

A4-3 全天周視覚システムを用いた指さしによる移動ロボットの操作 および画像特徴量を用いた自己位置同定に関する研究

福井大学 大学院工学研究科 知能システム工学専攻 進化ロボット研究室
吉田 享平（指導教員：高橋 泰岳，前田 陽一郎）

1. 緒言

近年，日常生活の中で人間と自律移動ロボットとの接する機会が増え，よりロボットが身近になってきている．将来的にはユーザが場合に応じて指示を与えられて動く自律移動ロボットが普及すると考えられる．その際，人間とロボットのインタラクションにおいて直感的なインタフェースが重要である．多くの人々が日常生活の中で何気なく使っている指さし動作によって，直感的な指示が誰にでも簡単に行えると考えられる．

従来のジェスチャ認識に関する研究（例えば [1]）ではロボットとの対面式であるものが多い．これらはロボットが人間と同じ高さで想定されているからである．しかし，家庭内で使うことが想定されている多くのロボットは，人間より背が低く従来の方法をそのまま適用するのは難しい．

一方で，カメラを天井方向に向けて移動ロボットの自己位置同定やナビゲーションを行う研究 [2] がある．天井方向にカメラを向けると，他の移動体によるオクルージョンが比較的少なくなり，安定してランドマーク画像取得が可能となる．また，サッカーを題材にした RoboCup 中型ロボットリーグでは全周環境を取得するために，オムニミラーを取り付けた全方位カメラ [3] をよく用いている．RoboCup 中型ロボットリーグで用いられている．

本研究は，魚眼カメラと全方位カメラを組み合わせ，水平・垂直にほぼ全周環境を取得可能な全天周視覚システムの構築のため，魚眼カメラを天井方向に向けた視覚システムを用いて指さしによる直感的な操作法を提案し，指さし方向の認識によるナビゲーションシステムの評価を行ってきた [4]．しかし，[4] で提案した手法はフィードバック制御を行っていたためユーザが指示した地点にロボットが移動するまで指示を出し続けなくてはならず，ユーザの負担が大きかった．

さらに，RoboCup 中型ロボットリーグで用いられている，サッカーフィールドの白線抽出に基づく自己位置同定手法 [5] は，予めサッカーフィールドの白線のモデルを用意する必要があり，比較的大きなデータベースを保持する必要があり，モデルとの比較誤差の分布が単峰性でないため，計算コストが大きい．

一方で，当研究室でも提案している SIFT や SURF に代表される画像特徴量を用いた自己位置同定手法 [6] がある．画像特徴量を用いた自己位置同定手法では，データベースのデータ量を白線抽出に比べて減らすことが可能となり，より高速な探索が可能となる．

そこで本報告では，画像上のユーザの胴体と手先位置情報，指さされた位置までの方向と距離データから，機械学習の一手法を用いて距離の推定を行う手法の検証とおよび [6] で提案した自己位置同定手法の安定性

の向上にむけて，新たな手法を提案する．ミニチュアサッカーフィールドにおいて，ロボカップ中型リーグに出場しているロボットを用いて実験を行いその有効性を確認する．

2. 全天周視覚システム

本研究室で提案している全天周視覚システムの概略を図 1 に示す．魚眼カメラを天井方向に，全方位カメラを地面方向に取り付けることによって，魚眼カメラで上方方向，全方位カメラで下方方向の画像を取得することができる．これにより，ロボット単体でフィールド上の環境変化に対してロバストなナビゲーションを行うことが可能となる．

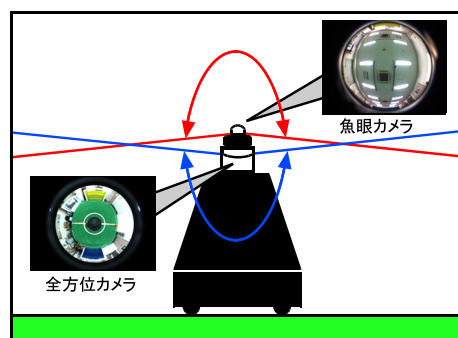


図 1: 全天周視覚システム (横から見た図)

3. 人間指示位置認識システム

[4] で提案した手法はフィードバック制御を行っているため，ユーザが指示した地点にロボットが移動するまで指示を出し続けなくてはならず，ユーザの負担が大きいです．そこで，画像上のユーザの胴体と手先位置情報，指さされた位置までの方向と距離データから，機械学習の一手法である RBF ネットワークを用いて距離の推定を行う手法を検証する．実験ではユーザは赤い服を着て青い手袋をするものと仮定する．教示データとして天井方向を向いた魚眼カメラで取得した画像中の赤色，青色領域の中心座標を用い，EM アルゴリズムで N 個のクラスにクラスタリングを行い，RBF の基底関数として利用する．求めた基底関数を使い，教師データをもとに重みパラメータを最小二乗法で求める．RBF ネットワークに用いた入力ベクトル x ，出力ベクトル y を以下に示す (図 2 参照)． (x_r, y_r) は赤色領域の中心座標， (x_b, y_b) は青色領域の中心座標， (L_x, L_y) は指さされた位置までのロボットの x, y 軸方向の推定移動距離を表す．これにより，ユーザの指示画像一枚を用いてロボットの移動距離と方向を推定するため，指示を出し続ける必要がなくなり，ユーザの負担が軽減されると考えられる．

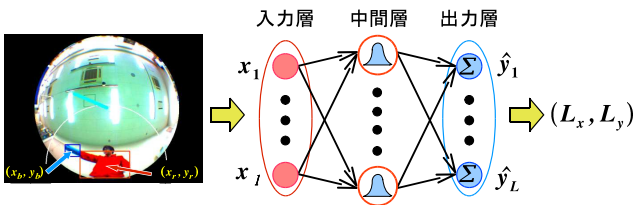


図 2: 指さし位置への RBF ネットワークによるロボットの移動距離の学習

4. 指さし位置への RBF ネットワークによるロボットの移動距離の学習

ミニチュアサッカーフィールドを $1000mm$ 間隔の 3 行 5 列に分割し、計 14 箇所において学習を行った。計測地点を図 3 に示す。教示データは以下の手続きで収集した。ユーザは $[0, 0]mm$ の地点に立ち、サイドラインと垂直方向に体を向ける。ロボットを $[-2000, 2000]mm$ の地点に置き、ユーザは図 3 の $1000mm$ 間隔の黒丸地点 14 箇所を順番に指さす。それぞれの指さし地点の画像から、赤色領域の中心座標と青色領域の中心座標を複数回取得する。この作業を同様に 14 箇所で行う。得られたデータから、RBF ネットワークを用いて学習を行う。なお、今回の基底関数の数は 100 とした。

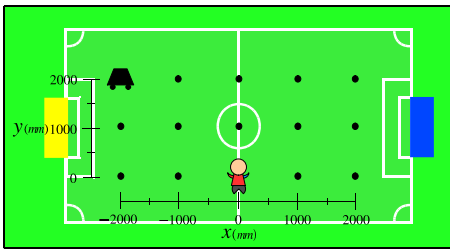


図 3: 計測地点

実験結果を図 4, 5 に示す。 x, y 軸はユーザが指さす位置のフィールド座標、赤色の点は計測地点、緑色の矢印は RBF ネットワークで求めた推定移動距離を表している。推定移動距離は大きいもので約 $2000mm$ の誤差が生じた。これはロボットの幅が約 $500mm$ であることを考慮しても、あまり良い結果でないことがわかる。しかし精度は低いものの、求めたすべての地点で推定移動距離は目標値に近づく傾向が得られた。このことから誤差が生じた原因として考えられる、設定する基底関数の数や、色抽出の精度によって大きく変化する赤色・青色領域の中心座標、青色の手袋を右手に着用することによって生じる、腕の交差による x 軸正方向と負方向に対しての手先と胴体との距離の差などを改善すれば、より精度の高い推定移動距離が得られると考えられる。

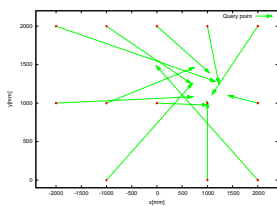


図 4: $[1000, 1000]mm$ 地点の推定移動距離

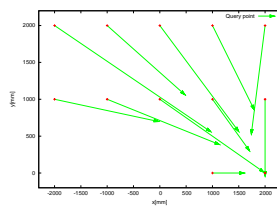


図 5: $[2000, 0]mm$ 地点の推定移動距離

5. サッカーフィールドの局所特徴量と歪み補正に基づく自己位置同定手法

下記にサッカーフィールドの局所特徴量と、その歪み補正を行った特徴点の照合を用いた自己位置同定手法の処理を示す。

1. テンプレート画像の取得

図 6 に示すようにサッカーフィールドを格子状に分割し、全ての格子上で全方位カメラを用いて予めテンプレート画像を取得する。

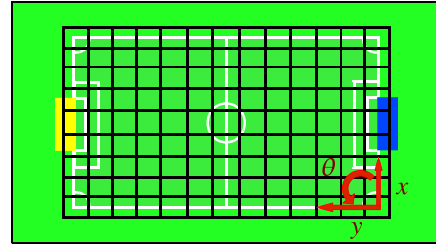


図 6: サッカーフィールドの局所特徴量と歪み補正に基づく自己位置同定手法におけるフィールド座標系

2. 歪み補正と SURF の抽出

カメラ座標系からロボット座標系へ変換する作業を歪み補正とここでは呼ぶ。式 (1) に示す近似関数により歪み補正を行い、ロボット座標系にマッピングする。

$$f(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + g \quad (1)$$

図 7 は全方位画像の中心からの距離 r と、ロボット座標系中心からの実際の距離 $f(r)$ との関係を示している。式 (1) のパラメータ a, b, c, d, e, g は、図 7 のデータから最小自乗法により求めている。ここでのパラメータは、 $a = 1.50031 \times 10^{-11}$, $b = -2.85435 \times 10^{-8}$, $c = 2.12382 \times 10^{-5}$, $d = -0.000792477$, $e = 1.61012$, $g = -6.51017$ である。歪み補正を施したテンプレート画像と現在地画像から SURF を抽出し、特徴点同士のマッチングを行う。SURF を抽出する際はサッカーフィールド内のみで抽出を行うため、マスク画像を作成する。マスク画像は、サッカーフィールドの緑色領域を抽出し収縮・膨張処理をそれぞれ複数回行うことで作成する。入力画像の例を図 4.8(a) に、歪み補正の画像の例を図 4.8(b) に、マスク画像の例を図 4.8(c) に、マスク画像を用いることで、テンプレート画像と現在地画像からサッカーフィールド内において SURF を抽出する。SURF を抽出した例を図 4.8(d) に示す。歪み補正を行い SURF を抽出し、ロボット座標系にマッピングした画像を図 9 に示す。一枚目の画像はテンプレート画像、二枚目の画像は現在地画像、三枚目の画像はサッカーフィールドの画像特徴量と歪み補正に基づく自己位置同定手法によるマッチングである、

3. 平行移動量と回転量の算出

ロボット座標系にマッピングした現在地画像の各特徴点を $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$ 方向に移動させていき、口

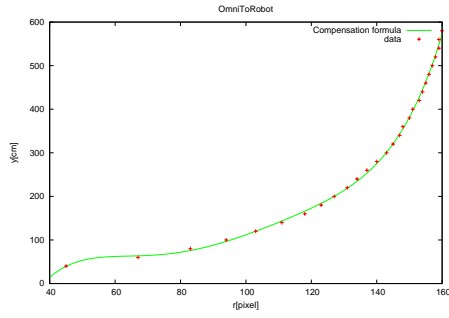
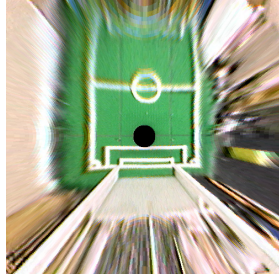


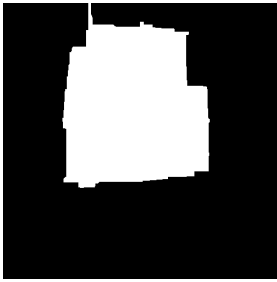
図 7: カメラ画像の距離 r 座標とロボット座標系上での距離の関係式



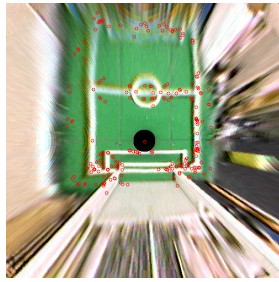
(a) 入力画像



(b) 歪み補正した画像



(c) マスク画像



(d) 歪み補正と特徴点の画像

図 8: 自己位置同定手法のための歪み補正と画像特徴量抽出

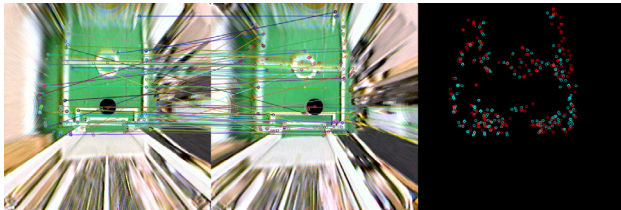


図 9: 歪み補正した後画像特徴量を抽出しマッチングを取った様子

ロボット座標系にマッピングしたテンプレート画像の各特徴点との距離の 2 乗和が最も小さくなる $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$ を探索する．探索方法として以下の手法を用いる．

$${}^t p_i = \begin{pmatrix} {}^t X & {}^t Y & 1 \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

$${}^c p_i = \begin{pmatrix} {}^c X & {}^c Y & 1 \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

$$A(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta) = \begin{pmatrix} \cos \Delta \theta & -\sin \Delta \theta & \Delta x \\ \sin \Delta \theta & \cos \Delta \theta & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$E(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta) = \sum_{i=0}^M \left\| {}^t p_i - A(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta) {}^c p_i \right\|^2 \quad (5)$$

E : 誤差

$(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$: ロボット座標系にマッピングした現在地画像の特徴点の移動量

M : マッチングのとれた特徴点の数

${}^t p_i$: ロボット座標系にマッピングしたテンプレート画像の特徴点 i の座標

${}^c p_i$: ロボット座標系にマッピングした現在地画像の特徴点 i の座標

A : 変換行列

[I] step 0:

式 (5) において誤差 E を $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta) = (0, 0, 0)$ として計算する．

[II] step t :

時刻 t において, 式 (5) のうち $(\Delta x, \Delta y) = (\Delta x_t, \Delta y_t)$ として $\Delta \theta$ のみを最小値から最大値まで変化させ, 誤差 E が最も小さくなるときの $\Delta \theta_{t+1}$ を求める．

[III] step t' :

式 (5) のうち $(\Delta x, \Delta \theta) = (\Delta x_t, \Delta \theta_{t+1})$ として Δy のみを最小値から最大値まで変化させ, 誤差 E が最も小さくなるときの Δy_{t+1} を求める．

[IV] step t'' :

式 (5) のうち $(\Delta y, \Delta \theta) = (\Delta y_{t+1}, \Delta \theta_{t+1})$ として Δx のみを最小値から最大値まで変化させ, 誤差 E が最も小さくなるときの Δx_{t+1} を求める．

[V] step $t+1$:

t を $t+1$ とし, 誤差 E が減少しなくなるまで (b) から繰り返す．

全探索の場合は式 (5) において最小となる誤差 E を確実に探索できるが計算に時間がかかる．しかし誤差 E の分布が単峰性となる場合は, 上記アルゴリズムを用いることで高速に探索できる．

4. ノイズの除去による高精度処理

次に現在地画像の各特徴点を, 上記で求めた各特徴点の距離の 2 乗和が最も小さくなる $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$ だけ移動させ, テンプレート画像の各特徴点とマッチングのとれた特徴点同士の x, y の各方向における距離の平均と標準偏差を求める．特徴点同士の x, y の距離の平均と標準偏差から外れているものを除き, 誤対応除去を行う．再度 (3. 平行移動量と回転量の算出) と同様に探索し, その移動量をテンプレートからの平行移動量と回転量とする．

6. 全方位カメラによる自己位置同定実験

6.1 サッカーフィールドの歪み補正と局所特微量に基づく自己位置同定実験

研究室内に設置してあるミニチュアサッカーフィールドにおいてテンプレート画像を1枚取得し、現在地の画像としてロボットをテンプレート画像取得地点から x 軸方向に $-2000 \sim 2000mm$ まで $250mm$ 毎に平行移動させて取得した画像を用いて実験を行った。

平行移動させて現在地画像を取得し、平行移動量を計算した時の実験結果について x 方向の誤差を図10に示す。図中の緑色の線は理想値を表しており、赤いプラス記号は x 方向の誤差を表している。

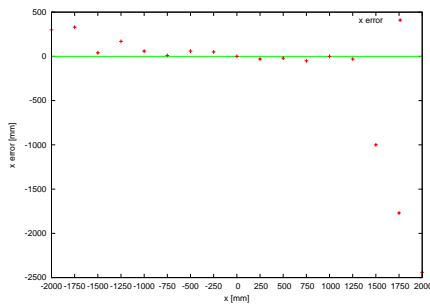


図10: サッカーフィールドの歪み補正と局所特微量に基づく自己位置同定における、ロボットをテンプレート画像取得位置から x 軸方向に平行移動させて現在地画像を取得し、平行移動量を計算した時の x 方向の誤差

6.2 リアルタイムにおけるサッカーフィールドの歪み補正と局所特微量に基づく自己位置同定実験

研究室内に設置してあるミニチュアサッカーフィールドにおいてテンプレート画像を1枚取得し、現在地の画像としてロボットをテンプレート画像取得地点から x 軸方向に $-2000 \sim 2000mm$ までリアルタイムに平行移動させて取得した画像を用いて実験を行った。

リアルタイムに平行移動させて現在地画像を取得し、平行移動量を計算した時の実験結果について、 x 方向の探索値を図11に示す。 x 軸は画像を取得した時間、 y 軸は x 方向の推定距離、赤色の点は探索値を表している。

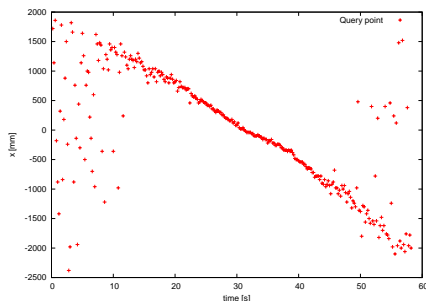


図11: リアルタイムにおけるサッカーフィールドの歪み補正と局所特微量に基づく自己位置同定における、ロボットをテンプレート画像取得位置から x 軸方向に平行移動させて現在地画像を取得し、平行移動量を計算した時の x 方向の探索値

6.3 全方位カメラによる自己位置同定実験の考察

サッカーフィールドの歪み補正と局所特微量に基づく自己位置同定実験では、テンプレート画像取得位置から x 軸正方向に $1250mm$ 、 x 軸負方向に $1500mm$ 程度離れていてもテンプレート画像からの平行移動量をほぼ正確に算出することができるとわかった。またリアルタイムにおいても、テンプレート画像取得位置から x 軸正方向に $1000mm$ 、 x 軸負方向に $1500mm$ 程度離れていてもテンプレート画像からの平行移動量をほぼ正確に算出することができるとわかった。それ以上離れてしまうと、歪み補正の関係で局所特微量がうまく抽出できなかった。複数のテンプレート画像を用いることにより歪み補正の問題点を解決し、より広い範囲の自己位置同定が可能と考えられる。

7. 結言

本研究は、魚眼カメラと全方位カメラを組み合わせ、水平・垂直にほぼ全周環境を取得可能な全天周視覚システムの構築のため、直感的な指さしによる操作法とSIFTやSURFに代表される画像特微量を用いた自己位置同定手法を提案し、本報告では、画像上のユーザの胴体と手先位置情報、指さされた位置までの方向と距離データから、機械学習の一手法を用いて距離の推定を行う手法の検証と、当研究室で提案している画像特微量を用いた自己位置同定手法の安定性向上にむけて、新しい手法を提案した。

RBFネットワークを用いた距離の推定では、精度は低いものの求めた推定移動距離は目標値に近づく傾向が得られた。サッカーフィールドの歪み補正と局所特微量に基づく自己位置同定実験では、リアルタイムにおいてもテンプレート画像取得位置から x 軸正方向に $1000mm$ 、 x 軸負方向に $1500mm$ 程度離れていてもテンプレート画像からの平行移動量を正確に算出することができるとわかった。

今後の課題として、人間指示位置認識システムでは、教示データの効率的な収集方法の検討、画像特微量を用いる自己位置同定手法では、障害物がフィールド上にある場合でもロバストな自己位置同定ができるかの検証が挙げられる。

参考文献

- [1] 岡隆一、西村拓一、矢部博明、ジェスチャ動作の動画像からのスポッティング認識について、情報処理学会論文誌、Vol. 43、No. SIG-4(CVIM-4)、pp. 54-68 (2002).
- [2] 日比野文則、高橋泰岳、前田陽一郎、天井画像の局所特微量に基づく自律移動ロボットの自己位置同定、FAN2010、No. S7-2-3 (2010).
- [3] 山澤一誠、ミラーを用いた全方位カメラの原理と特徴、情報処理学会研究報告、CVIM、[コンピュータビジョンとイメージメディア]、Vol. 2001、No. 4、pp. 155-160 (2001).
- [4] Y. Takahashi, K. Yoshida, F. Hibino, and Y. Maeda, Human pointing navigation interface for mobile robot with spherical vision system, *Journal of advanced computational intelligence and intelligent*, Vol. 15, No. 7, pp. 869-877 (2011).
- [5] 石原悠、鈴木宗文、高橋正樹、自律移動ロボットにおける処理時間と推定精度を考慮したモンテカルロ位置推定法、第31回人工知能学会AIチャレンジ研究会、SIG-Challenge-B001-4 (2010).
- [6] 日比野文則、全天周視覚システムによる画像特微量を用いた自己位置同定に関する研究、学位論文、福井大学大学院工学研究科 (2012).