カラー画像のオプティカルフローと距離画像を用いた 微小運動の直接推定による三次元地図生成 ^{木村 優志[†] 野崎 慎太[†] 増山 岳人[‡] 梅田和昇[‡]}

*中央大学大学院理工学研究科 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27
 ‡中央大学理工学部 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

E-mail: † kimura@sensor.mech.chuo-u.ac.jp, ‡ {masuyama, umeda}@mech.chuo-u.ac.jp

あらまし 本研究では、距離画像と同時にカラー画像のオプティカルフローを用いてセンサの運動パラメー タを直接推定する手法を提案している.提案手法により得られた運動パラメータを用いて連続した2枚の距離 画像の位置合わせを行うことにより三次元地図生成を行っている.また、三次元地図生成実験により、距離画 像の位置合わせを行い、運動パラメータ推定にかかる処理時間を検証している.

キーワード 三次元地図生成,距離画像センサ

1. 序論

近年,自律移動ロボットによる介護や災害現場な どの人が滞在できない環境での調査などが期待され ている.自律移動ロボットが複雑な環境において効 率的に行動するには,ロボット周囲の三次元環境を 知る必要がある.三次元地図を利用することにより, ロボット自身がいる環境における相対位置が分かる ため,障害物が存在する環境であっても効率的に移 動することが可能である.

三次元地図は、画像の特徴量を使用し時系列画像 を対応付け、フレーム間の距離画像を重ね合わせる ことで生成されることが多い.三次元地図生成手法 としては、コーナー点を追跡する手法[1]やエッジ点 を追跡する手法[2]が提案されている.

野崎らは、センサの微小運動に関する運動パラメ ータと距離画像の関係式を用いて運動パラメータを 直接推定し、距離画像の位置合わせを行う手法[3] を提案している.この手法により、1フレームの距 離画像の位置合わせを 5ms 以内に行い、オンライ ンでの計測を可能としている.しかし、運動パラメ ータの推定に法線方向の異なる複数の平面を必要と するため、使用環境が制限されている.そこで、本 研究では、距離画像と同時にカラー画像のオプティ カルフローを用いてセンサの運動パラメータを直接 推定することにより、使用環境の制限を緩和した三 次元地図生成手法を提案する.

2. RGB-D センサ

距離画像およびカラー画像の取得に使用する RGB-D センサの外観を図 1 に示す.本センサは計 測点数 19×19の解像度の距離画像と 640×480の解 像度のカラー画像を最大 200fps で同時に取得でき る.距離計測手法にはアクティブステレオ法を用い る.赤外の 19×19点のマルチスポット光とモノク



図 1 RGB-D センサ

ロ CCD カメラにより距離画像を取得し,カラー CCD カメラによりカラー画像を取得する.コールド ミラーを使用することにより距離画像とカラー画像 を同軸で取得する.

3. センサの運動パラメータ推定

3.1. KLT トラッキング

運動パラメータの推定に使用するカラー画像のオ プティカルフローは,連続した2枚のカラー画像に 対して KLT トラッキング[4]を行い二次元の対応点 として得る.KLT トラッキングは小さな変化をする 特徴点を仮定しているため高速なトラッキングが可 能である一方で大きな変化をする特徴点に対しては しばしば追跡を失敗してしまうという欠点がある. 2節で述べた RGB-D センサは 200fps と高速にカラ ー画像を取得可能であるため,追跡の失敗が少なく 特徴点トラッキングを行うことが可能である.

3.2. カラー画像のオプティカルフローを用い たセンサ運動パラメータ推定

距離計測方向が既知で変化せず、かつセンサの運動が微小であると仮定すると、計測点 $X = (X, Y, Z)^T$ の

運動速度ベクトル**V** = $(V_x, V_y, V_z)^T$ は、計測点 **X**の並進 速度ベクトル**v**₀ = $(v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})^T$, センサ系を原点と した回転速度ベクトル**ω** = $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ を用いて、以 下のように表すことができる.

$$\mathbf{V} = \mathbf{v_0} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{X} \tag{1}$$

また, **X**をカラー画像上に投影した点(u,v)は, 焦 点距離 f, x,y 軸方向の画素間隔 δ_x, δ_y , 画像中心 c_u, c_v より, 以下の式で表すことができる.

$$\mathbf{u} = \frac{X}{Z} \alpha_u + c_u \tag{2}$$

$$\mathbf{v} = \frac{I}{Z} \alpha_v + c_v \tag{3}$$

$$\alpha_u = \frac{J}{\delta_x}, \quad \alpha_v = \frac{J}{\delta_y}$$

前フレームにおけるカラー画像のある特徴点の画 像座標を $(u_1, v_1)^T$,特徴点の三次元座標を $(X, Y, Z)^T$ と する.また,現フレームの対応点の画像座標を $(u_2, v_2)^T$,対応点の三次元座標を $(X + V_x \Delta t, Y + V_y \Delta t, Z + V_z \Delta t)^T$ と表すことが出来る.このとき,フレーム間の オプティカルフロー $(\Delta u, \Delta v)^T$ は,式(2),(3)より以下 のように表すことが出来る.

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \frac{X + V_x \Delta t}{Z + V_x \Delta t} \alpha_u - \frac{X}{Z} \alpha_u \tag{4}$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{Y + v_y \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_v - \frac{Y}{Z} \alpha_v \tag{5}$$

式(1)を式(4), (5)に代入し整理すると以下の式が 成り立つ.

$$Zv_{0x} - (X + Z\Delta u')v_{0z} - (X + Z\Delta u')Y\omega_x + (X^2 + Z^2 + XZ\Delta u')\omega_y - YZ\omega_z = Z^2\Delta u'$$
(6)

$$Zv_{0y} - (Y + Z\Delta v')v_{0z} - (Y^2 + Z^2 + YZ\Delta v')\omega_x + (Y + Z\Delta v')X\omega_y + XZ\omega_z = Z^2\Delta v'$$

$$\Delta u' = \frac{\Delta u}{\alpha_u}, \quad \Delta v' = \frac{\Delta v}{\alpha_v}$$
(7)

式(6),(7)は並進速度ベクトル**v**₀,回転速度ベクト ルωを未知数とする線形の式である.これらを3点 以上で連立して解くことによりセンサの運動パラメ ータを得ることが出来る.

3.3. 特徴点の三次元点の補間

式(6),(7)のカラー画像のオプティカルフローに 基づく拘束式には特徴点の三次元座標が含まれてい る.この時,距離画像とカラー画像の解像度が異な るため,特徴点の三次元座標の補間を行う必要があ る.補間方法を以下に述べる.

距離画像とカラー画像はそれぞれ異なる座標系で 記述されている.距離画像とカラー画像を対応付け るために,距離画像にアフィン変換を行い,計測点 をカラー画像に投影する.そして,図2のように特 徴点の近傍の計測点3点で特徴点を内側に含む三角 形を形成する.補間に使用する計測点3点をそれぞ れP₀,P₁,P₂とするとするとき,以下の式で特徴点の三



次元座標 Xの補間を行う.

 $X = P_0 + m(P_1 - P_0) + n(P_2 - P_0)$ (8) 特徴点 X を通る辺 P_0P_2 に平行な直線と辺 P_0P_1 の 交点を Q_1 ,また,特徴点 X を通る辺 P_0P_1 に平行な直 線と辺 P_0P_2 の交点を Q_2 とする.このとき,mは P_0Q_1 と P_0P_1 の二次元座標における距離の比率,nは P_0Q_2 と P_0P_2 の距離の比率とする.

3.4. 最小二乗平面当てはめによる誤差軽減

3.3 節で述べた特徴点の三次元座標の補間は線形 に行っている.補間した特徴点の三次元座標の誤差 を小さくするためには,特徴点の三次元座標と補間 に使用する計測点3点は同一平面上に存在する必要 がある.そのため,補間に使用する計測点が同一平 面上に存在するかを判定し,補間に使用する3点が 同平面上に存在しない場合,その特徴点を運動パラ メータの推定に使用しない.本手法では,図3に示 すように,特徴点に最も近い計測点と補間に使用す る計測点を含む周囲の計測点9点を用いて最小二乗 平面を作成し,平面と各点との誤差の平均値が閾値 を下回る場合のみ,その特徴点を運動パラメータ推 定に使用する.



図3最小二乗平面当てはめ

4. 三次元地図生成実験

4.1. 実験環境

提案手法を用いて,図4,5の2種類の環境において三次元地図生成を行った.図4は計測対象に平面が多い環境,図4は曲面の多い環境である.本実験では2節にて述べた RGB-D センサを使用する. 距離画像およびカラー画像の取得は人が RGB-D センサを持って移動しながら行い,得られた画像からオフラインで三次元地図生成を行った.三次元地図 生成に使用した距離画像の枚数は図4,5それぞれの環境で100枚である.最小二乗平面当てはめの閾値は5.0mmとした.

4.2. 実験結果

図4の環境の三次元地図生成を行った結果を図6, 7,8に、図5の環境の三次元地図生成を行った結果 を図9,10,11に示す.このうち、図6および図9 は1枚の距離画像、図7および図10は生成した三 次元地図、図8および図11は生成した三次元地図 にテクスチャマッピングを施した結果である.また, 表1にセンサの運動パラメータ推定に要した処理時 間を示す.

実験結果より、平面の多い環境、曲面の多い環境 双方においておおまかに三次元地図生成が行われて いる.しかし、距離画像の位置合わせにずれが生じ ている.本手法では、センサの運動パラメータの推 定にカラー画像に対する KLT の追跡が用いられて いる.そのため、KLT の追跡に誤差が存在すると、 正しい運動パラメータを推定することができず、距 離画像の位置合わせにずれが生じてしまったと考え られる.

また、平面の少ない曲面が多い環境においても平 面が多い環境と同等の距離画像の位置合わせ精度が 得られている.特徴点の三次元座標の補間は、線形 に補間を行っているため、平面に存在しない特徴点 を使用した場合、推定する運動パラメータの誤差が 大きくなる.しかし、最小二乗平面当てはめにより、 曲面上の特徴点でも運動パラメータに大きな誤差を 与えない点のみを使用しているため、距離画像の位 置合わせ精度が低下しなかったと考えられる.

表1より,平面の多い環境,曲面の多い環境いず れの場合においても処理時間が5msを超えており, 200fpsでの三次元地図生成は困難である. KLT に おける対応点探索の計算負荷が大きいことが処理時 間増大の原因として挙げられる. しかし,距離画像 およびカラー画像の計測と本手法による三次元地図 生成を30~60fpsで同時に行うことは可能である.

また,平面の多い環境,曲面の多い環境における 処理時間に差が出ている.平面の多い環境では約 360点,曲面の多い環境では約500の対応点が検出 されている.検出した対応点の数の違いにより処理 時間に差が出た原因として考えられる.



図4 平面の多い環境



図5 曲面の多い環境



図 6 図 4 での 1 枚の距離画像



図7図4での三次元地図



図8図4でのテクスチャマッピング



図9図5での1枚の距離画像



図 10 図 5 での三次元地図



図 11 図 5 でのテクスチャマッピング

表 1	運動パラ	メータ	推定にかか	る処理時間
-----	------	-----	-------	-------

	処理時間[ms]
平面の多い環境	18.93
曲面の多い環境	22.74

5. 結論

距離画像と同時にカラー画像のオプティカルフロ ーを用いてセンサの運動パラメータを直接推定する 手法を提案した.また,三次元地図生成実験により, 距離画像の位置合わせを行い,運動パラメータ推定 にかかる処理時間を検証した.検証した結果,平面 が多い環境,曲面が多い環境いずれにおいてもおお まかに三次元地図生成を行えることを示した.一方 でセンサの運動パラメータ推定に要する処理時間は センサの運動パラメータ推定の処理時間は 20ms 前 後であるため,本実験で用いたセンサのサンプリン グレートである 200fps での計測は困難であり,よ り高速化することが望まれる.

今後の展望として,距離画像の位置合わせ精度の 改善を目指す.また,本実験では最大500の対応点 を KLT で検出しているが,処理時間の短縮手法とし て検出する対応点の数を減少させることが挙げられ る.しかし,対応点の数を過少にした場合,距離画 像の位置合わせの精度が低下するため,位置合わせ の精度が維持できる十分な数を求める必要がある.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26330205 の助成をうけた ものである.

文 献

- 加賀美聡: "ステレオカメラからのオンライン 3 次元 SLAM",日本ロボット学会誌, Vol.26.No.4,pp.310-313,2008.
- [2] 友納正裕: "エッジ点追跡に基づくステレオカ メラを用いた三次元 SLAM",日本ロボット学会 誌, Vol.27,No.7,pp.759-767,2009.
- [3] 野崎慎太,増山岳人,梅田和昇:"距離画像を 用いた微小運動の直接推定による高速三次元 地図生成",第32回日本ロボット学会学術講演 会予稿集,1J2-03,2014.
- [4] C.Tomasi and T.Kanade: "Detection and tracking of point features", Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132,1991.