対象物の事前知識を必要としない ステレオビジョン空間認識を用いたビジュアルサーボ

○山本太郎　寇ギョウ郡　田宏志　王俊祥　汪魯傑　李想　戸田雄一郎　見浪護　（岡山大学）

Visual servoing by using stereo visionspatial recognition without predefined target knowledge

∗T. Yamamoto, Y. Kou, H. Tian, J. Wang, L. Wang, X. Li, Y. Toda and M. Minami
(Okayama University)

Abstract– We proposed a hand-eye visual servoing system without using predefied knowledge about target objects, for aiming the construction of robot system that take autonomous actions by robots themselves at unknown environment. In this study, the method of the system is introduced and the result of an experiment to track two objects which appears one after another in real time is also shown.

Key Words: Visual servoing, Dual-eyes recognition

1　緒言

視覚情報をフィードバックループに組み込むビジュアルサーボがロボットの制御方式の一つとして提唱されて久しい．これまでに複数のカメラを用いる方法 [1)]，ステレオカメラを用いる方法 [2)]，RGB-D センサーを用いる方法 [3)]，手先にカメラを取り付けるハンドアイ方式 [4)] 等さまざまなものが発表されているが，それらは対象物およびモデルの形状や大きさ，色などの情報をあらかじめ与えておく必要がある [5, 6, 7)]．しかしビジュアルサーボの活躍が求められる分野は時々刻々と変化するような環境であったり未知の環境であったりすることが考えられ，予備知識が与えられるような環境は限定的であるため，より柔軟な認識方法が求められている．著者らのグループは，2 次元 Photo-model を用いて 3 次元立体対象物の位置姿勢計測ができること [8)]，またその計測結果に基づいてステレオビジョンハンドアイロボットの位置・姿勢の制御が可能であることを示した．またこの結果である Photo-model を用いたビジュアルサーボ系において，左カメラ画像から Photo-model を生成することができれば事前に用意すべき Photo-model が不要であることに気付いた．著者らの研究グループはこの事前モデル定義を必要としない撮像対象物の位置・姿勢計測法を Projection-based Pose Tracking と呼び，これを用いたビジュアルサーボを Projection-based Visual Servoing として提案した．本報ではこの認識法の概要について述べ，複数物体についてシステムを再起動させずに認識，追従した実験の結果についても報告する．

2　システム概要

本報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．

Fig.1 に Projection-based Pose Tracking の手順の概略図を示す．PA10 に搭載されるカメラは Fig.2 に示すように，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 Σ_W とする．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 $\boldsymbol{\phi} = ({}^{CL}z_{MiC}, {}^{Hx}\theta_M, {}^{Hy}\theta_M)$ を GA(遺伝的アルゴリズム) 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 $\boldsymbol{\phi}$（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，一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効率が悪い，つまり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 の遺伝子により決定される立体モデルの位置/姿勢 $\boldsymbol{\phi}$ を対象物の位置/姿勢と考えることで，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

Fig.3(a) に示す中心射影の関係から，カメラの焦点距離を f，中心座標を $({}^Ix_0, {}^Iy_0)$，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．Fig.3(b) より $\triangle oab$ と $\triangle oa'b'$ が相似であることより，

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

と表され，これは

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

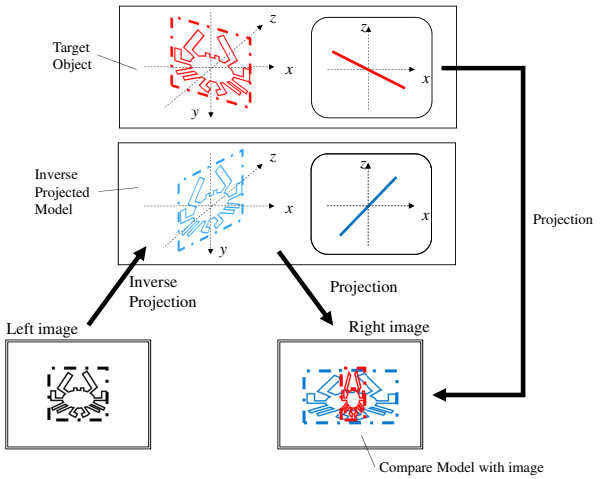


Fig. 1: Projection-based Method process

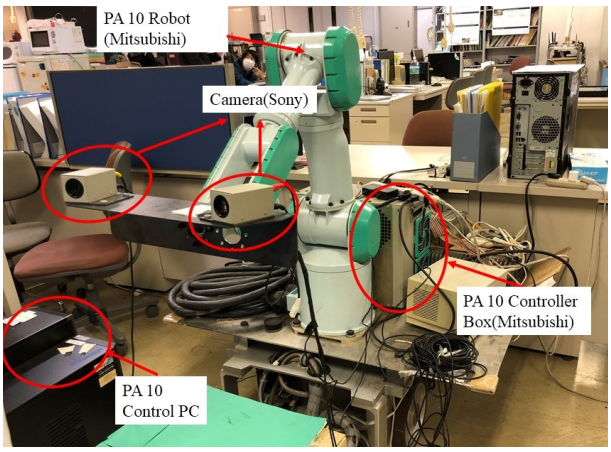


Fig. 2: Hand-eye manipulator used in the system

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

と書ける。よって，任意の点と像の座標関係は Fig.3(a) より次式で表される．

$$\frac{{}^{I}y_i \eta_x}{{}^{C}x_i} = \frac{a}{{}^{C}z_i} \tag{4}$$

$$\frac{{}^{I}x_i \eta_y}{{}^{C}y_i} = \frac{a}{{}^{C}z_i} \tag{5}$$

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，$a \fallingdotseq f$ と近似できると考えられる．以上のことと式 (4)，(5) より式 (6) が導出される．

$$\begin{bmatrix} {}^{I}x_i \\ {}^{I}y_i \end{bmatrix} = \frac{1}{{}^{C}z_i} \begin{bmatrix} \frac{f}{\eta_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{\eta_y} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{C}x_i \\ {}^{C}y_i \\ {}^{C}z_i \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

これより，カメラへの射影変換行列を $\boldsymbol{P}$ と表し，次のようにまとめる．

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

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_{Mi} の関係は，Σ_H から Σ_{Mi} への同次変換行列を ${}^{H}\boldsymbol{T}_{Mi}$，$\Sigma_H$ 及び Σ_{Mi} 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 ${}^{H}\boldsymbol{r}_{Mij}$，${}^{Mi}\boldsymbol{r}_j$ とすると，${}^{H}\boldsymbol{r}_{Mij}$ は，

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

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 ${}^{CL}\boldsymbol{T}_H$ とすると，${}^{CL}\boldsymbol{r}_{Mij}$ 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，${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij}$ と同様に，射影変換行列 $\boldsymbol{P}$ を使うと，${}^{IL}\boldsymbol{r}_{Mij}$ 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 ${}^{CR}\boldsymbol{T}_H$ とすると，${}^{CR}\boldsymbol{r}_{Mij}$ 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 $\boldsymbol{P}$ を使い，${}^{CR}\boldsymbol{r}_{Mij}$ を Σ_{IR} に対して射影することで，${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij}$ 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．

$${}^{IL}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} \ {}^{CL}\boldsymbol{T}_H \ {}^{H}\boldsymbol{T}_{Mi} \ {}^{Mi}\boldsymbol{r}_j \tag{13}$$

$${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} \ {}^{CR}\boldsymbol{T}_H \ {}^{H}\boldsymbol{T}_{Mi} \ {}^{Mi}\boldsymbol{r}_j \tag{14}$$

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

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

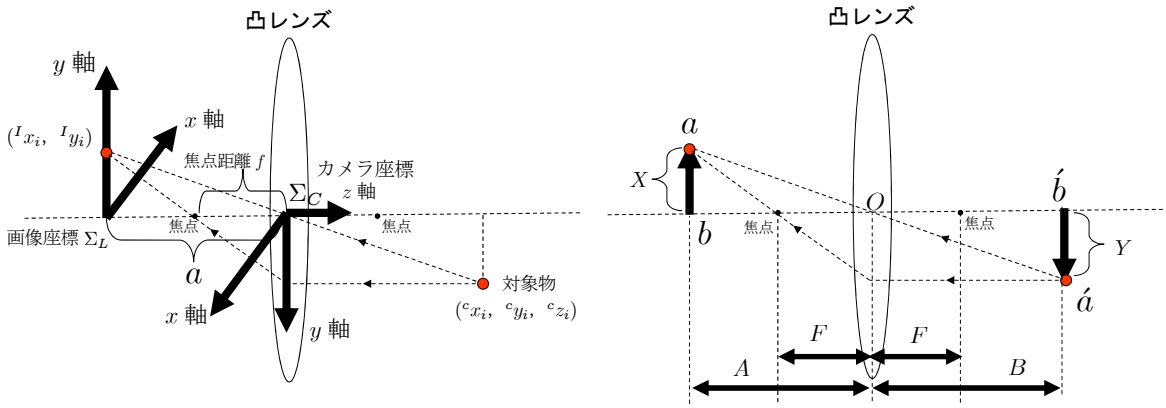
$${}^{IR}\boldsymbol{r}_{Mij} = \boldsymbol{P} \ {}^{CR}\boldsymbol{T}_{Mi} \ {}^{Mi}\boldsymbol{r}_j \tag{16}$$

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 $\boldsymbol{P}^{+}$ を定義する．

$$\boldsymbol{P}^{+}({}^{C}z_i) = {}^{C}z_i \begin{bmatrix} \frac{\eta_x}{f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\eta_y}{f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{T} \tag{17}$$

いま，画像座標系上のモデル中心座標 ${}^{IL}\boldsymbol{r}_{iC}$ からカ



(a) (b)

Fig. 3: Geometrical relations of a convex lens

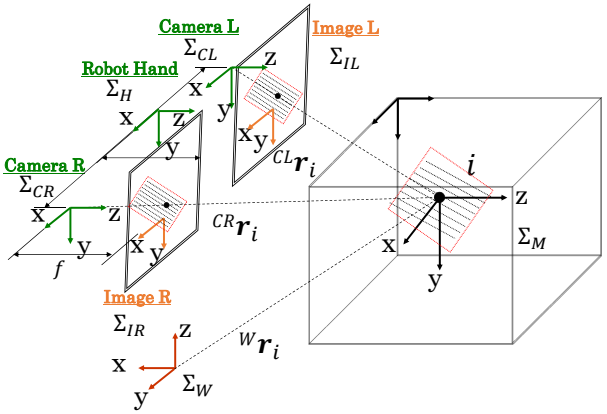


Fig. 4: Coordinate system

メラ座標系上でのモデル中心座標 ${}^{CL}\boldsymbol{r}_{Mi}$ への逆射影変換は冗長項をもつ一般解の形を用いた次式で表される．

$$\begin{bmatrix} {}^{CL}x_{Mi} \\ {}^{CL}y_{Mi} \\ {}^{CL}z_{Mi} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{P}^{+}(l_3)\begin{bmatrix} {}^{IL}x_{Mi} \\ {}^{IL}y_{Mi} \end{bmatrix} + (\boldsymbol{I}_4 - \boldsymbol{P}^{+}(l_3)\boldsymbol{P})\boldsymbol{l} \tag{18}$$

ここで $\boldsymbol{l}$ は任意の定数 l_1 から l_4 を用いて表される任意ベクトルである．

$$\boldsymbol{l} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix} \tag{19}$$

次に，空間中のモデル座標系上にある点 ${}^{Mi}\boldsymbol{r}_j$ 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 (20) で表される．

$$\begin{bmatrix} {}^{CL}x_{Mij} \\ {}^{CL}y_{Mij} \\ {}^{CL}z_{Mij} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{CL}\boldsymbol{T}_{Mi}({}^{CL}\boldsymbol{r}_{Mi}, {}^{CL}\boldsymbol{\phi}_{Mi}){}^{Mi}\boldsymbol{r}_j \tag{20}$$

この式を展開し式 (18) の関係を用いると，${}^{CL}x_{Mij}$，${}^{CL}y_{Mij}$，${}^{CL}z_{Mij}$ が，式 (21) に例示するように ${}^{CL}z_{Mi}$ および ${}^{Mi}x_j$，${}^{Mi}y_j$ の関数として与えられる．ここで ${}^{L}\theta_{ix}$，${}^{L}\theta_{iy}$ は左カメラから見た対象物の角度である．

$$\begin{aligned} {}^{CL}z_{Mij} &= S_{L\theta ix}{}^{Mi}y_j - C_{L\theta ix}S_{L\theta iy}{}^{Mi}x_j + {}^{CL}z_{Mi} \\ &= \left[-C_{L\theta ix}S_{L\theta iy}, S_{L\theta ix}, 0, {}^{CL}z_{Mi}\right]\begin{bmatrix} {}^{Mi}x_j \\ {}^{Mi}y_j \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{21}$$

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 (22) 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 ${}^{Mi}\boldsymbol{r}_j$ が求められる．

$${}^{Mi}\boldsymbol{r}_j = {}^{Mi}\boldsymbol{T}_{CL}({}^{CL}\boldsymbol{r}_{Mi}, {}^{CL}\boldsymbol{\theta}_{Mi}) \cdot \boldsymbol{P}^{+}({}^{CL}z_{Mij}) \cdot {}^{IL}\boldsymbol{r}_{ij} \tag{22}$$

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 ${}^{CL}\boldsymbol{r}_{Mij} = ({}^{CL}x_{Mij}, {}^{CL}y_{Mij}, {}^{CL}z_{Mij})$ は，${}^{CL}z_{Mi}$ 及び ${}^{L}\theta_{ix}$，${}^{L}\theta_{iy}$ 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，${}^{L}\theta_{ix}$，${}^{L}\theta_{iy}$ 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，Fig.5 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 ${}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ における色相値に基づく評価値を $p_R({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))$ 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 H_MR とカメラ画像の色相値 H_IR の差が ±20 以内の場合の評価値を “ +2 ”，また，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が ±20 以上離れていた場合は，評価値を“ −1 ”と設定する．背景を評価する帯領域の評価値を“ 0.1 ”と設定し，帯領域においてモデルの色相値とカメラ画像の色相値が ±20 以上離れていた場合は，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．

$$F_R(\boldsymbol{\phi}_M^j) = \left(\sum_{{}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j \in S_{R,in}(\boldsymbol{\phi}_M^j)} p_{R,in}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) + \sum_{{}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j \in S_{R,out}(\boldsymbol{\phi}_M^j)} p_{R,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) \right) / (2 \times N_{R,in} + 0.1 \times N_{R,out}) \tag{23}$$

$$p_{R,in}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) = \begin{cases} 2, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) \\ & \quad -H_{MR,in}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))| \le 20); \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{24}$$

$$p_{R,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) = \begin{cases} 0.1, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) \\ & \quad -H_{MR,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))| \le 20); \\ -1.0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{25}$$

この関数は，右画像領域 ${}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ の中で，$S_{R,in}(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ に重なる入力画像の評価値 $p_{R,in}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))$ の合計値と $S_{R,out}(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ に重なる入力画像の評価値 $p_{R,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))$ を加えることで，右画像の適合度 $F(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ を得る．これらを加算した適合度関数 $F(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ を用いて，右の画像と再射影された平面モデルとを評価する．この適合度関数 $F(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ 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するはずである．ただし，$F(\boldsymbol{\phi}_M^j) \le 0$ の場合，$F(\boldsymbol{\phi}_M^j) = 0$ とする．

同様に，左画像領域 ${}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ における色相値に基づく評価値を $p_L({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))$ 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 以内の場合は，評価値を“ +2 ”，±20 範囲の以外の場合は，評価値を“ −1 ”と設定する．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 以内の場合は，評価値を“ +0.1 ”，±20 範囲以外の場合は，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．

$$F_L(\boldsymbol{\phi}_M^j) = \left(\sum_{{}^{IL}\boldsymbol{L}_i^j \in S_{L,in}(\boldsymbol{\phi}_M^j)} p_{L,in}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) + \sum_{{}^{IL}\boldsymbol{L}_i^j \in S_{L,out}(\boldsymbol{\phi}_M^j)} p_{L,out}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) \right) / (2 \times N_{L,in} + 0.1 \times N_{L,out}) \tag{26}$$

$$p_{L,in}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) = \begin{cases} 2, & \text{if}(|H_{IL}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) \\ & \quad -H_{ML,in}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))| \le 20); \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{27}$$

$$p_{L,out}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) = \begin{cases} 0.1, & \text{if}(|H_{IL}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j)) \\ & \quad -H_{ML,out}({}^{IL}\boldsymbol{r}_i^j(\boldsymbol{\phi}_M^j))| \le 20); \\ -1.0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{28}$$

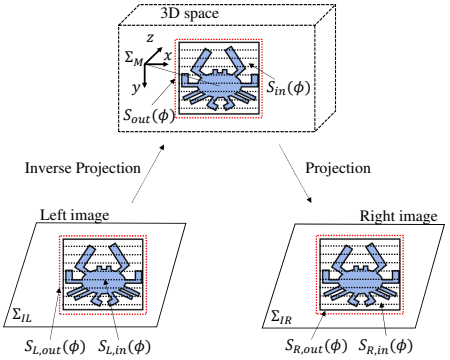


Fig. 5: Searching model

3.5 RT-MS GA

前項で述べた適合度関数を用いることによって，対象物の位置/姿勢を探索する問題は，適合度関数 $F(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ の最大値を探索する問題に置き換えることができる．本手法では，この最大値を探索する最適化問題に対して GA を適応することで探索時間の短縮を行う．また，個体の位置/姿勢情報を表す遺伝子情報を以下に示す．

$$\underbrace{01\cdots01}_{10bit}\underbrace{00\cdots01}_{7bit}\underbrace{11\cdots01}_{7bit}.$$

個体の位置/姿勢は Projection-based Matching 法における立体モデルの位置/姿勢を表しており，上位 10bit がこの遺伝子で与えられる空間中に逆射影したモデルのカメラからの距離を表わし，残り 14bits は 7bit ずつで，空間中に逆射影したモデルの姿勢を表わしている．このとき使用する bit 数は探索時間短縮のために減らすことがある．次に，各個体は自分の位置/姿勢情報を用いて式 (26) に示した適合度関数 $F(\boldsymbol{\phi}_M^j)$ より適合度値を得る．この値の優劣により進化処理が行われ，世代交代による次世代の集合が構成される．このとき，次世代の集合は前世代において適合度が高かった位置/姿勢，つまり対象物を表す適合度関数の最大値近辺に向かって近づく．この処理 (世代交代) を繰り返すことにより，GA は対象物の位置/姿勢を表す最大値を発見する．GA を用いた探索過程を Fig.6 に示す．

ただし一般には GA の収束を一定時間待つ必要があり，適合度関数が十分に高い値を示すときに対象物の認識を完了すると，その時点では周囲の状況が大きく変化している可能性がある．そこで提案されたのが Real-Time Multi-Step GA である．これは新しく入力され

た画像に対しビデオレート (33[ms]) で次の画像が入力されるまでの間だけ GA の進化を進め，その時点で最も高い適合度を与える個体をその時刻における位置・姿勢として出力する実時間遺伝的認識法である．Fig.7 にフローチャートを示す．

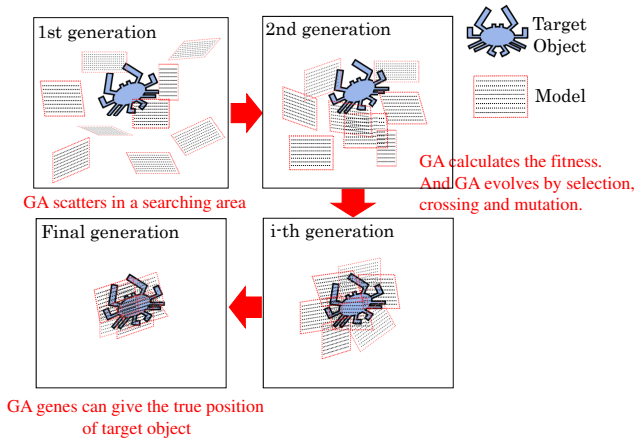


Fig. 6: Search Process using GA

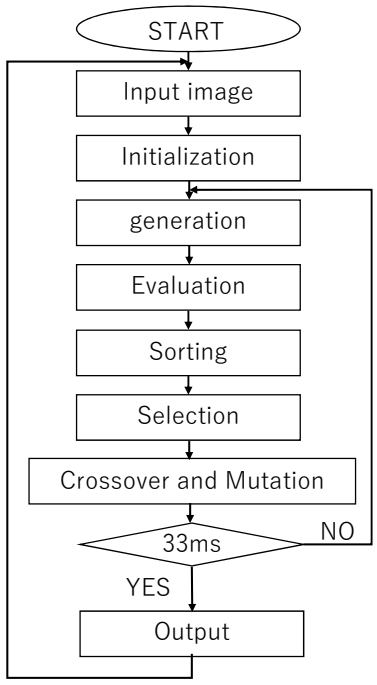


Fig. 7: Flowchart of Real-Time Multi-Step GA

4 交換される対象物に対しての認識・追従実験

4.1 実験環境

本システムは対象物把持ロボット (Target ObjectRobot) とビジュアルサーボ認識ロボット (V.S.-Robot) との二つの部分で構成されている．ロボットはともに三菱重工業株式会社製の PA10 であり，認識部のカメラセンサーは FCR-IX11A(Sony 製) である．各部分の座標関係は Fig.8 で表す．また今回使用した対象物を Fig.9 に示す．

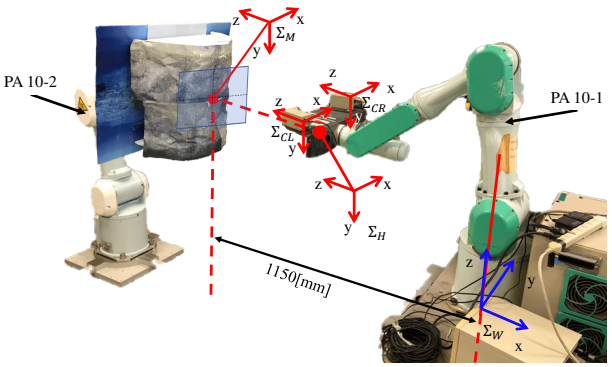


Fig. 8: The experiment environment

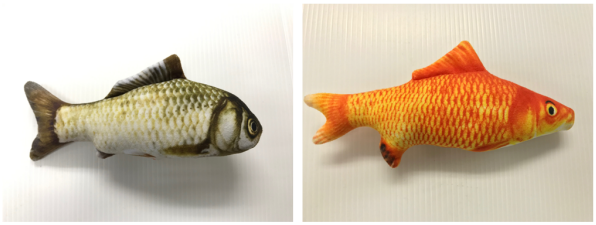


Fig. 9: Target objects

4.2 実験内容

本実験では，対象物を実時間中に交換しながら，それぞれの対象物に対して一定の距離を保つようにビジュアルサーボを行う．まず $({}^{W}x, {}^{W}y, {}^{W}z) = (-1150, -50, 550)$ の位置に対象物を設置し，Σ_W の y 軸方向に $+50$，z 軸方向に -50，y 軸方向に -50，z 軸方向に $+50$ のように一周移動させる．そこで対象物を異なるものへ変更した後，システムを再起動せずにモデルを再度作成して認識させ，同様に対象物を移動させる．このときビジュアルサーボ認識ロボットは対象物の位置姿勢を認識し，${}^{W}x_M, {}^{W}y_M, {}^{W}z_M$ の偏差がそれぞれ $500, 0, 100$[mm] となるように目標を設定し動作する．

4.3 実験結果

対象物の認識結果を Fig.10 に，それを元にしたビジュアルサーボ認識ロボットの目標位置と実際の位置の結果を Fig.11 に示す．Fig.10 において破線が対象物の真値，実線が認識値である．また Fig.11 において破線がビジュアルサーボ認識ロボットの目標位置，実線が実際の位置である．結果としては，Projection-based Matching 法を用いたビジュアルサーボシステムは実時間に交換される対象物についても見失うことなく認識した．Σ_W の y 軸方向については対象物の真値と認識との間に最大 50[mm] ほどの誤差が見られるが，x 軸方向，z 軸方向についてはほぼ真値付近で認識していることが分かる．またビジュアルサーボ認識ロボットの位置についても，指定した距離を保って動作していることが分かる．

5 結言

本報では，Projection-based Pose Tracking の概要と，それを用いた認識，ビジュアルサーボ実験の結果について報告した．今回の実験結果より，Projection-

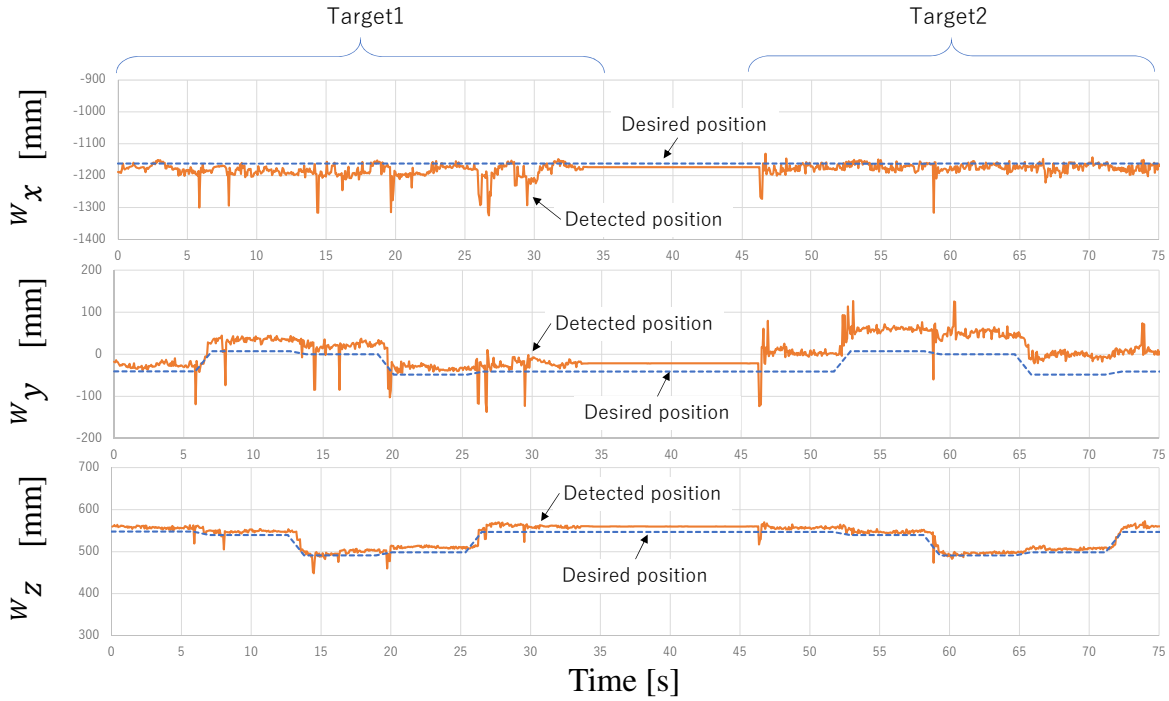


Fig. 10: The detection result and desired position of target in x,y,z axis

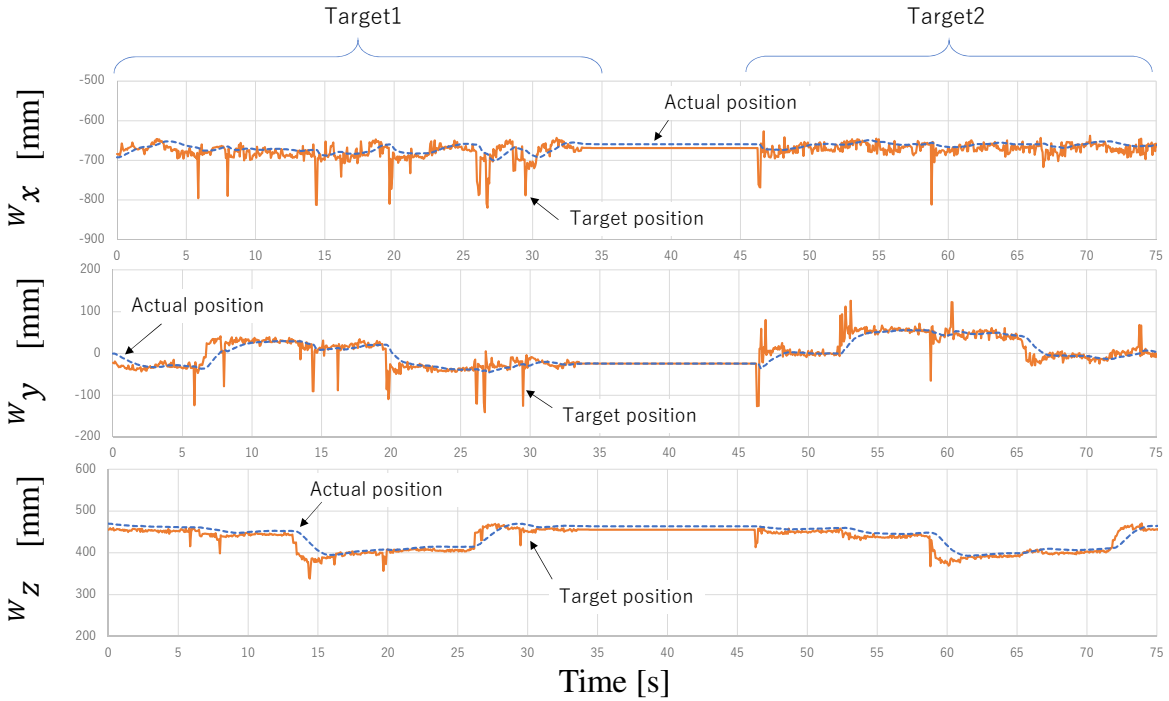


Fig. 11: The taget hand position and actual hand position of PA10-1 in x,y,z axis

based Pose Tracking によって実時間中に交換された未知対象物についてその位置を認識できることがわかった．今後は本システムの認識精度やロバスト性についての検証を進めていく予定である．

参考文献

1) J. Stavnitzky, D. Capson: ”Mutiple Camera Model-Based 3-D Visual Servoing,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.16, No.6 (2000)

2) W. Song, M. Minami, Y. Mae and S. Aoyagi: ”On-line Evolutionary Head Pose Measurement by Feed-forward Stereo Model Matching,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 4394/4400, (2007)

3) Baraglia, Jimmy, et al: ”Initiative in robot assistance during collaborative task execution.” 2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). IEEE (2016)

4) 松浦精太郎, 丸典明： ”視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボによる Eye-In-Hand 型ロボットの位置姿勢制御”，日本機械学会論文集 (C 編)．77-776，pp.186-195 (2011)

5) Petsch, Susanne, and Darius Burschka: ”Estimation of spatio-temporal object properties for manipulation

tasks from observation of humans." Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE (2010)

6) 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)

7) Cui, Yu, et al: "Analyses about Trackability of Hand-eye-vergence Visual Servoing in Lateral Direction." Applied Mechanics and Materials. Vol. 772. Trans Tech Publications (2015).

8) Khaing Win Phyu, Ryuki Funakubo, Ikegawa Fumiya, Yasutake Shinichiro, Mamoru Minami: "Verification of Recognition Performance of Cloth Handling Robot with Photo-model-based Matching," IEEE ICMA 2017, Takamatsu, Augest 6-9 (2017)