

インタラクティブなステレオ3次元計測

齋藤 悠司[†], 清水 雅夫^{††}, 奥富 正敏^{††}

[†]東京工業大学 工学部 制御システム工学科

^{††}東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻

[†]sai@ok.ctrl.titech.ac.jp, ^{††}{mas, mxo}@ctrl.titech.ac.jp

本論文では、静止物体の3次元形状を計測するために、計測対象への簡易なアクティブ照明と2台のカメラで撮影した時系列画像を用いた、インタラクティブなステレオ計測法を提案する。簡易なアクティブ照明は、懐中電灯や棒の影を計測対象上で移動させるだけでよく、ステレオカメラ間の対応点を検出するために、時間方向の画素値変化を利用する。このため、通常のスレオ画像間の対応を求めるときに利用する空間方向のウィンドウが不要になり、各画素ごとに正確な対応点を検出することができる。簡易な照明を当てる位置や強度、照明の方向などをインタラクティブに調整可能とするため、リアルタイムに計算して結果を表示するシステムを構築した。細かな形状を持つ静止物体を対象とした実験を行い、本システムの有効性を確認した。

Interactive Stereo Vision for Three-Dimensional Measurement

Yuuji SAITOU[†], Masao SHIMIZU^{††} and Masatoshi OKUTOMI^{††}

[†]Department of Control and Systems Engineering, Tokyo Institute of Technology

^{††}Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

In this study, we have realized an interactive stereo system with two cameras and active lighting to measure a stationary object shape. Any lighting condition changes including a moving electric flashlight or a moving shadow of a stick can be used for the active lighting. A time domain window is adopted to detect the correspondences between the stereo images. The time domain window dispenses with the use of the spatial local support that is usually employed in the stereo matching. The system displays the measurement results interactively to encourage the user to light up the region which does not show a good result. Experimental results demonstrate the effectiveness of our proposed system.

1. はじめに

物体の3次元形状を計測するために、2台以上の複数のカメラを用いたステレオ計測法が広く利用されている [1, 2]. カメラのみを用いるパッシブステレオ法では、対応点探索において空間方向のウィンドウを利用するのが一般的である。しかし、空間方向ウィンドウを利用すると、奥行きを平滑化してしまったり、ウィンドウ内に奥行きが急激に変化する部分を含む場合、正しく奥行きを推定できない、といった問題がある。画像間での対応の曖昧さを排除するために、1台のカメラを光源に置き換えたアクティブステレオ法も多く利用されており、スリット光投影法やパターン光投影法がある [3, 4].

一方、図1のように時系列画像を用いて、時間方

向のウィンドウを利用し、対応点探索を行うステレオ計測法も提案されている [5, 6]. この手法では、パッシブステレオ法のように画像間での対応位置を求めることで対象の奥行きを計測するが、このときに時間方向での画素値の変化を利用する。つまり、静止物体に対して変化する照明を当てたときに、対

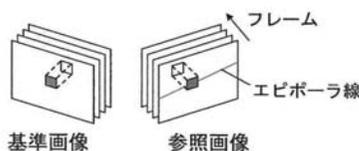


図 1: 時間方向ウィンドウを用いるステレオ計測

応位置では時間的な照明変化も同一であることを利用して対応を求める。この照明変化は、既存のアクティブステレオ法とは異なり、懐中電灯や影などの簡易な照明を任意に変化させることで実現できる。時間方向ウィンドウを利用することで、空間方向のローカルサポートが不要になり、画素ごと(1×1[pixel]の空間方向ウィンドウ)に対応位置を求めることができる。通常のパッシブステレオ法で行うキャリブレーションだけを行えばよく、アクティブステレオ法のように構造化照明に対するキャリブレーションは不要である。しかし、文献 [5]では、照明変化を与えた時系列画像をすべてキャプチャした後に一括して処理を行うため、適切な照明変化が与えられたのかを撮影時に判断できなかった。

本研究では、時間方向ウィンドウを利用した、インタラクティブなステレオ計測法を提案する。インタラクティブなステレオ計測法とは、計測中にリアルタイムに計測結果を表示することで、より良い結果を得るために計測者が照明を当てる位置や強度、照明の方向などを調整できる計測法である。このために、入力画像を逐次的に処理することで、リアルタイムに計測結果を表示するシステムを構築した。

本論文は、以下のように構成する。2節では、インタラクティブな計測システムについて述べる。3節では、実物体に対する計測実験を行い手法の有効性を示す。

2. インタラクティブ計測システム

2.1. インタラクティブな計測法

図2に示すように、計測者がシステムの一部となり、計測結果をフィードバックして利用しながら照明変化を与える計測法を考える。結果が不完全な箇所集中的に照明変化を与えたり、対象が鏡面反射成分

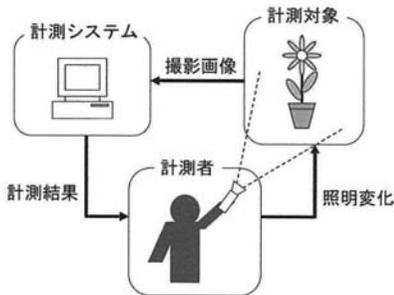


図 2: インタラクティブな計測法

を持つ場合には照明の角度を調整するなどのインタラクションを行うことができる。また、計測者が結果に満足した段階で計測を終了することができる。

2.2. 逐次的視差マップ更新処理

本計測システムでは、まず、入力画像に対して、レンズ歪曲収差の除去とレクティフィケーション(平行化) [7, 8]を行う。次に、フレーム間差分を行った上で、ステレオ画像間の対応候補画素の画素値の差の2乗(SD:Squared Difference)を計算する。

$$SD(u_b, v_b, d, t) = \{ \{ I_b(u_b, v_b, t) - I_b(u_b, v_b, t-1) \} - \{ I_r(u_b + d, v_b, t) - I_r(u_b + d, v_b, t-1) \} \}^2 \quad (1)$$

ただし、 (u_b, v_b) は基準画像座標、 d は視差、 $I_b(u, v, t)$ と $I_r(u, v, t)$ はそれぞれ基準画像と参照画像の位置 (u, v) におけるフレーム番号 t での画素値である。フレーム間差分を行う理由は、画像間での明るさの差による影響を低減するためである。さらに式(1)の値を、新しい画像が入力される毎に積算し、図3に示すように、基準画像座標 (u_b, v_b) と視差 d を軸に持つSSD空間に配置する。

$$SSD(u_b, v_b, d, t) = SSD(u_b, v_b, d, t-1) + SD(u_b, v_b, d, t) \quad (2)$$

画像間の対応位置は、このSSD空間における視差 d 方向の最小値探索によって求めることができる。

実際の計測では、時系列画像の全てのフレームにおいて照明変化があるわけではない。たとえば、照明変化として手持ちの懐中電灯を考えると、画像中のほとんどの部分には懐中電灯の照明が当たらず画素値が変化しない。変化しない画素値は対応点探索

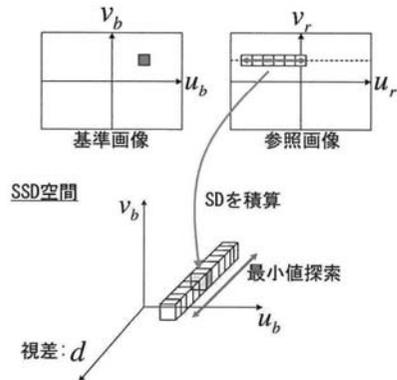


図 3: SSD空間と最小値探索

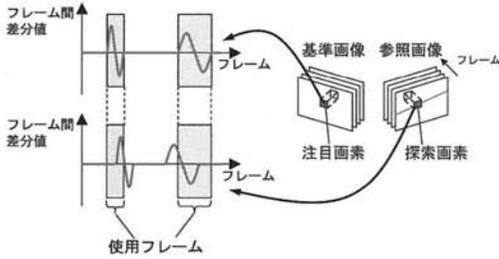


図 4: 積算フレームの選択

に寄与しないため、実際の計算では式 (1) を計算するとき、基準画像のフレーム間差分値を一定のしきい値と比較し、しきい値以上のときだけ式 (2) によって SSD 空間に積算している (図 4)。この処理によって、視差の計算時間を約 1/3 に短縮できた (懐中電灯照明の場合)。

また、本計測システムでは、オクルージョンを検出するためにバックマッチングを利用した。通常の探索で得られた視差と、基準画像と参照画像を交換して得られた視差の差の絶対値が、しきい値以上であればオクルージョンと判定した。

2.3. 計測結果の表示

図 5 に計測結果が徐々に生成されていく様子 (図 5(a) ~ 図 5(c)) と、最終的な計測結果 (図 5(d)) を示す。図 5(d) の下段は 2 台のカメラで撮影した基準画像と参照画像、上段左は推定した視差マップ、上段右は検出したオクルージョン領域 (白) を示す。オクルージョン検出のためのしきい値はオクルージョン検出結果を確認しながら調整できるようにした。

計測者は、視差マップとオクルージョン検出結果を確認しながら、懐中電灯などを動かして計測対象を照明する。結果が不完全な箇所には、集中的に照明変化を与えることで、効率的に計測が行える。

3. 実験結果

カメラは Point Grey Research 社の Flea2 (グレースケール, 640×480 [pixel]) を用いた。照明として、計測時間を短縮するために、図 5(d) の撮影画像中に示すように、ランダムストライプパターンを静止画を PC プロジェクタに入力し、プロジェクタを手を持って対象を照明した。また、レーザーポインタも利用した。静止画投影は、懐中電灯を改造したものやスライドプロジェクタといった低コストな照明でも十分実現できる。視差推定は、画素単位で行った。

図 6 に撮影画像と視差マップを示す。視差マップ中の黒い領域は、オクルージョンとして検出された領域を示す。計測対象は、複雑な形状をもつ花で、奥行き不連続な領域やオクルージョン領域を多く含んでいるが、良好な結果が得られている。また、花の左側の平面領域 (159×342 [pixel], 90×200 [mm] に対応) を用いて、推定した 3 次元位置に対して平面をフィッティングし奥行き標準偏差を計算したところ、

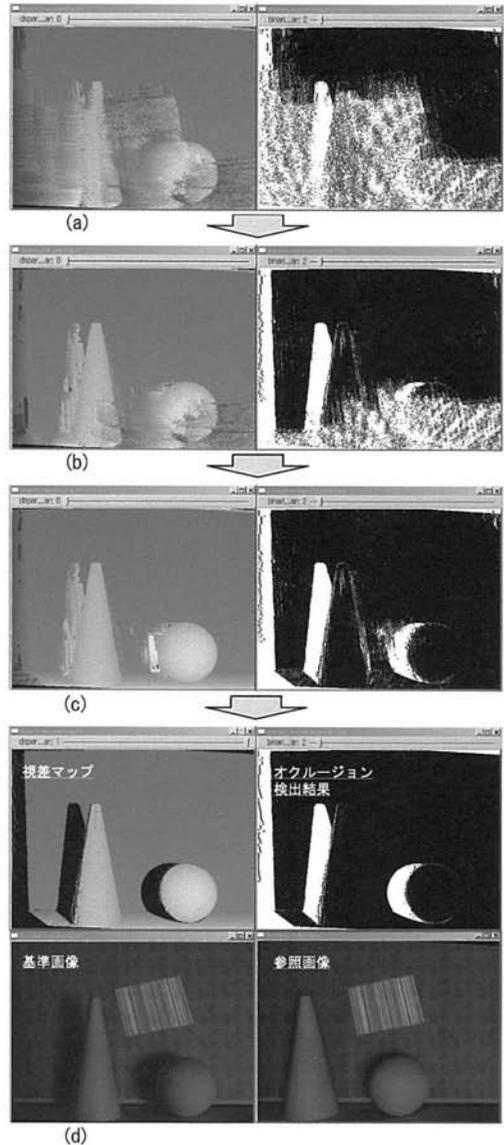


図 5: 計測結果の表示例

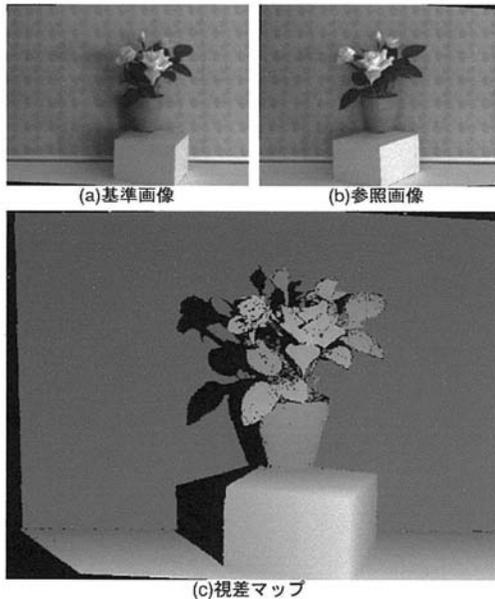


図 6: 計測結果(花)

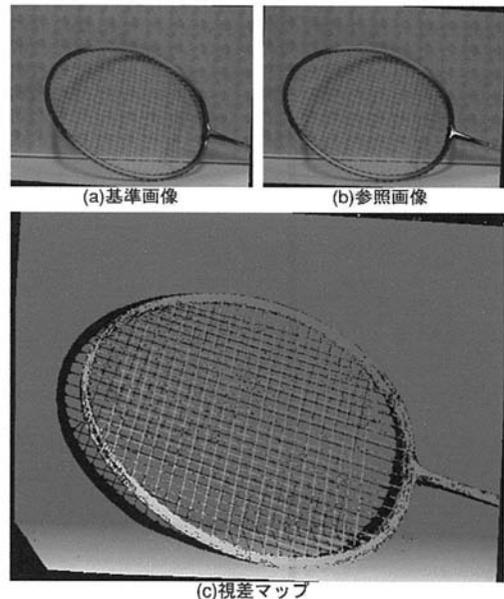


図 7: 計測結果(ラケット)

0.45[mm]であった。表示速度は約3[fps]であった。

図7に別の計測結果を示す。計測対象には、ラケットのガットのような非常に細かな形状が含まれるが、良好な視差推定が行われている。また、後ろの平面領域でのガット部によるオクルージョン領域も検出されていることが確認できる。ラケットのフレーム部において、誤ってオクルージョンとして検出されている領域は、色が黒く反射率が低い部分である。

4. おわりに

本研究では、時間方向ウィンドウを用いた、インタラクティブなステレオ計測法を提案した。提案手法では、計測中にリアルタイムに計測結果を表示することで、計測者が照明を当てる位置や強度、照明の方向などを調整できる。入力画像を逐次的に処理することで、リアルタイムに計測結果を表示する計測システムを構築した。

構築した計測システムを用いて、複雑な形状や細かな形状を持つ対象の計測実験を行い、その有効性を確認した。

参考文献

[1] M. Okutomi and T. Kanade. A Multiple-Baseline

Stereo. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.

- [2] D. Scharstein and R. Szeliski. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 47, No. 1, pp. 7–42, 2002.
- [3] J. Salvi, J. Pagés, and J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, Vol. 37, pp. 827–849, 2004.
- [4] P.J. Besl. Active, Optical Range Imaging Sensors. *Machine Vision and Applications*, Vol. 1, No. 2, pp. 127–152, 1988.
- [5] J. Davis, R. Ramamoorthi, and S. Rusinkiewicz. Spacetime Stereo: A Unifying Framework for Depth from Triangulation. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 359–366, 2003.
- [6] L. Zhang, B. Curless, and S.M Seitz. Spacetime Stereo: Shape Recovery for Dynamic Scenes. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 367–374, 2003.
- [7] N. Ayache and C. Hansen. Rectification of Images for Binocular and Trinocular Stereovision. In *9th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 11–16, 1988.
- [8] A. Fusiello, E. Trucco, and A. Verri. A compact algorithm for rectification of stereo pairs. *Machine Vision and Applications*, Vol. 12, No. 1, pp. 16–22, 2000.