Projection-based Mathing法を用いた低照度環境下における実時間認識

Real-time Recognition in Low Illuminance Environment by Projection-based Matching Method

学 ○小河 亮介 (岡山大) 川上 拓朗 (岡山大) Æ 寇 ギョウ郡 (岡山大) 正 田 宏志 (岡山大) Æ 松野 隆幸(岡山大) Æ 見浪 護(岡山大) Ryosuke KOGAWA, Okayama University, pjlb33yu@s.okayama-u.ac.jp Takuro KAWAKAMI, Okayama University Yejun KOU, Okayama University Hongzhi TIAN, Okayama University Takayuki MATSUNO, Okayama University Mamoru MINAMI, Okayama University

Nowadays, a decreasing birthrate and an aging population have been progressing in Japan, and it caused a problem of a decrease in the labor force. Therefore, the needs of robots to replace the work that humans did far have been increasing. To replace the work, robots need to operate autonomously in constant changing environments. In order to solve this problem, a method called visual servoing was proposed. Visual servoing is a method of controlling the operation of the robot by visual information obtained from the visual sensor. But the conventional method requires prior knowledge of the target concerning the shape, size and color of the object. This impairs the flexibility of the system in constantly changing environment. So our research group proposed and has been studying Projection-based Matching Method that does not require prior knowledge. In our laboratory, we have been studying robots to explore the ocean. We would like to track target in the ocean. In this study, the accuracy of position of objects that are estimated in low illuminance environment by this method is verified.

Key Words: Stereo vision, Visual servo, Position recognition

1 緒言

今日、日本では少子高齢化問題が深刻化している. 労働力確保 のための解決法として考えられるのはこれまで人間が行っていた 作業をロボットが代替することである.人間が行ってきた作業を 代替するために、ロボットは常に変化する環境下で自律的に動作 することを必要とされている.これを実現するためにビジュアル サーボという手法が提案されている.これは視覚センサから得た 情報をフィードバックし、ロボットを制御する手法のことであり、 複数の方法が研究されている. しかし, 従来の研究では事前知識 として認識対象物の大きさや形状,色といった情報が必要であり, 常に変化する環境や未知の環境下では機能しない. そのため、我々 の研究グループは事前知識を必要としない認識手法を提案し,研 究を行っている.また,我々の研究室では水中探査ロボットの研究 を行っている.本研究では水中を探索している際に発見した生物 をビジュアルサーボを用いて追従・捕獲することを目標としてい る.本報では海底を想定した低照度環境での対象物の認識につい ての実験を行ないその精度について検証をする.

2 システム概要

本研究で述べるロボットシステムに用いている対象物の認識手法は、静止画像認識が基本となる.よって、ここでは、1 枚の静止画像に対する認識手法の概要を説明する.図1にProjectionbased Matching 法の手順の概略図を示す.PA10に搭載される カメラは2台のカメラを用いる.基準点を手先座標系 Σ_H とする. また基準座標系を Σ_W とし、左のカメラ座標系を Σ_{CL} 、画像座標 系を Σ_{IL} 、右のカメラ座標系を Σ_{CR} 、画像座標系を Σ_{IR} とする. 左カメラ画像に映った対象物をモデルとして抽出し、3次元空間 における位置/姿勢 $\phi = ({}^{CL}z_{MiC}, {}^{Hx}\theta_M, {}^{Hy}\theta_M)$ を遺伝的アル ゴリズム (GA)の遺伝子により決定する.このとき、 ${}^{CL}x_{MiC}$ お

よび $^{CL}y_{MiC}$ は $^{CL}z_{MiC}$ より求められる. このモデルを左カメ ラ画像から3次元空間へ逆射影し右カメラ画像に再度射影するこ とで、2次元の平面モデルを得る.この平面モデルと右カメラ画 像との照合により適合度関数を計算し,評価を行う.そして,空 間中の平面モデルの位置/姿勢 φ(3 変数) が対象物の位置/姿勢 と一致したとき、適合度関数の値が最大値を示す. そのため、対 象物の認識問題は、適合度関数の最大値探索問題に変換できる. 適合度関数の最大値を探索・発見する場合,様々な方法があるが, -番単純かつ簡単な方法は全探索法である.これは,全てのとり うる値を計算することで最大値を発見するものであり、必ず最大 値を発見できるが、計算時間を多く費やすといった欠点を持って いる.目標としているビジュアルサーボは動画像認識であり、動 画像認識は計算処理が短いことが重要であるため、本研究では最 適解探索に GA を適用することで、効率良く短時間で最大値探索 処理を行う. そして, GA が収束した時, GA の遺伝子により決 ることで、対象物の位置/姿勢が計測できる.

3 位置姿勢認識

3.1 射影変換行列

図 2(a) に示す中心射影の関係から、カメラの焦点距離を f、カ メラ座標 Σ_C における x 軸、y 軸の距離 [mm] と画像座標系 Σ_I における x 軸、y 軸の距離 [pixel] の比を η_x 、 η_y [mm/pixel] と する.また、 Σ_C における任意の座標 (Cx_i , Cy_i , Cz_i) は、 Σ_I で 像 (Ix_i , Iy_i) となる.図 2(b) より $\triangle oab$ と $\triangle oa'b'$ が相似である ことより、

$$ab: a'b' = bo: b'o \tag{1}$$



Fig.1 Projection-based Method process

と表され,これは

$$X:Y = A:B \tag{2}$$

$$\frac{X}{Y} = \frac{A}{B} \tag{3}$$

と書ける。よって、任意の点と像の座標関係は図 2(a) より次式 で表される.

$$\frac{{}^{I}y_{i}\eta_{y}}{{}^{C}y_{i}} = \frac{a}{{}^{C}z_{i}} \tag{4}$$

$$\frac{{}^{I}x_{i}\eta_{x}}{{}^{C}x_{i}} = \frac{a}{{}^{C}z_{i}} \tag{5}$$

また、対象物からのカメラの距離 a は、焦点距離 f に比べ大き いので、 $a \doteq f$ と近似できると考えられる.

$$\begin{bmatrix} {}^{I}x_{i} \\ {}^{I}y_{i} \end{bmatrix} = \frac{1}{C_{z_{i}}} \begin{bmatrix} f/\eta_{x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/\eta_{y} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{x_{i}} \\ C_{y_{i}} \\ C_{z_{i}} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(6)

これより,カメラへの射影変換行列を **P** と表し,次のようにま とめる.

$$\boldsymbol{P} = \frac{1}{C_{z_i}} \begin{bmatrix} f/\eta_x & 0 & 0 & 0\\ 0 & f/\eta_y & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(7)



Fig.2 Perspective projection schematic

3.2 左右カメラへの射影変換

まず、手先座標系 Σ_H とモデル座標系 Σ_M の関係は、 Σ_H から Σ_M への同次変換行列を ${}^{H}T_M$ 、 Σ_H 及び Σ_M で表した、空間 中に逆射影された i 番目のモデル上の任意座標を ${}^{H}r_i$ 、 ${}^{M}r_i$ とす ると、 ${}^{H}r_i$ は、

$${}^{H}\boldsymbol{r}_{Mij} = {}^{H}\boldsymbol{T}_{Mi} {}^{Mi}\boldsymbol{r}_{i} \tag{8}$$

と表される. 左カメラ座標系 Σ_{CL} と手先座標系 Σ_{H} の関係は, Σ_{CL} から Σ_{H} への同次変換行列を $^{CL}T_{H}$ とすると, $^{CL}r_{i}$ は,

$$^{CL}\boldsymbol{r}_{Mij} = {}^{CL}\boldsymbol{T}_{H} {}^{H}\boldsymbol{r}_{Mij} \tag{9}$$

と表される. 左画像座標系 Σ_{IL} と左カメラ座標系 Σ_{CL} の関係 は、 ${}^{IR}\boldsymbol{r}_i$ と同様に、射影変換行列 \boldsymbol{P} を使うと、 ${}^{IL}\boldsymbol{r}_i$ は、

$$^{IL}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P}^{\ CL}\boldsymbol{r}_{Mij} \tag{10}$$

と表される.

また、右カメラ座標系 Σ_{CR} と手先座標系 Σ_H の関係は、 Σ_{CR} から Σ_H への同次変換行列を ${}^{CR}T_H$ とすると、 ${}^{CR}r_i$ は、

$${}^{CR}\boldsymbol{r}_{Mij} = {}^{CR}\boldsymbol{T}_{H} {}^{H}\boldsymbol{r}_{Mij} \tag{11}$$

と表される.右画像座標系 Σ_{IR} と右カメラ座標系 Σ_{CR} の関係 は、射影行列 P を使い、 $^{CR}r_i$ を Σ_{IR} に対して射影することで、 $^{IR}r_i$ は、

$${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} \, {}^{CR}\boldsymbol{r}_{Mij} \tag{12}$$

と表される.よって,式(8),(9),(10)より左画像への射影変換 が,式(8),(11),(12)より右画像への射影変換が求まる.

$${}^{IL}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} {}^{CL}\boldsymbol{T}_{H} {}^{H}\boldsymbol{T}_{Mi} {}^{Mi}\boldsymbol{r}_{j}$$
(13)

$${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} {}^{CR}\boldsymbol{T}_{H} {}^{H}\boldsymbol{T}_{Mi} {}^{Mi}\boldsymbol{r}_{j} \qquad (14)$$

本研究では、手先にカメラを直接固定しているため、 $^{CL}T_H$ 、 $^{CR}T_H$ は既知である.そこで、式 (13)、(14) を次のように変形 する.

$${}^{IL}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} {}^{CL}\boldsymbol{T}_{Mi} {}^{Mi}\boldsymbol{r}_j \qquad (15)$$

$${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} {}^{CR}\boldsymbol{T}_{Mi} {}^{Mi}\boldsymbol{r}_j \qquad (16)$$

3.3 左カメラからの逆射影変換

Projection-based Matching 法では、 左カメラにおいて作成し たモデルを逆射影変換を用いて空間中へ投影する. この逆射影変 換を行うために、まず射影変換行列式 (7) に対応する逆射影変換 行列 P^+ を定義する.

$$\boldsymbol{P}^{+}(^{C}z_{i}) = {}^{C}z_{i} \begin{bmatrix} \frac{\eta_{x}}{f} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{\eta_{y}}{f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{T}$$
(17)

またこれによる Σ_I から Σ_C への逆射影変換は以下のとおりである.

$$\begin{bmatrix} {}^{C}x_{i} \\ {}^{C}y_{i} \\ {}^{C}z_{i} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{P}^{+} ({}^{C}z_{i}) \begin{bmatrix} {}^{I}x_{i} \\ {}^{I}y_{i} \end{bmatrix} + (\boldsymbol{I}_{4} - \boldsymbol{P}^{+}\boldsymbol{P}) \begin{bmatrix} {}^{l}_{1} \\ {}^{l}_{2} \\ {}^{l}_{3} \\ {}^{l}_{4} \end{bmatrix}$$
(18)

 C_{z_i} は事前に仮定しなければならないが、 C_{z_i} を1つ仮定すると、それに対応する C_{x_i} 、 C_{y_i} がそれぞれ一意に決定される.

$$\begin{cases} {}^{C}x_{i} = f({}^{C}z_{i}) = {}^{C}z_{i}\frac{\eta_{x}}{f}{}^{I}x_{i} \\ {}^{C}y_{i} = f({}^{C}z_{i}) = {}^{C}z_{i}\frac{\eta_{y}}{f}{}^{I}y_{i} \end{cases}$$
(19)

3.4 適合度関数の定義

-0

左右ビデオカメラから入力される画像は,0~359 で表され る色相値によって構成される. 探索モデルは Fig.3 で示される ように対象物の評価とその周囲の色相変化を評価するために, 内部領域 $S_{R,in}, S_{L,in}$ と帯領域 $S_{R,out}$ と $S_{L,out}$ によって構成 される. ここで, 右画像領域 ${}^{IR}r_i^j(\phi_M^j)$ における色相の評価値を $p_{RH}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))$ 輝度の評価値を $p_{RB}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))$ とする.

No. 20-2 Proceedings of the 2020 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kanazawa, Japan, May 27-29, 2020

3.4.1 色相値の適合度関数

色相値に基づく評価値の設定は次のようになる.対象物を評価する内部領域において、モデルの色相値とカメラ画像の色相値の差が ± 20 以内の場合、評価値を "+2"、 ± 20 範囲外の場合は、評価値を "-1"と設定する.背影を評価する帯領域ではモデルの 色相値とカメラ画像の色相値の差が ± 20 以内の場合、評価値を " ± 1 "、 ± 20 範囲外の場合は、評価値を "-1 と設定する.

$$F_{RH}(\phi_{M}^{i}) = \left(\sum_{\substack{IR_{r_{i}^{j} \in \\s_{R,in}(\phi_{M}^{i})}}} p_{RH,in}(^{IR}r_{i}^{j}(\phi_{M}^{j})) + \sum_{\substack{IR_{r_{i}^{j} \in \\s_{R,in}(\phi_{M}^{i})}}} p_{RH,in}(^{IR}r_{i}^{j}(\phi_{M}^{j}))\right) / (2 \cdot N_{R,in} + 0.1 \cdot N_{R,out})$$
(20)

$$p_{RH,in}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j)) = \begin{cases} 2, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))) \\ -H_{MR,in}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))| \le 20); \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$p_{RH,out}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j)) = \begin{cases} 0.1, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))) \\ & -H_{MR,out}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))| \le 20); \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$
(22)

3.4.2 輝度値の適合度関数

輝度値に基づく評価値の設定も同様に対象物を評価する内部領 域において,モデルの輝度値とカメラ画像の輝度値の差が±20以 内の場合,評価値を"+2",±20範囲外の場合は,評価値を"-1" と設定する.背影を評価する帯領域ではモデルの輝度値とカメラ 画像の輝度値の差が±20以内の場合,評価値を"+1",±20範囲 外の場合は,評価値を"-1と設定する.このような正負の評価値 をもつ探索モデルと画像との相関を表す適合度関数を次式に示す.

$$F_{RB}(\phi_M^i) = \left(\sum_{\substack{IR_{r_i}^j \in \\ s_{R,in}(\phi_M^i)}} p_{RB,in}({}^{IR}r_{-}^j i(\phi_M^j)) + \sum_{\substack{IR_{r_j}^j \in \\ p_{RB,in}({}^{IR}r_{i}^j(\phi_M^j))}} p_{RB,in}({}^{IR}r_{i}^j(\phi_M^j))\right) / (2 \cdot N_{R,in} + 0.1 \cdot N_{R,out}) \quad (23)$$

 $s_{R,out}(\phi_M^i)$

$$p_{RB,in}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j)) = \begin{cases} 2, & \text{if}(|B_{IR}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))) \\ & -B_{MR,in}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))| \le 20); \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$
(24)

$$p_{RB,out}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j)) = \begin{cases} 0.1, & \text{if}(|B_{IR}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))) \\ & -B_{MR,out}({}^{IR}r_i^j(\phi_M^j))| \le 20); \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$
(25)

色相値と輝度値に基づく適合度関数を用いた総適合度関数 $F_R(\phi_M^i)$ は次式になる

$$F_{R}(\phi_{M}^{i}) = F_{RH}(\phi_{M}^{i}) + F_{RB}(\phi_{M}^{i}) - (F_{RH}(\phi_{M}^{i}) \cdot F_{RB}(\phi_{M}^{i}))$$
(26)

これを用いることにより、右の画像と再射影された平面モデルとの一致度を評価する.この適合度関数 $F(\phi_M^i)$ は、空間中に逆射影されたモデルの持つ位置/姿勢情報より一意に決定する関数であり、逆射影されたモデルが対象物と一致すれば、右画像においても対象物と探索モデルが一致して適合度関数は最大値を示すはずである.ただし、 $F(\phi_M^i) \leq 0$ の場合、 $F(\phi_M^i) = 0$ とする.



Fig.3 Searching model

4 認識実験結果

(21) 実験環境の概要図を Fig.4 に示す.また,今回の実験ではカニ とヒトデの模型を使った.



Fig.4 Schematic view

続いて低照度の高低差のある環境での認識実験の結果 Fig5 ~7 に示す. Target1 は約 100[mm] の台の上に置いてあ る. 対象物は Target1(カニ) と Target2(ヒトデ) である.Target1 から Target2 への認識を二回行い位置を測定した.Target1 のハンド座標系から見た座標は (x,y,z)=(-170,0,740)[mm] であり,Target2 の座標は (x,y,z)=(170,-80,840) であった. 実 験結果を Fig.24~26 に示す.Target1 の 1 回目の測定値は (x,y,z) = (-153,-13,738)[mm] であり 2 回目は (x,y,z) =(-163,-23,743)[mm] であった. 実測値との平均誤差は 1 回目 が ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)=(17,13,2)[mm] であり,2 回目が ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)=(7,23,3)[mm] であった. Target2 の 1 回目の測定値 は (x,y,z) = (153,-79,795)[mm] であり,2 回目は (x,y,z) =(146,-82,793)[mm] であった. 実測値との平均誤差は 1 回目が $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)=(17,1,46)[mm]$ であった.2 回目が ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)=(24,2,47)[mm] であった.



Fig.5 The result of target 1 and target 2 position in X-Y axises

結言

 $\mathbf{5}$

本報告では、ステレオビジョンによる逆射影を用いての対象物 位置姿勢認識法の理論と低照度環境下での認識実験の結果につい て示した. 今後は水中ロボットを用いた実験を行いたい.

参考文献

- Petsch, Susanne, and Darius Burschka. "Estimation of spatiotemporal object properties for manipulation tasks from observation of humans." Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010.
- [2] Myint, Myo, et al. "Visual-servo-based autonomous docking system for underwater vehicle using dual-eyes camera 3D-pose tracking." 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2015.
- [3] 酒井修二,高橋徹,伊藤康一,青木孝文,& 運天弘樹. (2011). 汎用 デジタルカメラを用いた 2 視点からの 3 次元復元.研究報告コン ピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2011(4), 1-8.
- [4] Wang, Min, and Weiguang Liu. "Advanced algorithm based on SIFT and its application in binocular stereo vision." Jisuanji Gongcheng yu Yingyong(Computer Engineering and Applications) 49.2 (2013): 203-206.
- [5] 吉川恒夫, "ロボット制御基礎論", pp.222-225 (1988), コロナ社



Fig.6 The result of target 1 and target 2 position in Z axises



Fig.7 The result of target 1 and target 2 fitness