

時間相関イメージセンサとそのオプティカルフロー検出を用いた Visual SLAM の基礎的検討

坂吉啓二^{†1} 栗原徹^{†2}
高知工科大学^{†1†2}

1. はじめに

近年, AR 技術開発が盛んであり, 環境認識に Visual SLAM を利用することがある. しかし, 対応点探索による Visual SLAM では, 移動しながら撮影すると運動方向へのボケが発生し, 次フレームにおける対応点探索が困難になるという問題がある. 本手法で用いる時間相関イメージセンサというデバイスは, 露光時間中の入射光と参照信号との時間相関演算によって入射光の時間変動を観測することが可能であり, オプティカルフロー拘束式に荷重関数を設定した荷重積分法を用いることによって対応点探索の問題を回避したオプティカルフローを得ることができる. 時間相関イメージセンサと荷重積分法により得られたオプティカルフローを用いて Visual SLAM の実現を試みる.

2. 本手法全体の流れ

本手法の Visual SLAM のフローチャートを図 1 に示す. 通常の Visual SLAM における特徴点検出や対応点探索, 追跡処理の一部に時間相関イメージセンサと荷重積分法から得られるオプティカルフローを適用したものが本手法のフローチャートである.

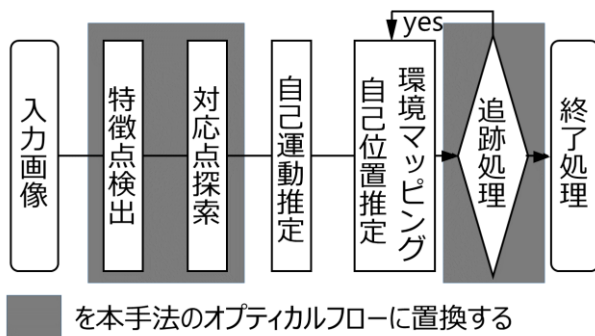


図 1. 本手法の Visual SLAM のフローチャート.

また, オプティカルフローはテクスチャが存在しない場所では強度微分がゼロとなり求めることができない.

そこで, オプティカルフロー計算に全変動正則化項を追加することにより, 強度微分がゼロとなる領域に周辺のベクトル成分を用いて補間を行った.

3. オプティカルフロー算出

3.1 オプティカルフロー積分方程式

オプティカルフローはセンサに映る物体の輝度が時間に寄らず一定であるという拘束条件を元に

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt}f(x,y,t) &= \frac{\partial x}{\partial t}\frac{\partial}{\partial x}f(x,y,t) + \frac{\partial y}{\partial t}\frac{\partial}{\partial y}f(x,y,t) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial t}f(x,y,t) \\ &= uf_x + vf_y + f_t = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

で解かれる[1]. ここで未知数 $u = \partial x / \partial t, v = \partial y / \partial t$ とおき, $f_x = (\partial / \partial x)f(x,y,t), f_y = (\partial / \partial y)f(x,y,t), f_t = (\partial / \partial t)f(x,y,t)$ として整理する. この式(1)はオプティカルフロー拘束式などと呼ばれる. オプティカルフロー拘束式には未知数が 2 つ存在するため一つの拘束式からは解を一意に求めることができない. そこでオプティカルフロー拘束式が時間相関イメージセンサの露光時間 T 内の全ての時刻 t で成り立つとすると, $\omega(t)$ を荷重関数としたときに以下の式が成り立つ[2][3].

$$\begin{aligned} uf_x + vf_y + f_t &= 0, \quad \forall t \\ \Leftrightarrow \int (uf_x + vf_y + f_t)\omega(t)dt &= 0, \quad \forall \omega(t) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $\omega(t) = e^{-jn\omega_0 t}$, $\omega_0 = 2\pi/T$ とすると 1 フレーム複素正弦波荷重関数は,

$$g_{n\omega_0}(x,y) = \int_0^T f(x,y,t)e^{-jn\omega_0 t}dt \quad (3)$$

となり, オプティカルフロー積分方程式は,

$$(u\partial_x + v\partial_y)g_{n\omega_0} + [f(x,y,t)]_0^T + jn\omega_0 g_{n\omega_0} = 0 \quad (4)$$

となる. 未知数は速度 u, v と積分境界値 $[f(x,y,t)]_0^T$ だが, $n = 0, 1$ を連立させることによって積分境界値を消去すると, 以下の式(5)になる.

$$(u\partial_x + v\partial_y)(g_{\omega_0} - g_0) + j\omega_0 g_{\omega_0} = 0 \quad (5)$$

ここで g_0 は実数であり通常の強度画像である．この式(5)を実部と虚部に分離することで

$$\begin{bmatrix} \partial_x H & \partial_y H \\ \partial_x K & \partial_y K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} h \\ k \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる．ここで， $H = \text{Re}[g_{\omega_0} - g_0]$ ， $K = \text{Im}[g_{\omega_0} - g_0]$ ， $h = \text{Re}[j\omega_0 g_{\omega_0}]$ ， $k = \text{Im}[j\omega_0 g_{\omega_0}]$ とした．この式(6)は各画素で成立するため，各画素の速度 u, v を求めることができる．

3.2 速度場の全変動正則化

速度場 u, v に全変動正則化項を導入するため，文献[4]に従って微小領域 Ω における

$$J = \int \lambda(|\nabla u| + |\nabla v|)d\Omega + \frac{1}{2} \int \{(uH_x + vH_y + h)^2 + (uK_x + vK_y + k)^2\}d\Omega \quad (7)$$

を最小化するように u, v を求める．ここで， $H_x = \partial_x H, H_y = \partial_y H, K_x = \partial_x K, K_y = \partial_y K$ として整理する．

上記の式のままでは解を導くことはできないため補助変数として u', v' を設定し，パラメータ θ を使って u と u' ， v と v' の近さを評価関数に追加すると，

$$J = \int \lambda(|\nabla u| + |\nabla v|)d\Omega + \frac{1}{2\theta} \int \{(u - u')^2 + (v - v')^2\}d\Omega + \frac{1}{2} \int \{(u'H_x + v'H_y + h)^2 + (u'K_x + v'K_y + k)^2\}d\Omega \quad (8)$$

という最小化問題を考えることができる． θ が十分に小さいとき，(8)式は(7)式の解に近似することが期待できる．

4. 実験

時間相関イメージセンサの近くに箱を置き，箱から離れたところにテクスチャが存在する紙をホワイトボードに配置した状態で，時間相関イメージセンサを秒速4cmで箱と壁に対して右に等速直線運動させて実験を行った．

4.1 オプティカルフローの出力

図2に時間相関イメージセンサから得られた強度画像，オプティカルフロー，全変動正則化を適用したオプティカルフローを示す．全変動正則化によって図2（左）の上部のようにテクスチャが存在しない領域にもオプティカルフローが出力され，かつ図2（右）の中央のようにエッジが保存されているのがわかる．

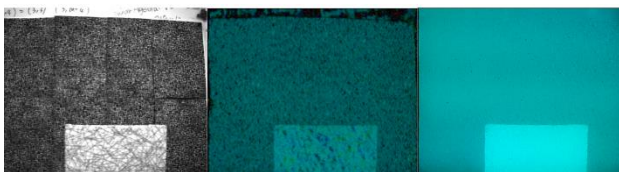


図2．強度画像（左），オプティカルフロー（中），全変動正則化後のオプティカルフロー（右）

4.2 環境形状復元結果

図3に環境形状復元を行う範囲と特徴点の位置を示す．

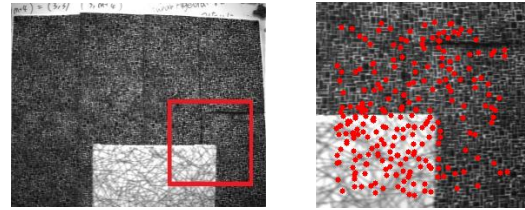


図3．範囲指定（左），特徴点の位置（右）

図4に従来の特徴点を用いた環境形状復元の結果と全変動正則化後のオプティカルフローを用いて特徴点と同じ座標を環境形状復元した結果を示す．奥行きが変わるエッジ付近は図4（右）のように奥行きがはっきりせずなまった環境形状復元になった．

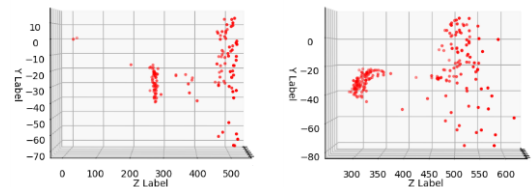


図4．特徴点による環境形状復元（左），全変動正則化後のオプティカルフローによる環境形状復元（右）

5. まとめ

本手法は，Visual SLAMにおける画像取得時にイメージセンサの移動による画像の運動方向へのボケによって対応点探索が困難になるという問題を，時間相関イメージセンサと荷重積分法によるオプティカルフローによって回避し，それを利用したVisual SLAMによる環境形状復元を行った．オプティカルフロー検出の際に全変動正則化項を加えることによって，オプティカルフローが出力されない領域の環境形状復元が可能になった．しかし，エッジ付近のオプティカルフローは図2（右）からは読み取れないような滑らかな変化があり，結果として環境形状復元ではなまった奥行きが出力された．

参考文献

- [1] Berthold K.P, Horn and Brian G, et al, “Determining optical flow”, Artificial intelligence, vol.17, pp.185-203, 1981.
- [2] 安藤繁，魏大比，ボルマズレル，“複素正弦波変調撮像によるオプティカルフロー検出理論および時間相関イメージセンサによる実現”，情報処理学会論文誌，vol.49, no. SIG 6, 2008.
- [3] 北川智裕，大石剛，本谷秀堅，“時間相関イメージセンサを用いた高速なオプティカルフローの局所推定”，情報処理学会研究報告，Vol. 2014-CVIM-190, No. 5, 2014.
- [4] 栗原徹，安藤繁，“変動正則化項を組み込んだ荷重積分法によるオプティカルフロー検出と時間相関イメージセンサによる実装”，計測と制御，vol. 56, no. 11, p. 869-873, 2017.