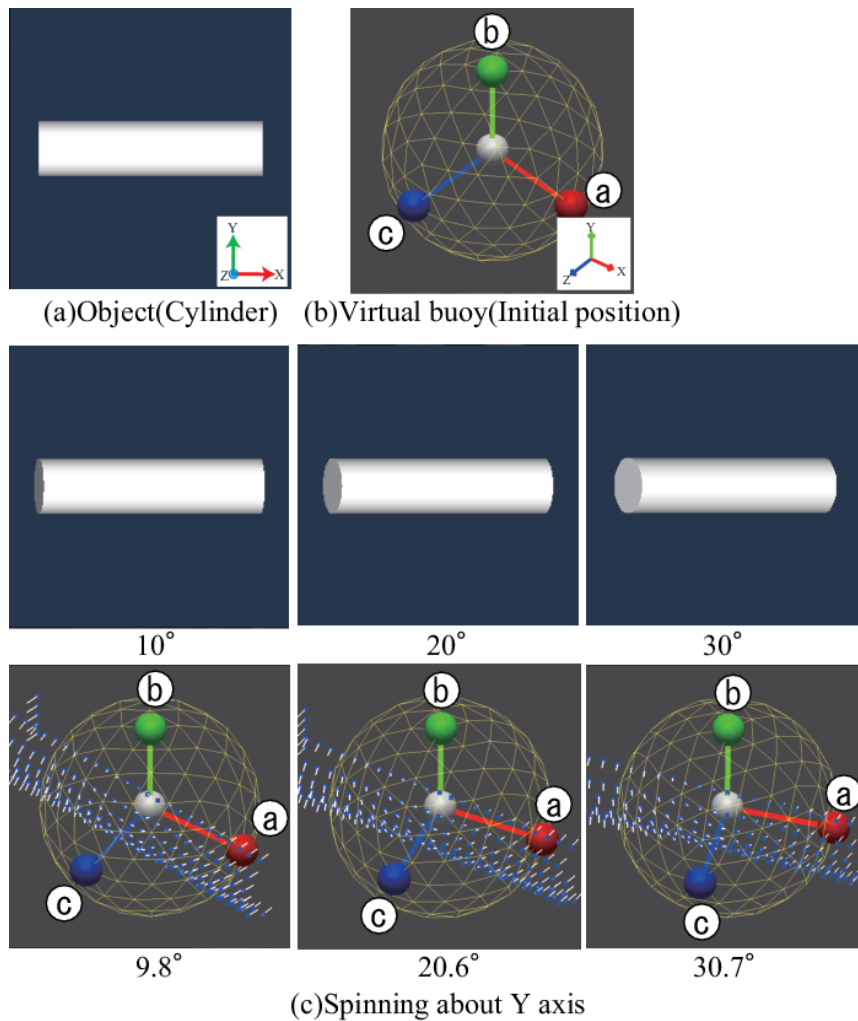


Fig.3-14 Simulation: Cylinder

マッピングされる 3D フローのバランスが崩れるため、推定した回転量に誤差が生じる。しかし、回転方向の追従性は高い。

3.6 実画像を用いた実験と考察

Fig.3-1 の実験装置を用いて、実画像を用いた実験を行った。実画像を用いた実験では、対象の移動量や回転量を定量評価することが困難であるため、物体の大域的な運動の可視化方法として「Motion chart」を導入した。

3.6.1 平行移動運動の推定

Fig.3-15 にクマのぬいぐるみ(体長約 30cm)の運動を推定した例を示す。Fig.3-15(a)

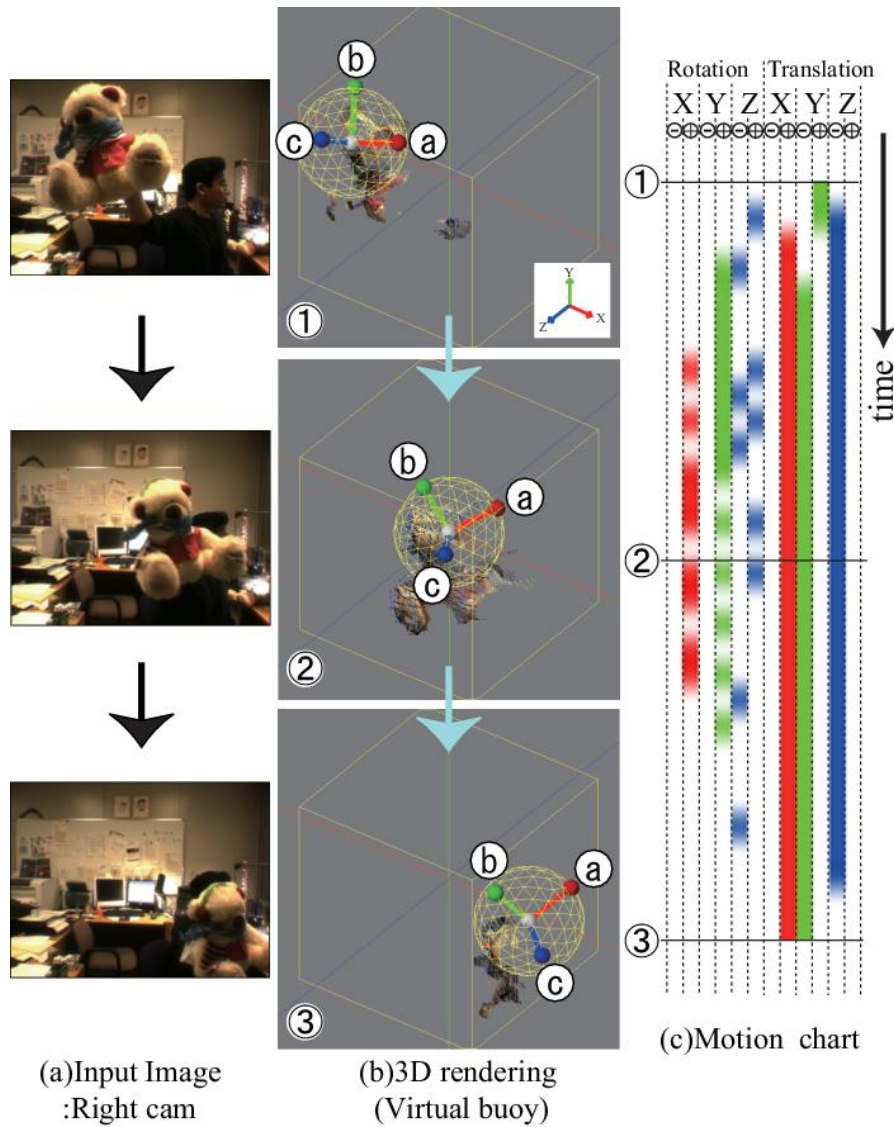


Fig.3-15 Motion estimation result 1

がステレオカメラの右カメラ画像，(b)は計算結果のCG描画，(c)が運動推定のタイミングチャート=Motion chartである。Fig.3-15(b)では，対象物体をポイントベースでレンダリングし，求めた3Dフローと仮想浮標を合わせて描画している。三次元計測できていることが分かるように，カメラ視点ではなく斜め上からの視点で描画している。また，回転運動が推定できていることが分かるように，仮想浮標のローカル座標軸(a,b,c)を描画した。なお，Fig.3-15の画像1から画像3にかけて45フレーム分のデータである。この例では，クマのぬいぐるみを向って左斜め手前上から，右斜め奥下に向けて移動させた。つまり，Fig.3-1(b)に示したクリッピング立方体の対角線上を移動させた。Fig.3-15(b)より仮想浮標がクマのぬいぐるみの運動に同期して移動していることが分かる。Fig.3-15(c)のMotion chartはワールド座標系X, Y, Zの各軸に対して，平行移動

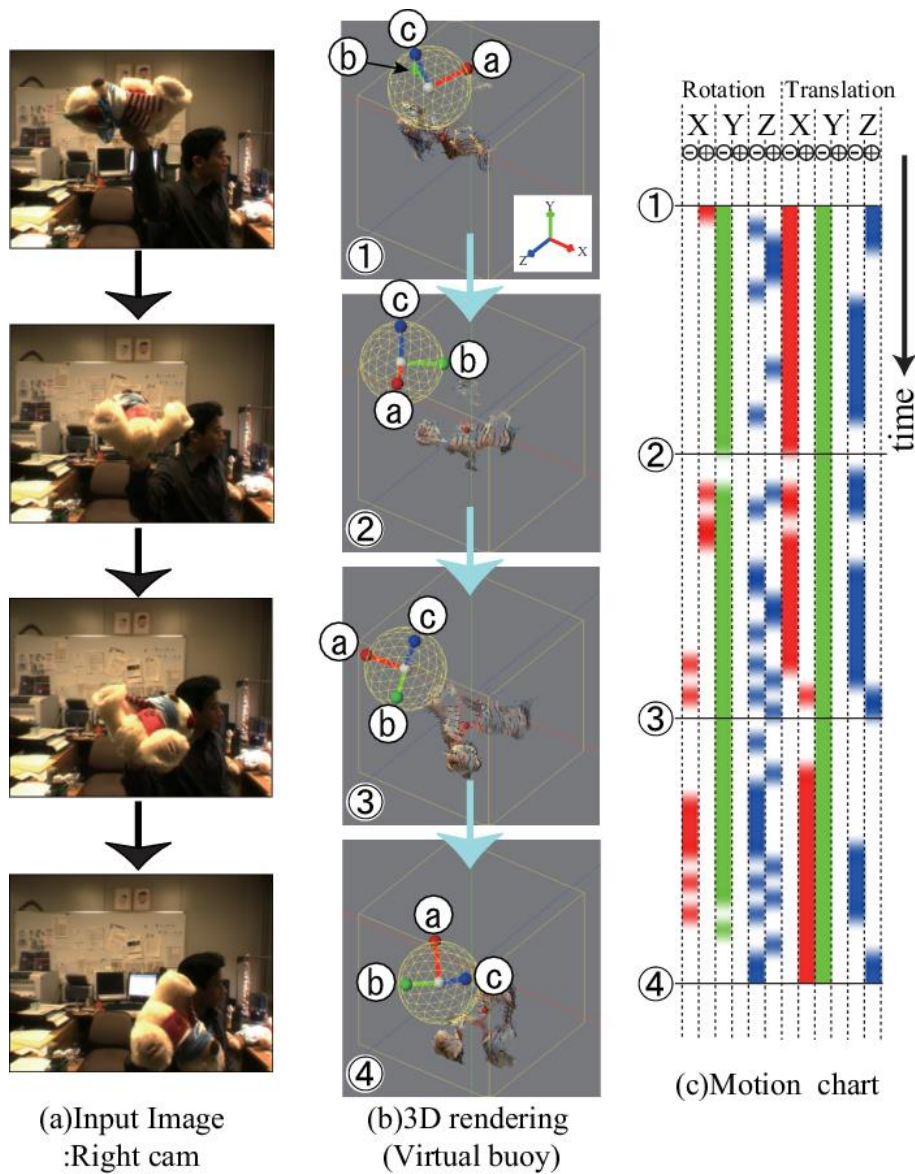


Fig.3-16 Motion estimation result 2

及び回転の検出タイミングを表している。例えば、Rotation の $\oplus X$ の出力は、対象物体が X 軸回りに正回転していることを表す。さらに、同時に複数の出力がある期間は、それらが複合された運動をしていることを示す。したがって、Fig.3-15(c)では Translation の $\oplus X$, $\ominus Y$, $\ominus Z$ に同時に出力があり、すなわちクリッピング立方体の対角線上を移動していることが分る。最初のフレームから最後のフレームにかけて各軸の移動量の積算値は X 軸正方向に 41.20cm, Y 軸負方向に 36.54cm, Z 軸負方向に 45.12cm であった。クリッピング立方体の一辺の長さは 50cm である。各軸で 5~15cm 程 50cm に足りないが、ぬいぐるみの体長:約 30cm, 幅:約 20cm 分を差し引くと、概ね正確な移動量が推定できていると考えられる。

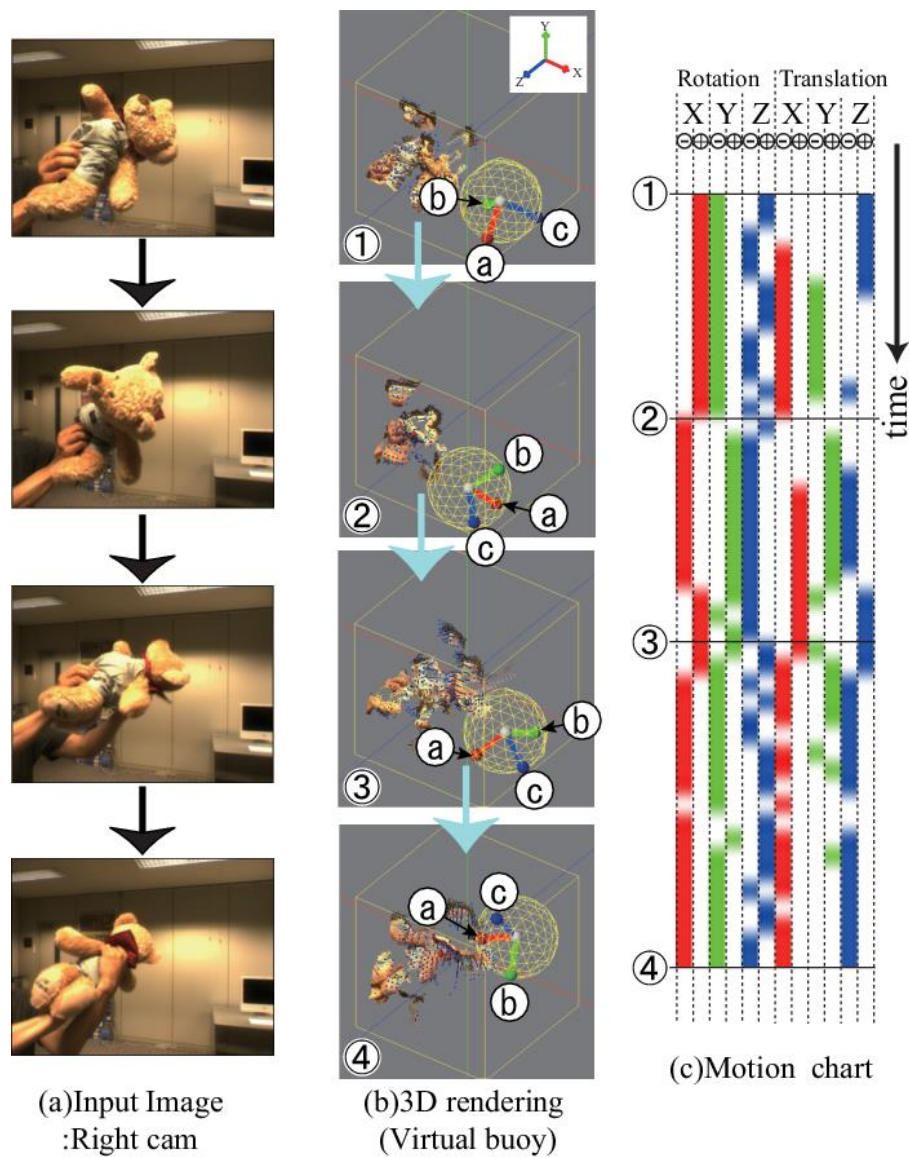


Fig.3-17 Motion estimation result 3

3.6.2 回転運動の推定

Fig.3-16 に Fig.3-15 と同じクマのぬいぐるみの運動を推定した例を示す. 図中の(a), (b), (c)は Fig.3-15 と同様であり, 画像 1 から 4 にかけて 75 フレーム分のデータである. この例では, クマのぬいぐるみを回転させながら下降させた. Fig.3-16(c)の Motion chart では主に Rotation の $\ominus Y$ と Translation の $\ominus Y$ に同時に継続的に出力があり, Y 軸反時計回りに回転しつつ下降していく運動が推定できている. Fig.3-16(b)の仮想浮標もローカル座標軸(a,b,c)の動きから, ぬいぐるみの運動に同期して運動していることが分かる. ただし, 表示している 3D フローは仮想浮標にマッピング以前の状態であるため, フロー群と仮想浮標の位置はずれている. 画像 1 から 2 にかけての Y 軸周りの回

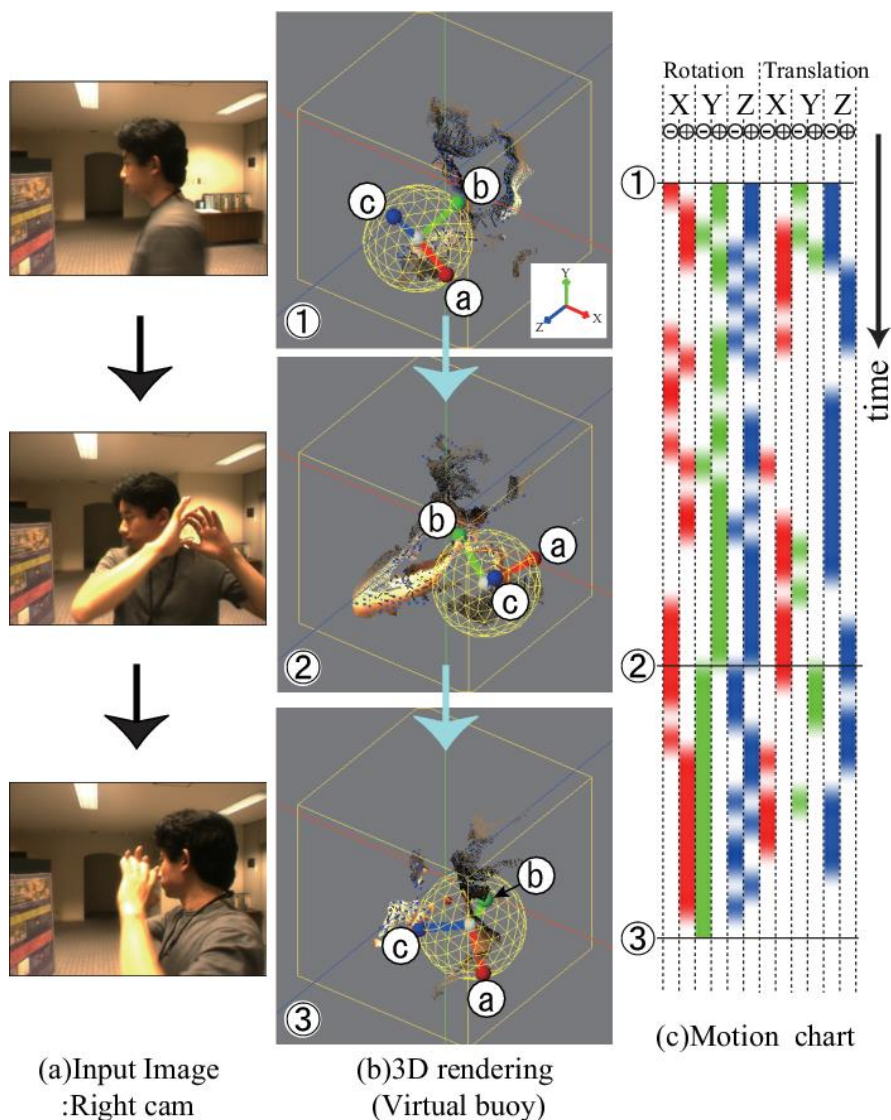


Fig.3-18 Motion estimation result 4

転量の積算値は 94.45° であった. 図より概ね正確な回転量が推定できていることが分かる.

3.6.3 変形を伴う運動の推定

Fig.3-17 に別のクマのぬいぐるみ(体長約 40cm)の運動を推定した例を示す. この例ではぬいぐるみを捻って変形させつつ運動させた. なお, 画像 1 から 4 にかけて 88 フレーム分のデータである. Fig.3-17(a)より, 画像 1 から 2 にかけてはぬいぐるみの上半身を手前に捻りつつ X 軸回り正方向, Y 軸回り負方向に回転, 2 から 3 にかけてはその逆, 3 から 4 にかけてはさらに奥方向に捻りつつ回転させている. Fig.3-17(c)の Motion chart における出力の組み合わせは, この一連の運動に対応している. 画像間において

ぬいぐるみの形状は大きく変形しているが、全体としての大域的な運動が推定できていることが分かる。

Fig.3-18 に人物の上半身の運動を推定した例を示す。画像 1 から 3 にかけて 73 フレーム分のデータである。画像 1 から 2 にかけて、腕を組みかえながら正面方向に体を捻り、2 から 3 にかけて元にもどっている。従って、Fig.5-18(c)では、1 から 2 で Rotation の $\oplus Y$ 、2 から 3 で $\ominus Y$ に出力がある。

以上のように、対象の非剛体物体が運動中に変形を伴っても、全体としての運動を推定することが可能である。

3.6.4 検出速度と精度

以上の実験において、検出速度は約 7Hz であった(CPU: Intel(R)Core2Duo)。これには前処理から結果の 3DCG 描画、Motion chart の出力までが含まれる。精度については、フレーム毎での誤差が蓄積するため、単純に積算した移動量・回転量の信頼性は計測開始から時間が経過するほど落ちる。従って、アプリケーションによっては何らかの後処理を追加する必要がある。例えば、対象物体が予め特定でき、かつ物体上に相対位置が変化しない複数の特徴点が存在する場合は、仮想浮標による推定結果を初期位置とし、特徴点による位置決めによって誤差を軽減する等が考えられる。ただし提案手法によれば、Fig.3-15(c)~Fig.3-18(c)の Motion chart のように、複数フレーム間における任意の対象物体の継続的な運動を推定することができる。

提案手法は運動の量的精度には問題が残るが、運動検出の追従性は高い。最初に列挙した本研究における課題に関しては、一定の成果があったと考える。

3.7 まとめ

本章では単視点距離画像から求められた 3D フローを「流れ場」に見立て、それによる仮想浮標の運動を介して実物体の運動を推定する手法を提案した。提案手法によれば、自由曲面を有する任意の剛体・非剛体物体の大域的な運動を準リアルタイムで検出することが可能であった。特に、単視点における比較的画質の低い 3D フローを入力とした場合でも任意物体の大域的な運動を安定して推定できることは、様々なシステムへの運動推定機能の搭載を可能とする。

第4章

単眼単視点による三次元画像計測の応用

4.1 概要

前章までで、単眼単視点の環境下で撮像された画像から三次元再構成及び運動計測を実現する手法を提案した。本章では単眼単視点という強い制約下において実現される画像計測が、応用システムにおいていかに有効であるかについて、前章までの提案手法の有効性検証も含めてまとめる。

4.2 背景(前景)分離

距離画像を画像処理に用いるメリットとして第一に挙げられるのは、前景と背景の分離を容易にすることである。本研究で提案する手法によって推定される合焦度分布は、画像の合焦距離からの相対的な三次元情報を示すため、この情報を利用した画像のセグメンテーションが可能となる。また、提案手法は入力画像以外になんら既知情報を必要としないため、撮像系が不明な画像においても適用できる。Fig.4-1 に入力画像と、その前景領域の抽出結果を示す。この処理は、まず提案手法によって入力画像中から合焦度分布を推定し、単純なしきい値処理によって一定値以上の合焦度をもつ領域を抽出する。次に、抽出した領域に膨張処理を施すことで前景領域を抽出した例である。

既存の二次元カメラによる単視点システム(監視カメラや市販のデジタルカメラでの記念撮影等)においては、そのカメラの光学系情報に基づき提案手法による合焦度分布を実距離に換算することも可能である。このことは Fig4-1 の例と合わせて、既知情報を用いないという制約において提案された第2章での手法の有効性を示す。加えて、第3章における三次元運動推定手法の検討においては市販のステレオカメラを用いたが、本論文で主張する単眼単視点での三次元画像計測が、第3章での画像入力手法として本質的に適用できることを示す。

4.3 裸眼立体視

立体視とは、二次元の画像情報に奥行情報を付加した近くのことを指す。第1章で述

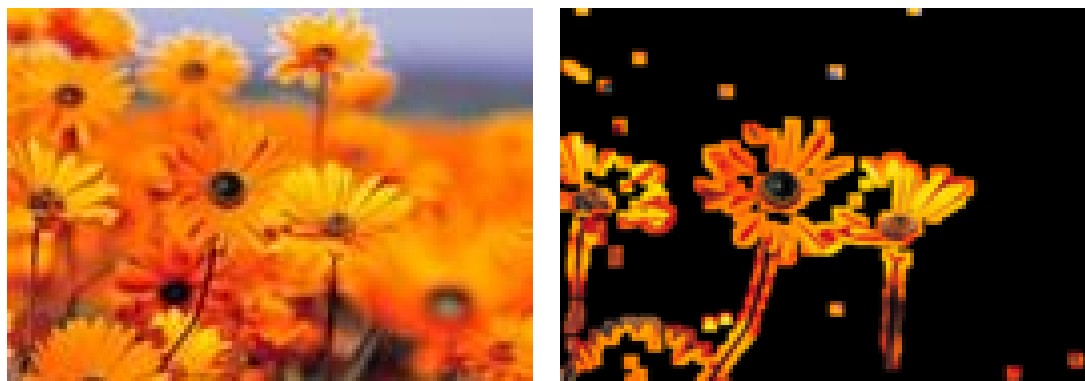


Fig.4-1 入力画像と前景領域抽出結果

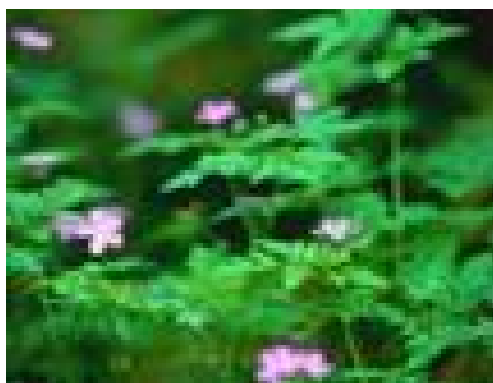


Fig.4-2 裸眼立体視処理の入力画像

べた通り，近年計測された三次元情報を用いて，通常の二次元の画像・映像に奥行き感を付加したコンテンツが広く普及してきた．このようなコンテンツで採用される立体視法は主に，左右の視覚にそれぞれ対応した視差画像を投影することで両眼視差の原理を用いて奥行き感を付加する方式が採用されている．また，視差画像の提示の方式として，左右の視覚に別々の視差画像を投影する仕組みをもった装置を装着するステレオスコープ方式や，画面に特殊な加工を施すことで，視点位置によって異なる視差画像を結像させる裸眼立体視方式などが採用されている．本研究では，両眼視差とは異なり，運動視差に基づく原理で裸眼立体視を行う手法を採用した．Fig.4-2に入力画像を，Fig.4-3に奥行き感を付加する為の動画像のフレームの一部を示す．また，いくつかの画像について裸眼立体視を行った動画を青木研究室 HP(<http://www.cvslab.jp>)で紹介する．この処理は，まず提案手法によって入力画像中から合焦度分布を推定し，合焦度分布に基づき生成した3DCG生成する．次に，視線方向を3DCGの中心に向け，視点座標が正方形を描くように視線角度を変化させて3DCGを描画した．このとき，水平垂直方向の回転角度は -4.0° ～ 4.0° であり，各辺のサンプリング数を10とした40フレームの動画像を生成した．動画像のビデオレートは30Fpsとした．

ここで示した裸眼立体視は，例えば市販のデジタルカメラやカメラ搭載の携帯端末の

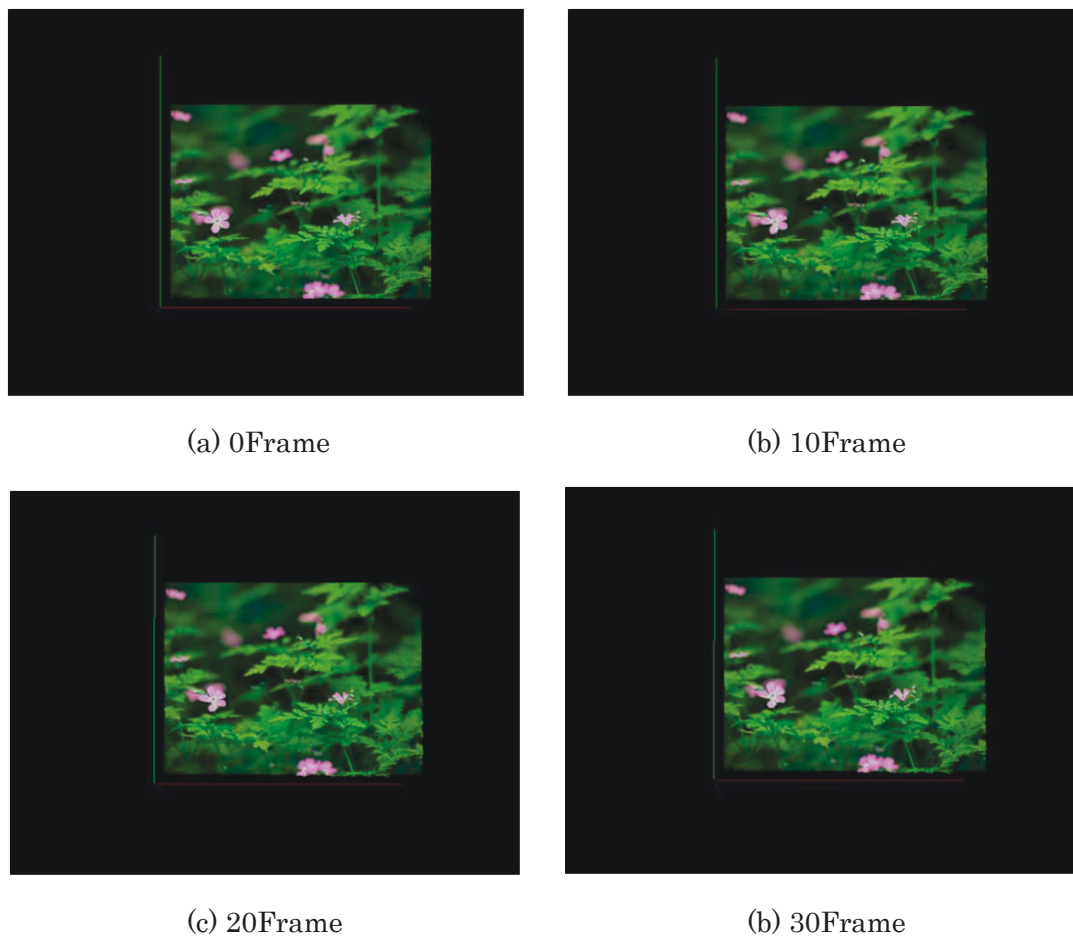


Fig.4-3 奥行き感を付加する為の動画像のフレームの一部

アプリケーションとすることが考えられる．ここで重要なことは，裸眼立体視の手がかりとなる三次元情報について，第 2 章での提案手法によれば既知情報を必要とせず入力静止画像 1 枚から推定できることである．つまり，あらゆる画像入力デバイスに対して汎用的に適用できる．このことは，本研究で主張する単眼単視点による三次元画像計測の有用性を示す．

4.4 三次元運動推定の応用

第 3 章において提案した仮想浮標による三次元運動推定手法によれば，単眼単視点カメラ前の任意物体の三次元運動をリアルタイムで推定することが可能である．アプリケーションの一例として，クマのぬいぐるみの運動によってクマの CG キャラクタを操作したデモンストレーションを Fig.4-4 に示す．クマのぬいぐるみの代わりに，人物の頭部の運動への同期や，手振りでの操作も可能である．Fig.4-5 に示す例では，推定した両手の運動によって，画面内の三次元 CG の向きや位置を操作している．このように，

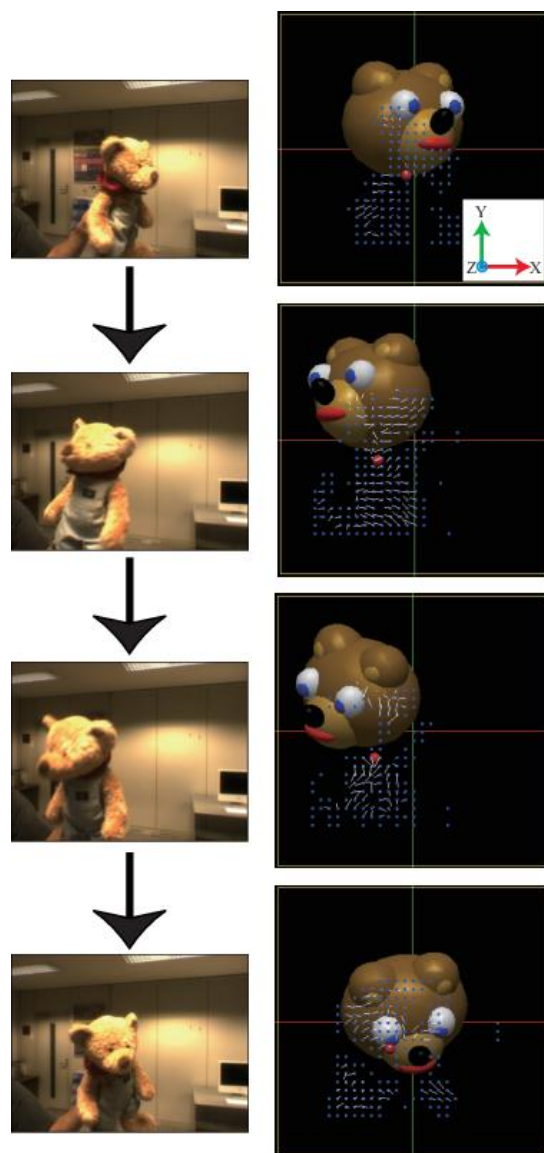


Fig.4-4 CG Puppet

三次元操作インターフェイスとしての応用も可能である。

3D フローの応用として、ロボットビジョンにおける3次元運動の検出がある。ロボットが自律的に動作するためには、例えば人間等の移動する対象の回避・追従・動作の認識が必要である。三次元シーンフローを用いて障害物を回避する研究[40]が行われている。これに対して提案手法によれば、Fig.4-4 に示したデモンストレーションより、ロボットは人間の「うなずき」や「首ふり」のジェスチャを認識できる。また、特に顔認識に限定した手法ではないため、ロボットはあらゆる対象の運動を認識できる可能性がある。さらに、第3章で示した Motion chart は複雑な運動のパターンを示しており、これを利用することにより、ロボットはより複雑かつ時系列的な運動パターンを認識できる可能性がある。

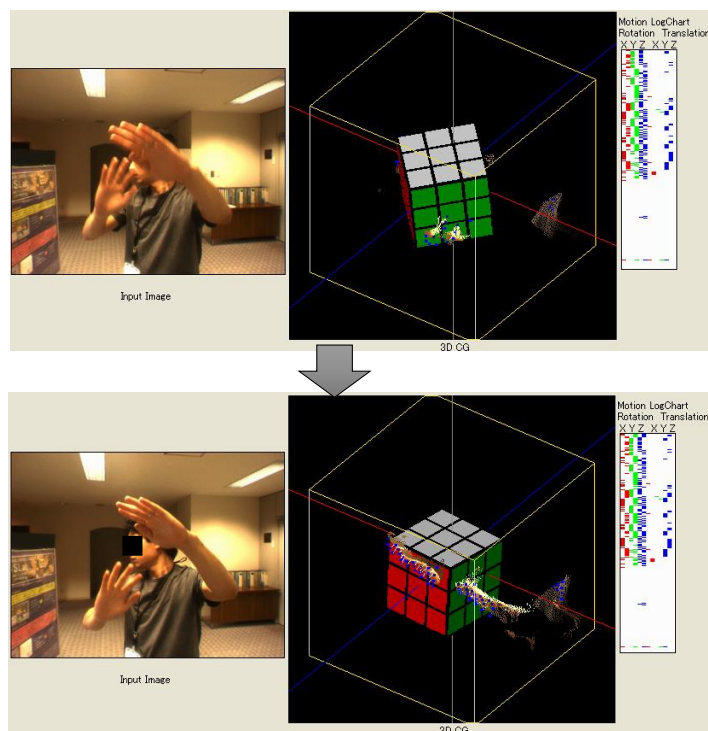


Fig.4-5: 運動推定による三次元 CG 操作インターフェイス

モーションキャプチャへの応用も考えられる。モーションキャプチャとは、人物・物体の動きを三次元計測する技術である。近年では、CG キャラクタの動作付けや舞踏などの保存、運動選手の技術向上、ロボット教示などに幅広く用いられている[46]-[48]。一般的な光学式モーションキャプチャでは、多数のマーカを被計測者に装着することにより詳細なデータを得る。しかしながら、被計測者に装着するマーカは少ないほど、物理的・心理的に運動が制限されない自然な動作の検出が可能である。提案手法を応用することにより、普段着のままでもマーカも用いずに動作計測が可能となる可能性がある。

さらに、店内やエレベータなどの監視カメラ画像を用いた不審者の自動検出への応用も考えられる。時系列画像における時空間の局所的な画像特徴を用いたり、オプティカルフローから得られる統計的データから不審な(つまり通常とは異なる)運動を検出する手法[49][50]が提案されている。これに対しても、第3章で示した Motion chart は運動パターンを示しており、不審行動検出に応用できると考えられる。

提案手法は 3D フローが検出できれば適用できる。応用目的によっては対象が限定できるため、それ固有の特徴を利用する手法も考えられるが、提案手法をベースとすることにより開発期間の短縮が見込める。また、やはり単眼単視点からの三次元計測という制約下において実現した本手法は、前述の通り既存のカメラシステムへの導入が容易であるメリットを有する。

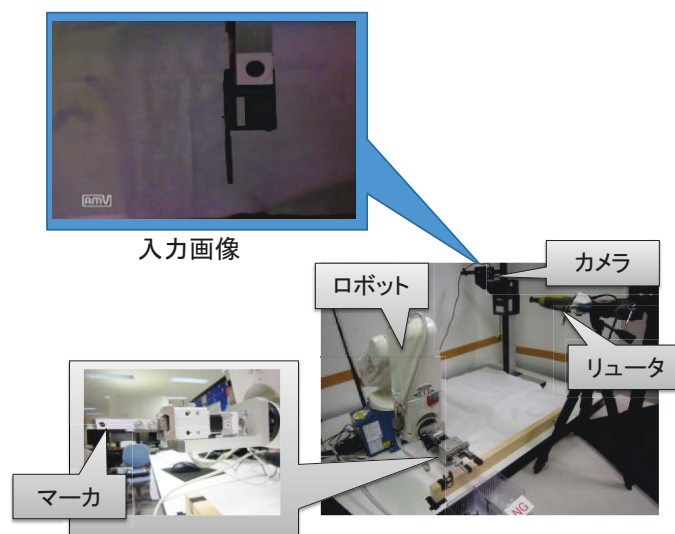


Fig.4-6 人代替バリ取りロボット試作機

4.5 単眼単視点計測の産業応用(微小バリ計測) [51][52]

ものづくりの現場において、ワークの検査や位置決め、ロボット制御等の目的において画像処理技術が活用される場面が益々拡大している。その流れの中で、既存ラインの構造や画像装置設置の空間的制約、さらには導入費用の問題から、産業現場での画像装置においても、その要求使用を満たす限りは、当然単眼単視点計測が望まれる。それに対して本研究では、経済産業省管轄の戦略的基盤技術高度化支援事業の採択テーマである「人代替バリ取りロボットの開発」[53]において、そのビジョン要素技術を担った。

Fig.4-6 に本プロジェクトにおける人代替バリ取りロボットの試作機を示す。単眼単視点カメラの直下に、ロボット制御によって樹脂部品を移動して空中で撮像する。このプロジェクトでは、長さが 1mm 未満の樹脂部品の突起状バリが計測対象であった。Fig.4-7 に対象とした樹脂部品の例を示す。計測した残存バリ長さに基づき、リユータ(研磨機械)によってバリを除去し、再度撮像・確認後、払い出す。Fig.4-8 にバリ除去までの一連の計測画像・画像処理の例を示す。「人代替」のテーマタイトルが示す通り、全体のシステムは現状の人作業員のスペースに設置可能であること、工場でのメンテナンス性とコスト面を考慮して撮像デバイスがカメラ 1 台であることの要求仕様があった。これに対して、本研究で提案する単眼単視点画像計測を適用することで解決した。ただしこのシステムでは、計測対象である樹脂部品を把持する産業用ロボットのハンド先端に円形マーカを張り付けることで要求精度を達成した。つまり、本論文で主張し、第2章で提案したシーンに既知情報を加えないこととは一見矛盾するが、最大限の制約の元提案された本研究での提案手法に、簡単な工夫を導入することで様々な実問題に短期間で対応できることを示した好例である。なお、本プロジェクトは支援事業の最終審



Fig.4-7 樹脂部品の突起状バリ

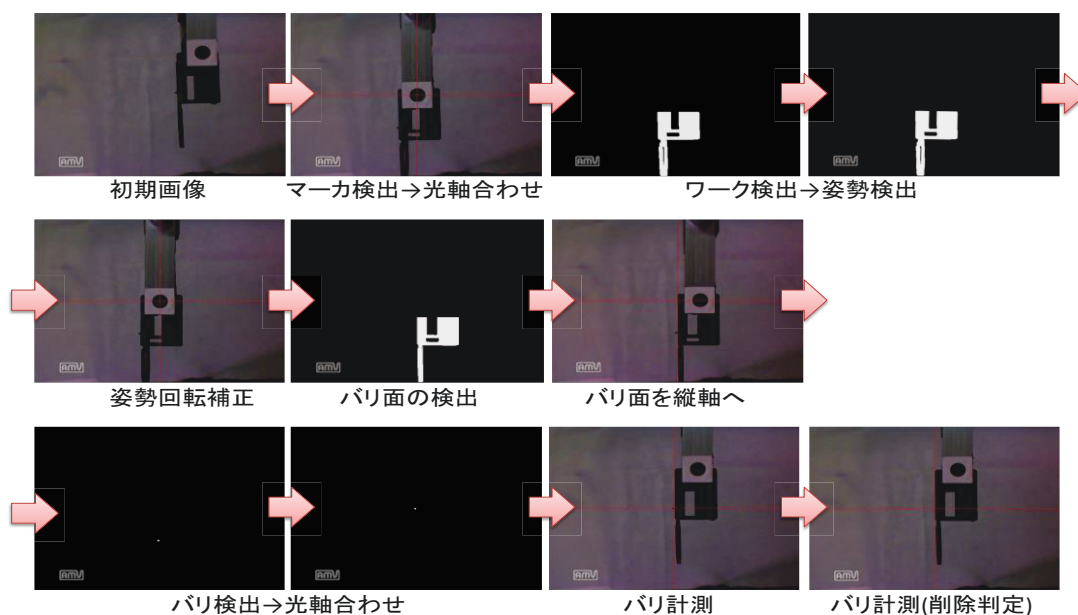


Fig.4-8 単眼単視点による微小突起状バリの計測

査においても高い評価を得、特許出願に至った。

4.6 まとめ

本研究で主張する単眼単視点での三次元画像計測の意義を、幾つかの具体的なアプリケーションのテスト実装によって示した。特に、人代替バリ取りロボットにおける単眼単視点での微小バリ計測の実装は、単眼単視点計測の有効性と可能性を実証した例であると考えられる。

第 5 章

結論

5.1 まとめ

本論文では、三次元画像計測を主題とし、単眼単視点計測に着目した。単眼単視点法は、カメラ一台による計測である為、小型化・軽量化・低コスト化・省電力化・導入の容易さなど、様々な面で理想的である。また今後の三次元画像計測の研究の進歩によって、各手法の計測上の制約がそれぞれ限界まで軽減されたとすれば、能動的かつ多視点的アプローチによらない計測である。すなわち本論文では、三次元画像計測の中で計測の適用可能範囲が最も広くなるのは、単眼単視点計測であると主張する。そこで、単眼単視点計測の実現方法と応用時に期待される効果について論じた。

第 2 章では、第 1 章で述べた単眼単視点計測を実現するアプローチとして、三次元が二次元に投影される際の光学特性に基づく方法として、焦点ボケ特徴に基づく単眼単視点計測について論じ、焦点ボケ強度を推定することで画像の相対的な三次元情報を推定する 2 つの手法を提案した。1 つ目の手法では、画像中から焦点ボケ強度が空間不変である局所領域群を抽出し、各抽出領域で焦点ボケ強度を推定し統合することで、焦点ボケ特徴の推定が困難な空間不変でない焦点ボケ強度を有する静止画像中から焦点ボケ強度分布を推定する手法を提案した。2 つ目の手法では、入力画像の空間周波数に対して低域抑制効果のある空間フィルタを適用することで、焦点ボケ特徴の推定が困難な空間不変でない焦点ボケ強度を有する静止画像中から焦点ボケ強度分布を推定する手法を提案した。提案手法を実装し実験によってその有効性を示した。

第 3 章では、単視点カメラ前の任意の剛体・非剛体物体の三次元運動(平行移動・回転の 6 自由度)を推定する一手法として、単視点距離画像から求められた 3D フローを「流れ場」に見立て、それによる仮想浮標の運動を介して実物体の運動を推定する手法を提案した。提案手法によれば、自由曲面を有する任意の剛体・非剛体物体の大域的な運動を準リアルタイムで検出することが可能であった。特に、単視点における比較的画質の低い 3D フローを入力とした場合でも任意物体の大域的な運動を安定して推定できることを実験によって検証し、本手法が様々なシステムへの運動推定機能の搭載を可能とすることを示した。

第 4 章では、本研究で主張する単眼単視点での三次元画像計測の意義を、幾つかの具

体的なアプリケーションのテスト実装によって示した。特に，人代替バリ取りロボットにおける単眼単視点での微小バリ計測の実装によって，単眼単視点計測の有効性と可能性を実証した。

以上から，単眼単視点計測を実現する一手法を提案し，応用時に期待される効果について実証することで，単眼単視点計測の優位性を示すに至った。

5.2 今後の展望

本論文で提案した焦点ボケ特徴に基づく単眼単視点計測手法によれば，第4章で示した通り，推定した焦点ボケ強度分布に基づき画像中から PSF が空間不変な領域を抽出することが可能である。したがって，そのような領域から従来の手法によって PSF を推定することができると考えられる。また，画像中の PSF が推定できれば，画像のリフォーカスやデフォーカス等の PSF に基づく様々な技術が，単眼単視点を前提としたシステムで実現可能となると考えられる。

最後に，本論文で主張した単眼単視点計測が，三次元画像計測が望まれる様々な場面において活用されることを期待する。

謝辞

本研究は，著者が中京大学大学院情報科学研究科在学中，青木公也教授のもとで行われたものであり，教授より賜ったご指導とご鞭撻に対して厚く御礼申し上げます．さらに，論文を作成するにあたり，ご多忙中の貴重な時間をさかれて本稿をご査読され，有益なご助言を賜りました中京大学大学院情報科学研究科の輿水大和教授，沼田宗敏教授，橋本学教授に厚く御礼申し上げます．

参考文献

- [1] David A.Forsyth, Jean Ponce 著, 大北剛 訳:「コンピュータビジョン」, 共立出版社, (2007,1,25 初版)
- [2] 高木幹雄, 下田陽久, 「新編 画像解析ハンドブック」, 東京大学出版会, (2004,9,10 初版)
- [3] R.Lange and P.Seitz , “Solid-state time-of-flight range camera” , IEEE Journal of Quantum Electronics , Vol. 37 , No. 3 , pp.390-397 , 2001.
- [4] 渡辺昌宏 , 町田聡 , 箱田雅彦 , 「3D マーケティングがビジネスを変える」 , 株式会社翔泳社 , 2011.
- [5] “開花宣言 3D プリンタ” , 日経ものづくり 2013 年 3 月号
- [6] 二宮芳樹 , “自動車運転のためのビジョン技術” , ViEW2014 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演概要集 , pp.242-245 , 2014.
- [7] 加藤博一 , “拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発” , 信学技報 PRMU2001-232 , pp.79-86 , 2002.
- [8] 高度運転支援を支えるセンシング技術” , ViEW2014 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演概要集 , pp.142-145 , 2014.
- [9] J.Aloimonos , “Shape from Texture” , Biological Cybernetics , Vol. 58 , Issue5 , pp.345-360 , 1988.
- [10] F. Moreno-Noguer, P. N. Belhumeur and S. K. Nayar, “Active Refocusing of Images and Videos” ACM Trans. on Graphics (also Proc. of ACM SIGGRAPH),2007.
- [11] 奥村文洋, 神原誠之, 横矢直和, “焦点外れによるぼけとモーションブラーの推定に基づく拡張現実感における光学的整合性の実現” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J90-D, No. 8, pp. 2126-2136, Aug. 2007.
- [12] 綱島宣浩, 中島真人, “コンパウンド法を用いた PSF の推定とぼけ画像の復元” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J81-D-II, no.11, pp.2688-2692, 1998.
- [13] 児玉和也, 相澤清晴, 羽鳥光俊, “複数画像からの全焦点画像の再構成” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J80-D-II, no.9, pp.2298-2307, 1997.
- [14] E. Dowski and W. Cathey , “Extended depth of field through wave-front coding” , Journal of the Optical Society of America A , No.11 , pp.1859-1866 , 1995.

- [15] A. Levin , S.W. Hasinoff , P. Green , F. Durand , W.T. Freeman , “4D frequency analysis of computational cameras for depth of field extension” , ACM Transactions on Graphics (TOG) , vol.28 , no.3 , 2009.
- [16] S.R. Gottesman and E.E. Fenimore , “New family of binary arrays for coded aperture imaging” , Applied optics , Vol. 28 , No. 30 , pp.4344-4352 , Oct , 1989.
- [17] A. Veeraraghavan , R. Raskar , A. Agrawal , A. Mohan , J. Tumblin, “Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing” , ACM Transactions on Graphics (TOG) , ISSN: 0730-0301 , Vol. 26 , Issue 3 , Article 69 , July , 2007.
- [18] D.B. Genny , “Determination of optical transfer function by inspection of frequency-domain plot” , Journal of Optical Society of America , vol. 63 , No. 12 , pp.1571-1577 , 1973.
- [19] 望月優介 , 青木公也 , 興水大和 , “焦点ずれによる画像ぼけ特徴を利用した三次元形状計測” , 電気学会論文誌 C , Vol. 129 , No. 5 , pp.909-915 , 2009.
- [20] Ramachandran, G.N.et al. , “Tree-dimensional Reconstruction from Radiographs and Electron Micrographs : Application of Convolutions instead of Fourier Transforms” , Proc. Nat. Acad. Sci. USA , Vol. 68 , No. 9 , 1971.
- [21] Sheep, L.A. et al. , “The Fourier Reconstruction of a Head Section” , IEEE Trans. Nuclear Science , Vol. 21 , No. 6 , 1974.
- [22] 池田友彦 , 杉本晃宏 , “アクティブカメラの注視点制御に基づく自己運動の推定” , 信学論(D-II) , Vol. J88-D-II , No. 8 , pp.1480-1489 , 2005.
- [23] 梶浦義弘 , 大西昇 , 杉江昇 , “回転探索法による運動物体の 3 次元運動パラメータ推定法” , 信学論(D-II) , Vol. J75-D-II , No. 5 , pp.873-882 , May , 1992.
- [24] 山本正信 , “勾配法による動画像と距離情報からの複数物体の 3 次元運動解析” , 信学論(D) , Vol. J69-D , No. 5 , pp.785-793 , 1986.
- [25] 海老根巧 , 浜田聖 , “観測系の運動を考慮したオプティカルフロー推定に基づく運動物体検出” , 信学論(D-II) , Vol. J83-D-II , No.6 , pp.1498-1506 , 2000.
- [26] 西井渉 , 八木康史 , 谷内田正彦 , “全方位オプティカルフローからの移動ロボットの揺れ推定” , 信学論(D-II) , Vol. J80-D-II , No. 6 , pp.1512-1521 , 1997.
- [27] N. Goncalves and H. Araujo , “Estimation of 3D motion from stereo images” , Proc. 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR) , I : pp.335-338 , 2002.

- [28] N. Molton and M. Brady , “Practical structure and motion from stereo when motion is unconstrained” , *Int. J. Comput. Vis.* , 39(1) : pp.5-23 , 2003.
- [29] Adiv G. , “Determining Three-Dimensional Motion and Structure from Optical Flow Generated by Several Moving Objects” , *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , PAMI-7(4) : pp.384-401 , 1985.
- [30] J. Frazier and R. Nevatia , “Detecting moving objects from a moving platform” , *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on robotics and Automation* , pp.1627-1633 , 1992.
- [31] 森田貴行 , 日浦慎作 , 佐藤宏介 , “多視点画像と CG 画像の比較に基づく動物体の運動計測” , *信学論(D-II)* , Vol. J88-D-II , No. 5 , pp.876-885 , 2005.
- [32] 山本正信 , “3 次元運動推定時におけるモデルの位置と姿勢の自動修正” , *信学論(D-II)* , Vol. J77-D-II , No. 2 , pp.321-330 , 1994.
- [33] 日浦慎作 , 山口証 , 佐藤宏介 , 井口征士 , “動距離画像の計測と生成による任意形状物体の実時間追跡” , *信学論(D-II)* , Vol. J80-D-II , No. 6 , pp.1539-1546 , 1994.
- [34] 角保志 , 石山豊 , 富田文明 , “ステレオビジョンシステムのためのモデルベースアプローチによる自由曲面体の実時間運動追跡” , *信学論(D-II)* , Vol. J84-D-II , No. 8 , pp.1693-1700 , 2001.
- [35] Y. Sumi , Y. Ishiyama , and F. Tomita , “Hyper frame vision: A real-time vision system for 6-DOF object localization” , *I Proc. ICPR02* , III : pp.577-580 , 2002.
- [36] T. Drummond and R. Cipolla , “Real-time visual tracking of complex structures. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach*” , *Intell.* , 24(7) : pp.932-946 , 2002.
- [37] Lowe D.G. , “Integrated treatment of matching and measurement errors for robust model-based motion tracking” , *IProc. of 3rd ICCV* , pp.436-440 , 1990.
- [38] 水野宏基 , 藤吉弘亘 , 岩堀祐之 , “マルチカメラを用いた 3 次元シーンフローによるモーション推定” , *画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2006)* , pp.529-563 , 2006.
- [39] 加賀美聡 , “ステレオカメラからのオンライン 3 次元 SLAM” , *デジタルヒューマン・シンポジウム 2009 予稿集* , 2009.
- [40] 岡田慧 , 青山拓磨 , 加賀美聡 , 稲葉雅幸 , 井上博允 , “三次元フローを用いた人込みにおけるロボットの障害物回避” , *第 5 回ロボティクスシンポジウム* , 13C2 , 2000.

- [41] 青木公也 , 輿水大和 , “時系列距離画像からの 3D フロー検出のための高さ・カラーヒストグラム(HCH) の提案” , 信学論(D) , Vol. J89-D , No. 9 , pp.2033-2044 , 2006.
- [42] T. Miyazaki , T. Kaneko , and S. Kuriyama , “Virtual Destruction of a 3D Object with a Stick” , Proc. of WSCG 2005 , pp.147-154 , 2005.
- [43] 水野勇 , 岩崎洋平 , 金子豊久 , 栗山繁 , “柔らかい 3 次元モデルの構築と外力による体積保持変形シミュレーション” , 信学論(D-II) , Vol. J87-D-II , No. 6 , pp.1319-1328 , 2004.
- [44] David M. Bourg , “ゲーム開発のための物理シミュレーション入門” , Ohmsha , 2003.
- [45] 松野勝弘 , 李七雨 , 辻三郎 , “ポテンシャルネットと KL 展開を用いた顔表情の認識” , 信学論(D-II) , Vol. J77-D-II , No. 8 , pp.1591-1600 , 1994.
- [46] 八村広三郎 , “モーションキャプチャプロジェクト-舞踊のデジタルアーカイブ-” , 京都アート・エンタテインメント創成研究 2003 年度報告書 , 2004.
- [47] 山田敬嗣 , “ビジョン技術の現状と課題(ユビキタス情報インターフェースのために)” , ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集 , pp.26-31 , 2005.
- [48] 稲邑哲也 , “模倣するロボットの知能” , 日本機械学会誌 , Vol. 109 , No. 1051 pp.52-53 , 2006.
- [49] 岩田健司 , 佐藤雄隆 , 依田育士 , 坂上勝彦 , 大津展之 , “広範囲動画像における CHLAC による異常検出” , 電気学会研究会資料 , IP-07-1~13 , pp.43-48 , 2007.
- [50] 羽下哲司 , “監視映像における人物認識ー現実課題への挑戦ー” , ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集 , pp.42-47 , 2007.
- [51] 青木公也 , 望月優介 , 輿水大和 , “バリ取りシステム” , 特開 2014-161980 , 2014.
- [52] 青木公也 , 望月優介 , 輿水大和 , 鈴木勝也 , 野田仁志 , 飯田和則 , 橋口宏衛 , “小物樹脂部品のバリ取りロボットの開発” , 精密工学会 , 動的画像処理実利用化ワークショップ(DIA2014) , 2014.
- [53] 経済産業省中部経済産業局 , サポインマッチナビ中部 , <http://www.chubu.meti.go.jp/interface/php/chubu/kikai/sapoin/index.php/program/detail/83> , 2014/02/14 アクセス.

本学位論文に関する研究業績

論文

1. 望月優介・青木公也・輿水大和,
“焦点ずれによる画像ぼけ特徴を用いた三次元形状計測”,
電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 5, Sec. C(2009-5), pp. 909-915
2. 青木公也・望月優介,
“仮想浮標を介した実物体の運動推定”,
電気学会論文誌 C, Vol. 131, No. 2, Sec. C(2011-2), pp. 393-403

特許

1. 青木公也・望月優介・輿水大和, “バリ取りシステム”, 特開 2014-161980

国際会議発表

1. Y. Mochizuki and K. Aoki, “Estimation of Shift-variant Focus Degree in Image Obtained by Single Camera from Single Viewpoint”, 20th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision(FCV 2014), (2014-2), Okinawa-Japan

国内学会・シンポジウム・研究会等の発表

1. 望月優介・青木公也, “単一静止画像からの表面形状再構築”, 電気関係学会, 東海支部連合大会(2006-9), 岐阜 「**連合大会奨励賞**」
2. 望月優介・青木公也, “単一静止画像からの表面形状計測”, 精密工学会 画像応用技術専門委員会, ビジョン技術の実利用ワークショップ(ViEW2006) (2006-12), pp. 161-164, 横浜
3. 望月優介・青木公也, “焦点ぼけを利用した単眼視計測による表面形状再構築”, 第6回情報科学技術フォーラムFIT2007 (2007-9), 豊田

4. 望月優介・青木公也, “焦点ぼけ特徴を用いた単眼単視点測距の検討”, 電気関係学会, 東海支部連合大会(2008-9), 愛知
5. 望月優介・青木公也・輿水大和, “焦点ずれによる画像ぼけ特徴を利用した三次元形状計測手法の検討”, 精密工学会 画像応用技術専門委員会, ビジョン技術の実利用ワークショップ(ViEW2008) (2008-12), 横浜
6. 望月優介・磯部衛・青木公也・輿水大和, “輻輳角による三次元計測手法の検討”, 画像センシング研究会, 第15回画像センシングシンポジウム (2009-6), 横浜
7. 望月優介・青木公也, “焦点ぼけ特徴を用いた単眼単視点形状計測”, 電気学会, 一般産業研究会 (2009-12), pp. 53-57, 徳島・淡路
8. 望月優介・青木公也, “単一静止画像からの焦点ボケによる劣化モデル推定”, 画像情報学フォーラム・電子情報通信学会 PRMU 研究会・情報処理学会 CVIM 研究会, 第13回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2010) (2010-7), 釧路
9. 青木公也・望月優介・小林一喜, “3次元運動追跡におけるポイントクラウドデータの活用”, 画像センシング研究会, 第17回画像センシングシンポジウム(2011-6), 横浜
10. 青木公也・望月優介・日比野翔太郎・小林一喜, “ロボットビジョンのための画像最適取得-Point Cloud データの活用”, 電気学会, 平成23年電気学会産業応用部門大会シンポジウムセッション(2011-9), 沖縄
11. 望月優介・青木公也, “焦点ボケ特徴に注目した単眼単視点画像からの三次元形状推定”, 画像センシング研究会, 第18回画像センシングシンポジウム(SSII2012) (2012-6), 横浜
12. 青木公也・望月優介・小林一喜, CVSLab. メンバ, “エリア深度センサによるポイントクラウド(PC)データ処理における2D画像処理資産の活用”, 画像センシング研究会, 第18回画像センシングシンポジウム(SSII2012) (2012-6), 横浜
13. 望月優介・青木公也, “合焦度推定による静止画像からの三次元形状推定”, 電子情報通信学会 PRMU 研究会・情報処理学会 CVIM 研究会, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2012) (2012-8), 博多

14. 望月優介・青木公也, “静止画像における空間不変でない焦点ボケ強度推定手法の検討”, 精密工学会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2012) (2012-12), 横浜

15. 望月優介・青木公也, “単眼単視点画像からの空間不定合照度分布の推定”, 精密工学会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2013) (2013-12), 横浜

16. 青木公也・望月優介・輿水大和・鈴木勝也・野田仁志・飯田和則・橋口宏衛, “小物樹脂部品のバリ取りロボットの開発”, 精密工学会, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2014) (2014-3), 熊本

その他の研究業績

論文

1. 根来秀多・望月優介・青木公也, “仮想視点画像を用いた任意運動物体の3次元トラッキング”, 精密工学会誌, Vol. 80, No. 12 (2014-12), pp. 1194-1199

国内学会・シンポジウム・研究会等の発表

1. 日比野翔太郎・望月優介・青木公也, “三次元計測に基づくロボットのテレオペレーションシステム”, 電気関係学会, 東海支部連合大会 (2011-9), 三重

2. 山口公宏・望月優介・恩田多津也・青木公也, “画像検査装置における撮像系の自動設計”, 日本非破壊検査協会, 平成23年度秋季講演大会 (2011-10), pp. 135-138, 淡路

3. 日比野翔太郎・望月優介・青木公也, “三次元計測に基づくロボットのテレオペレーションシステム”, 精密工学会 画像応用技術専門委員会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2011) (2011-12), pp. 355-359, 横浜

4. 中西真輝・東功太・後藤貴大・望月優介・青木公也, “複合現実感における実物体から仮想物体への干渉に関する研究”, 精密工学会 画像応用技術専門委員会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2011) (2011-12), pp. 439-443, 横浜

5. 西尾友宏・望月優介・青木公也, “NUI のためのウェアラブル手指腕部モーションキャプチャの検討”, 精密工学会, 第 17 回知能メカトロニクスワークショップ (iMect2012) (2012-8), 広島
6. 西尾友宏・望月優介・青木公也, “NUI のためのウェアラブル手指腕部モーションキャプチャの開発”, 精密工学会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2012) (2012-12), 横浜
7. 根来秀多・小林一喜・望月優介・青木公也, “複数視点再標本化画像を用いたロバストな物体トラッキング”, 画像センシング研究会, 第 19 回画像センシングシンポジウム (SSII2013), IS1-15 (2013-6), 横浜
8. 根来秀多・望月優介・青木公也, “仮想視点画像を用いたロバストな物体トラッキング”, 電気学会・次世代産業システム研究会, 電気学会研究会資料, IIS-13-061-067 (2013-8), pp. 21-25, 名取
9. 根来秀多・望月優介・青木公也, “仮想視点画像を用いた良視点位置からの運動物体追跡と物体認識”, 精密工学会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2013) (2013-12), 横浜
10. 中村侑市・望月優介・青木公也, “高速・高精度な手指検出アルゴリズムの提案”, 精密工学会, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2013) (2013-12), 横浜
11. 西尾友宏・望月優介・青木公也, “NUI のための光学式ウェアラブル手指検出システムの開発”, 精密工学会, 動的画像処理実利用化ワークショップ (DIA2014) (2014-3), 熊本
12. 根来秀多・望月優介・青木公也, “仮想視点画像を用いた任意物体の 3 次元トラッキング”, 電気学会, 知覚情報・次世代産業システム合同研究会資料 (2014-3), PI-14-001~015, IIS-14-065~060, pp. 37-42, 名古屋
13. 根来秀多・望月優介・青木公也・片山隼多・加藤航, “仮想視点画像を用いた 3 次元トラッキング処理の性能評価”, 電気・電子・情報関係学会, 東海支部連合大会 (2014-9), Pol-4, 名古屋