ステレオビジョンによる新しい空間認識手法の提案

Proposal of New Space Recognition Method by Stereo Vision

○川上 拓朗 (岡山大)				山本 太郎 (岡山大)		
Æ	寇	ギョウ郡 (岡山大)	Æ	田友	宏志 (岡山大)	
	李	想 (岡山大)	Æ	戸田	雄一郎 (岡山大)	
Æ	松野	▶ 隆幸 (岡山大)	Æ	見浪	護 (岡山大)	
Tak	uro	KAWAKAMI, Okaya	ama	Univer	rsity, p4zi5w9s@s.okayama-u.ac.jp	
Taro YAMAMOTO, Okayama University						
Yejı	Yejun KOU, Okayama University					
Hor	aro YAMAMOTO, Okayama University ejun KOU, Okayama University ongzhi TIAN, Okayama University jang LI, Okayama University					
Xia	ng L	I, Okayama Univers	$_{ m ity}$			
Yuichiro TODA, Okayama University						
Tak	ayuk	i MATSUNO, Okay	ama	Univer	rsity	
Mamoru MINAMI, Okayama University						

Requirement for robots has been changed from the work that performed by operators via robots, to the autonomous action took by themselves. Visual servoing is one of a method to control robots' motion by installing the visual information into the feedback loop. Therefore, it is expected to enable robots to work in the constantly changing environment or unknown environment. However, to recognize target object from images, some degree of predefined knowledge is needed. Our research group proposed a new system that performs visual servoing that can avoid corresponding points identification problem. In our laboratory, we have been studying robots to explore the ocean. We would like to track new target sea animals with visual servoing in the ocean. In this study, the accuracy of position estimation of the model of marine organisms by this system is verified.

Key Words: Stereo vision, Visual servo, Position recognition

1 緒言

我々は、海底探索ロボットの研究を行っている. ロボットが海中 を探索中に新種の魚や貝などをみつけた際に、捕獲して地上まで 持って帰ることを可能にしたい. そのロボットを制御する方式と してビジュアルサーボを使用している. これは視覚情報をフィー ドバックループに組み込む方式であり、常に変化する環境や未知 環境で働くロボットへの適用が期待されている.現在でもこれを 実現するための複数の方法が研究されているが、画像から対象を 認識するためには、文献 [1,2] のようにその対象に関するある程 度の事前知識が必要である. 文献 [3, 4] のようにエピポーラ幾何 を用いる場合では、画像中の対応点を探す必要があったりと課題 も多い. つまり,水中など常に変化する環境では従来のようなビ ジュアルサーボの手法が使えない.そこで、我々の研究グループで はそれらを用いずにビジュアルサーボを行うシステムを開発して いる.カメラに映った画像からモデルを作成し、3次元空間へ逆 射影を行った後,別のカメラへ再度射影することで対象の位置姿 勢を確定する.本報では、対象物が水面に浮いている状態で波を 発生させ実時間認識を行い未知環境下における位置認識を行った.

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 , $\eta_y[mm/pixel]$ 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



Fig.1 Projection-based Method process

ことより,

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

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, ${}^{IR}r_i$ と同様に,射影変換行列 P を使うと, ${}^{IL}r_i$ 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.

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

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

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.

$$\begin{bmatrix} C & x_i \\ C & y_i \\ C & z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}^+ \begin{pmatrix} C & z_i \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I & x_i \\ I & y_i \end{bmatrix} + (\mathbf{I}_4 - \mathbf{P}^+ \mathbf{P}) \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix}$$
(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.

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

いま,画像座標系上のモデル中心座標 ${}^{IL}r_{iC}$ からカメラ座標

No. 19-2 Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019

系上でのモデル中心座標 $^{CL}r_{MiC}$ への逆射影変換は次式で表される.

$$\begin{bmatrix} CL_{xMiC} \\ CL_{yMiC} \\ CL_{zMiC} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{P}^+ \begin{pmatrix} CL_{zMiC} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} IL_{xiC} \\ IL_{yiC} \end{bmatrix} + (\boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{P}^+ \boldsymbol{P}) \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix}$$
(20)

 ${}^{IL}x_{iC}, {}^{IL}y_{iC}$ は既知であるので,式(19),(20)より ${}^{CL}z_{MiC}$ が求められる.また同時に ${}^{CL}x_{MiC}, {}^{CL}y_{MiC}$ も一意に定まる. 次に、空間中のモデル座標系上にある点 ${}^{Mi}r_{j}$ の、カメラ座標 系への同次変換を考える.この同次変換は式(21)で表される.

$$\begin{bmatrix} CL & \mathbf{x}_{Mij} \\ CL & \mathbf{y}_{Mij} \\ CL & \mathbf{z}_{Mij} \\ 1 \end{bmatrix} = CL \mathbf{T}_{Mi} (^{CL} \mathbf{r}_{Mi}, ^{CL} \boldsymbol{\phi}_{Mi})^{Mi} \mathbf{r}_{j} \quad (21)$$

この式を展開し式 (20) の関係を用いると、 $^{CL}x_{Mij}$, $^{CL}y_{Mij}$, $^{CL}z_{Mij}$, $^{CL}z_{Mij}$, 式 (22) に例示するように $^{CL}z_{MiC}$ および $^{Mi}x_j$, $^{Mi}y_j$ の関数として与えられる.ここで $^{L}\theta_x$, $^{L}\theta_y$ は左カメラから見た対象物の角度である.

$$C^{L}z_{Mij} = S_{L\theta_{x}}{}^{Mi}y_{j} - C_{L\theta_{x}}S_{L\theta_{y}}{}^{Mi}x_{j} + {}^{CL}z_{MiC}$$
$$= \left[-C_{L\theta_{x}}S_{L\theta_{y}}, S_{L\theta_{x}}, 0, {}^{CL}z_{MiC}\right] \begin{bmatrix} {}^{Mi}x_{j} \\ {}^{Mi}y_{j} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (22)$$

ここで、 Σ_M に逆射影したモデルの座標 $^{Mi}x_j$, $^{Mi}y_j$ を求める ために、式 (15)の逆射影式 (23)を展開する. 展開すると $^{Mi}x_j$, $^{Mi}y_j$ と $^{CL}z_{MiC}$ との関係式が得られるため、これよりモデルの 逆射影後の座標 $^{Mi}r_j$ が求められる.

$${}^{Mi}\boldsymbol{r}_{j} = {}^{Mi}\boldsymbol{T}_{CL}({}^{CL}\boldsymbol{r}_{Mi}, {}^{CL}\boldsymbol{\theta}_{Mi}) \cdot \boldsymbol{P}^{+}({}^{CL}\boldsymbol{z}_{Mij}) \cdot {}^{IL}\boldsymbol{r}_{ij}$$
(23)

以上のことから、空間中に逆射影されたモデルの Σ_{CL} 上での座 標 $^{CL}\mathbf{r}_{Mij} = (^{CL}\mathbf{x}_{Mij}, ^{CL}\mathbf{y}_{Mij}, ^{CL}\mathbf{z}_{Mij})$ は、 $^{CL}\mathbf{z}_{Mic}$ 及び $^{L}\theta_x$, $^{L}\theta_y$ が与えられれば一意に定まることが分かる. Σ_{CL} と Σ_H と の位置関係は既知であるため、 $^{L}\theta_x$, $^{L}\theta_y$ は手先座標系から見る 対象の姿勢 $^{Hx}\theta_M$, $^{Hy}\theta_M$ より求められる.

3.4 適合度関数の定義

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、図3に示すよう 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 $S_{R,out}$, $S_{L,out}$ によって構成される. ここで、右画像領域 $^{IR}r_i^j\phi_M^i$ における色相値に基づく評価値を $p_R(^{IR}r_i^j(\phi_M^i))$ とする.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以下の場合は、評 価値を"+2"と設定し、そうでなければ評価値を"-1"と設定す る.また帯領域において、モデルの色相値とカメラ画像の色相値 の差が20以内の場合は評価値を"+0.1"と設定し、それ以 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.

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.

1

$$F(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j}) = \left\{ \sum_{\substack{IR_{\boldsymbol{r}_{i}^{j} \in \\ S_{R,in}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})}}} p_{R,in}(^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) + \sum_{\substack{IR_{\boldsymbol{r}_{i}^{j} \in \\ S_{R,out}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})}}} p_{R,out}(^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) \right\} / (n_{in} + n_{out})$$

$$(24)$$

$$p_{R,in}({}^{IL}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) = \begin{cases} 2, & \text{if}(|H_{IR,in}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) - H_{MR,in}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j}))| \leq 20); \\ -1, & \text{otherwise.}; \end{cases}$$
(25)

$$p_{R,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) = \begin{cases} 0.1, \text{if}(|H_{IR,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) - H_{MR,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j}))| \leq 20) \\ -1, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

この関数は、右画像領域 ${}^{IR}r_i^j(\phi_M^j)$ の中で、 $S_{R,in}(\phi_M^j)$ に重 なる画像部分の適合度 $p({}^{IR}r_i)$ の合計値と、 $S_{R,out}(\phi_M^j)$ に重 る部分のそれとを合計し平均を取ることで、適合度 $F(\phi_M^j)$ を得 る.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 $F(\phi_M^j)$ 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、 $F(\phi_M^j) \leq 0$ の場合、 $F(\phi_M^j) = 0$ と する.



Fig.3 Searching model

4 認識実験結果

認識実験の内容について示す.本実験では、実時間での位置 認識を行った.本実験において使用した対象物はタコの模型であ り, 図4に実験環境を示している.初期位置 (x, y, z) = (-140, -80, 705)から波を発生させ対象物をx, y正方向へ進ませる.図5 は,移動前と移動後の対象物の位置である.画像の中央を原点と している.右カメラがとらえた対象物の軌跡をグラフで示し実時 間認識ができているかどうか確認する.図6はx, y軸の対象物 の軌跡である.図7はz軸の対象物の軌跡である.z座標の真値 は705[mm]で一定である.測定値の平均値は664[mm]であり誤 差は41[mm]となった.x - y平面での軌跡は図5のような軌跡 となっているので、対象物を認識できている結果となった.



Fig.4 Experiment environment



Fig.5 Position

5 結言

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について示した.また未知環境での水上位 置認識での実験で、この手法による対象の位置認識が可能である との結果を得た.

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.



Fig.6 Target position in X-Y plane by the right camera



- Fig.7 Target (octopus) position in Z axis by the right camera
- [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

No. 19-2 Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019