

カメラ振動を考慮したステレオ計測誤差モデルの構築

Construction of Stereo Measurement Error Model by Considering Camera Vibration

北海道大学 ○岡崎 伸哉, 田中 孝之, 金子 俊一, 高氏 秀則
株式会社トプコン 高地 伸夫, 山田 光晴

要 旨

本研究では、カメラ振動を考慮したステレオシステムの計測誤差モデルを構築することを目的とする。計測誤差パラメータとカメラ振動パラメータの関係性を調べるために、振動試験機で振動を加えて検証した。加えた振動は単振動である。結果より、平均値 μ は振動の影響が見られなかった。また、標準偏差 σ は振幅 A に対して正の相関、周波数 F に対して負の相関が見られた。これらの関係について、画像ブレに注目し、モデル化を行った。

1. 緒言

本研究では、カメラ振動に対してロバストなステレオ計測システムを開発するための基礎研究として、カメラ振動により生じるステレオ計測誤差モデルを構築する。従来のロバスト画像計測に関わる研究では、対象物の隠れや変形、照明変動などの外乱に対する計測のロバスト性を高め、計測精度を向上させる多くの手法が開発されてきた [1][2]。これに対して本研究では、カメラに比較的大きな振動が加わり、対象物の撮像状態が悪化する際に、ステレオ計測値のばらつきをモデル化し、計測値の信頼性を得ることを目的としている。

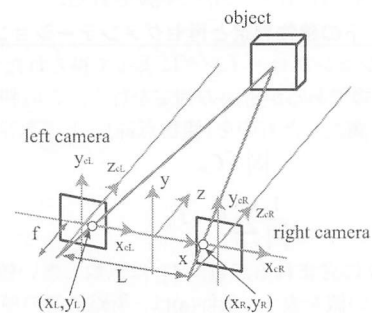


Fig. 1: Stereo Measurement

2. ステレオ計測誤差

2.1 平行ステレオ計測

平行ステレオ法の原理図を Fig.1 に示す。左右のカメラ画像から得られた対称点の座標を $(x_L, y_L), (x_R, y_R)$ とすると、対称点の 3 次元位置座標 $P = (X, Y, Z)$ は

$$P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_L + x_R}{2} \frac{L}{d} \\ \frac{y_L + y_R}{2} \frac{L}{d} \\ \frac{fL}{d} \end{pmatrix} \quad (1)$$

より、求められる。ここで、 $L[\text{mm}]$ はベースライン、 $f[\text{mm}]$ はカメラの焦点距離、 $d[\text{pixel}]$ は視差 ($d = x_L - x_R$) である。

2.2 計測誤差

ステレオ計測では、2 台のカメラを用いて同一の対称点を観測している。そのため、左右のカメラ画像内において観測している点にずれが生じると、それが計測誤差となり得られる 3 次元位置情報に影響する。

いま、計測すべき対称点の座標がずれて計測されてしまったとする。このとき、ステレオ法により得られる 3 次元位置座標 P_m は、式 (2) のように求められる。

$$P_m = \begin{pmatrix} \frac{x_L + \Delta x_L + x_R + \Delta x_R}{2} \frac{L}{d + \Delta d} \\ \frac{y_L + \Delta y_L + y_R + \Delta y_R}{2} \frac{L}{d + \Delta d} \\ \frac{fL}{d + \Delta d} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta d[\text{pixel}]$ は視差誤差 ($\Delta d = \Delta x_L - \Delta x_R$) である。

ここで、左右画像内での対象点のずれ $\Delta x_L, \Delta x_R, \Delta y_L, \Delta y_R$ は一様分布、視差誤差 Δd は三角分布に近似される確率分布にしたがって生じることが実験から確認された。以後では計測誤差はこれらの確率分布にしたがって生じると仮定する。

3. カメラ振動と計測誤差の関係

3.1 計測誤差分布の測定

ステレオ計測における計測誤差の発生確率は一様分布および三角分布に近似できるので、パラメータは平均値 μ と標準偏差 σ の 2 つとなる。また、カメラ振動のパラメータを考えると、振動の振幅 A と周波数 F の 2 つがあげられる。これらのパラメータの関係を実験的に求める。

本論文では、カメラとして IEEE1394 カメラの Flea を 2 個使用している。Flea の仕様を Table 1 に示す。カメラから一定距離の位置に複数のランドマークを設置する。ランドマークは $117\text{mm} \times 117\text{mm}$ の色紙を使用している。ランドマークの検出方法は加藤らの色検出 [3] を用いている。真値は、カメラ振動がないデータの平均値を仮の真値として用いる。真値および測定値より、計測誤差を求める。

振動は振動試験装置を用いて付加する。振動試験装置では、振幅 A (peak-to-peak value) および周波数 F を任意に可変できる。実験条件を Table 3 に示す。振動方向は水平方向のみとしている。

本論文で行った実験条件では平均値 μ には影響を与えなかった。したがって、標準偏差 σ の結果のみを示す。実験結

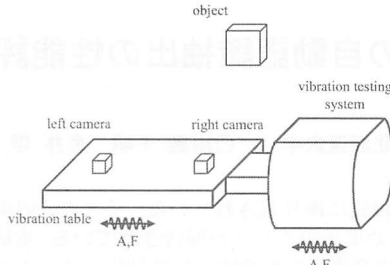


Fig. 2: Image of experimental environment

Table 1: Specifications of the IEEE-1394 Camera Flea

focal length (f)	8 mm
resolution	1024x768 pixel
angle of view (θ)	33 °
Frame Rate	15 Hz

Table 2: Specification of Vibration Testing System

excitation force (sine)	16 kN_{0-P}
frequency (horizontal)	(DC)~2000 Hz
maximum displacement	56 mm_{P-P}

果を Fig. 3(a) に示す. さらに, 加えている振動方向が x 軸の 1 方向なので, Δx の数値についてのみ示す. Fig.3(a) より, 標準偏差 σ に対して, 振幅 A は正の相関, 周波数 ω は負の相関があることがわかる.

また, 視差誤差 Δd についての結果を Fig.4(a) に示す. Fig.4(a) より, Fig.3(a) と同様に, カメラ振動パラメータに対して相関があることがわかる.

3.2 計測誤差モデルの構築

前節の結果に対して, 我々は画像ブレに注目して考察を行った. 画像ブレにより生じる計測誤差と実験結果とを比較するために, 画像ブレを考慮したシミュレーションを行った. シミュレーションは, シャッター解放時間内における画像ブレの度合いおよびランドマークの重心位置のずれを推定するものである. その結果を Fig.3(b) に示す. Fig.3(a) と比較すると, ほぼ同じ傾向が得られていることが確認できる. したがって, シミュレーション結果から計測誤差モデルを求める.

$$\sigma_{\Delta x}(A_x, F_x) = \frac{A_x R_x}{2\sqrt{2}Z \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right)} \exp\left(-\frac{9}{2}F_x^2 t_{sh}^2\right) \quad (3)$$

同様に視差誤差 Δd についても, 画像ブレに注目して考察を行った. 視差誤差 Δd に関しては, $\Delta d = \Delta x_L - \Delta x_R$ から求められることから, Δx_L と Δx_R の分布の合成からモデルを構成できると考えた. したがって, 確率分布の一次結合から次式のように求められる.

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta d}(A_{xL}, F_{xL}, A_{xR}, F_{xR}) \\ = \sqrt{\sigma_{\Delta x}^2(A_{xL}, F_{xL}) + \sigma_{\Delta x}^2(A_{xR}, F_{xR})} \quad (4) \end{aligned}$$

式 (4) より求めた結果を Fig.4(b) に示す. Fig.4(a) と比較すると, ほぼ同じ傾向が得られていることが確認できる. これより, 式 (4) が妥当であることが確認できる.

Table 3: Conditions of our vibration experiments

Amplitude A	6, 9, 12, 15 mm
Frequency F	4, 6, 8, 10 Hz
Baseline L	147 mm
Depth Z	1000 mm
Shutter speed t_{sh}	40 msec

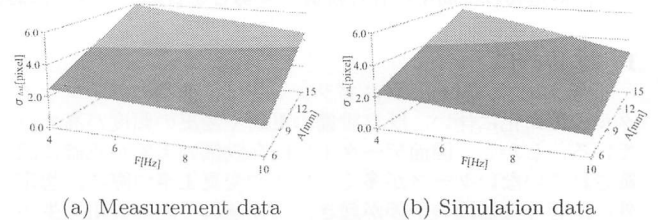


Fig. 3: Change in standard deviation of Δx against amplitude and frequency

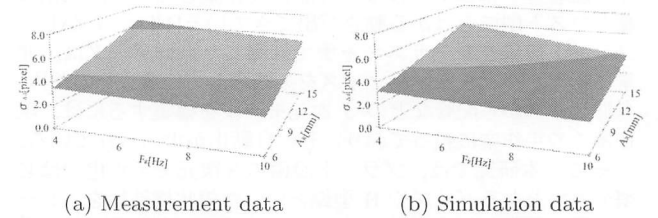


Fig. 4: Change in standard deviation of Δd against amplitude and frequency

4. 結言

本研究では, カメラ振動に対してロバストなステレオ計測システムを開発するための基礎研究として, カメラ振動により生じるステレオ計測誤差モデルの構築を実験的に行った. 今回の実験条件では, 以下のような結果が得られた.

- (1) 平均値 μ は周期的な振動を与えても変化はない.
- (2) 画像ブレに注目することにより, 計測誤差モデルを構築できた.
- (3) 視差誤差 Δd に関しては, 確率分布の一次結合を考慮することにより, モデルを構築できた.

また, 今回の実験では単軸を対象としていたが, 今後は三次元的な振動および各軸方向の回転振動も考慮する必要がある.

文献

- [1] Farhan ULLAH, Shun'ichi KANEKO and Satoru IGARASHI : Tracking Looming and Receding Objects by Orientation Code Matching, The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, Vol.31, No.1, pp.94-102, (2002).
- [2] 松山 隆司, 和田 俊和, 波部 斉, 棚橋 和也 : 照明変化に頑健な背景差分, 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J84-D-II(10), 2201-2211, 2001-10-01
- [3] 加藤 丈和, 柴田 智行, 和田 俊和 : 最近傍識別器を用いた背景差分と色検出の統合, 情報処理学会研究報告 CVIM, Vol.2004, No.6(20040122), pp.31-36