757 移動ロボットの画像ベース人物追従制御

Image-based person following control for a mobile robot

○ 居山 浩士 (山梨大) 正 大原 伸介 (山梨大) 正 藤森 篤 (山梨大)

Kouji IYAMA, University of Yamanashi, Takeda-4, Kofu, Yamanashi

Shinsuke OH-HARA, University of Yamanashi, Takeda-4, Kofu, Yamanashi

Atsushi FUJIMORI, University of Yamanashi, Takeda-4, Kofu, Yamanashi

Key Words : Image-based control, Person following, mobile robot

1. はじめに

近年、身近な環境で活躍するサービスロボットの開発が盛んに行われている^{[1][2]}。このようなサービスロボットには人物の特定と追跡機能が重要であり、使用環境に依存しないためには、センサとしてカメラを用いることが有効である。

カメラを用いたロボットの制御手法には、画像から推定した3次元位置情報を状態量として用いる位置ベース制御と、カメラ画像平面上の状態量を用いる画像ベース制御に大きく分けられる^[3]。位置ベース制御では、目標物の3次元位置情報を用いるため、ロボット制御系は通常的位置制御系として考えられるが、カメラ画像からの3次元復元はカメラパラメータのモデル誤差に弱く、画像量子化の影響も受けやすい^[4]。それに対して画像ベース制御では、画像上での目標物の特徴量を直接制御することにより3次元復元を行う必要がなくなり、カメラパラメータのモデル誤差に対してロバストであることが知られている^[5]。

本研究では、移動ロボットに1台のカメラを搭載し、得られた画像情報から人物の足部分の検出し、その特徴量を用いた画像ベース制御を行うことで移動ロボットを人物に追従させる方法を提案する。屋内での実験によって提案手法の有効性を検証する。

2. 移動ロボットの画像ベース制御

移動ロボットのモデルを Fig.1 に示す。このモデルにおいてカメラは左右の車輪の中心上に、移動ロボットの進行方向に向けて水平に取り付けられているものとする。しかしながら、車輪中心にカメラがある場合、人物の足元を見るにはカメラを高い位置に配置しなければならない。そこで本研究では Fig.2 に示すように実際のカメラ座標系 $O-XYZ$ 、車輪中心を原点とするカメラ座標系 $O'-X'Y'Z'$ を考える。また実際の画像座標系 O_i-xy 、仮定した画像座標系 $O'_i-x'y'$ を定義する。ただし画像座標系は画像中心を原点とする。実際のカメラの画像座標 (x, y) は回転行列等を作用させることで、車輪中心の画像座標 (x', y') に変換することができる。

特徴点 P の Y' 座標が常に $H = \text{const} (\neq 0)$ と仮定し、点 P の座標を (X', H, Z') とすると、移動ロボットに対する点 P の運動は次式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X' \\ H \\ Z' \end{bmatrix} = -V - \Omega \times \begin{bmatrix} X' \\ H \\ Z' \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、移動ロボットの速度は $V = [0 \ 0 \ v]^T$ 、角速度は $\Omega = [0 \ -\omega \ 0]^T$ である。よって(1)式は、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z' \\ -1 & -X' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表せる。

画像ベース制御では、画像上の情報を用いて制御を行う。

Fig.1 Mobile robot model

Fig.2 Mobile robot equipped with a camera and image plane

そのため、ロボット座標系での点 P の運動モデルに基づいて画像平面上での特徴点 P の運動に変換する。画像平面上での特徴点 P の座標 (x', y') は次式で得られる。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} X'/Z' \\ H/Z' \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 f はカメラの焦点距離である。(3)式を時間に関して微分し、(2)式を用いると、画像平面上での特徴点 P の運動は次式で表せる。

$$\dot{s} = Jv \quad (4)$$

ただし、

$$s = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} \frac{x'y'}{fH} & \frac{f^2 + x'^2}{f} \\ \frac{y'^2}{fH} & \frac{x'y'}{f} \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

である。

画像平面上の特徴点 P を目標値に収束させることで移動ロボットの制御を行う。目標値を s^* とすれば、制御偏差は

$$e = s - s^* \quad (5)$$

となる。(5)式を時間に関して微分すると、 $\dot{e} = Jv$ となる。本研究では取り付けたカメラの傾き角の関係から、特徴点が画像内に存在すれば、画像ヤコビ行列 J は常に正則となる。本

研究での移動ロボットの速度制御は次式で行う。

$$v = -\lambda J^{-1} e \quad (6)$$

ただし、 $\lambda = \text{diag}(\lambda_v, \lambda_\omega)$ であり、 $\lambda_v, \lambda_\omega > 0$ はそれぞれ速度と角速度に関するフィードバックゲインである。

3. 人物追跡手法

本研究では両足の推定器の部分に二つの独立したパーティクルフィルタを用意し、それらを用いて両足を独立して追跡させる^[6]。

はじめに移動ロボットを待機させておき、カメラ前方に人物が進入して、背景差分により追跡人物を決定する。次に追跡人物の特徴として RGB 色空間における人物の足のヒストグラムを作成し、これをパーティクルフィルタの尤度を利用する。パーティクルの状態量・尤度を利用して両足分割線の探索を行う。その後、パーティクルと両足分割線及びエッジ画像を利用することにより両足下端位置を決定する。左右の下端位置座標の平均値を人物位置とし、これを移動ロボットの制御に用いる特徴量とする。

4. 実験環境

本研究では ActiveMedia 社製の Pioneer3 DX-8 にカメラ 1 台を Fig.2 のように 23° 傾けて搭載する。画像処理は OpenCV ライブラリを用いてノート PC に実装して実験を行った。目標値は実際の画像座標での画像中心 $(x, y) = (0, 0)$ (変換した画像座標 $(x', y') = (0, 237)$) とし、フィードバックゲイン $\lambda_v, \lambda_\omega$ はそれぞれ 0.5, 1.4 とした。

5. 実験結果

Fig.3 に示した初期状態で、追跡対象の人物がその場で静止している場合の実験を行った。Fig.4, 5 はそれぞれこのときの特徴点の画像 x, y 座標、Fig.6 は移動ロボットの軌跡を示している。これらの図から特徴点を画像中心 $(0, 0)$ に収束できており、人物下端中心が画像中心に来よう移動ロボットが移動できていることがわかる。

Fig.3 Initial positions of the mobile robot and person

Fig.4 x-coordinate of feature point on image

Fig.5 y-coordinate of feature point on image

Fig.6 Trajectory of the mobile robot

次に曲線を描くように歩く人物に移動ロボットを追従させた場合の実験を行った。このときの特徴点の画像 x, y 座標を Fig.7, 8 に、移動ロボットと人物の軌跡を Fig.9 に示す。この結果から、人物をカメラ画像内にとらえ、移動ロボットが人物に追従できていることがわかる。

6. おわりに

移動ロボットに搭載されたカメラの画像情報を利用することにより人物の両足下端位置を検出し、その特徴量を目標値に収束させるように移動ロボットの速度制御を行う方法を提案した。室内環境における実機実験によって本手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] 中野広樹・下脇克友・山中隆・渡邊睦, 日本ロボット学会誌, 25-5(2007), 707
- [2] 小川陽子・白井良明・島田伸敬, 日本ロボット学会誌, 29-9(2011), 811
- [3] 橋本浩一, システム/制御/情報, 53-9(2009), 411
- [4] 橋本浩一, 日本ロボット学会誌, 27-4(2009), 400
- [5] 倉錦圭太・永田純平・深尾隆則, システム制御情報学会論文誌, 25-4(2012), 75
- [6] 居山浩士・大原伸介・藤森篤, 第30回誘導制御シンポジウム資料, (2013), 37

Fig.7 x-coordinate of feature point on image

Fig.8 y-coordinate of feature point on image

Fig.9 Trajectory of the mobile robot and person