Dual-eyes カメラと射影変換によるビジュアルサーボの性能

Performance of Visual Servoing with Dual-eyes Configuration and Projection Servoing

○窚 ギョウ郡(岡山大) 田 宏志(岡山大) 想 (岡山大) 李 舟久保 龍希 (岡山大) 松野 隆幸(岡山大) 見浪 護(岡山大) ŦĒ IE. Yejun Kou, Okayama University, ptlg9dvi@s.okayama-u.ac.jp Hongzhi Tian, Okayama University Xiang Li, Okayama University Ryuki Funakubo, Okayama University Takayuki Matsuno, Okayama University Mamoru Minami, Okayama University

Nowadays, in the field of robot vision, the control method called visual servoing attracts attention. Visual servoing is one of the methods for controlling robots. By incorporating visual information obtained from the installed visual sensor into the feedback loop, it is expected to enable robots to work in the constantly changing environment or unknown environment. Now, in this field, there were some methods that have been proposed to realize visual servoing. However, in those methods, the pre-knowledge such as the size, color, shape of the target is needed to some extent, which may lead a low flexibility to the system. To this issue, we proposed the project-based method. In this method, we use a dual-eyes configuration to perform the visual servoing towards the arbitrary target object. First, the model was created by image shown in left camera in real time, by using homography in projection geometry, then the image in the left camera is projected into 3D space to make a search model, then project the 3D search model into the right camera again to estimate the position and rotation of target object. In this thesis, the recognition accuracy of position and orientation of unknown target object was verified.

Key Words: Projection-based Method, Real-Time Multi-Step GA, Visual Servoing

1 緒言

近年,社会の発展に伴う,ロボットへの要求は,従来のように 操縦者がロボットを介して作業を行うものから,変化する環境 の中でロボット自身が自律行動をとるものへと変化している.ロ ボットは工場現場,深海探索などの常に変化する環境または未知 の環境で作業することが期待されている.

その要求を対応するため、常に変化する環境中ロボットが正確 的に距離を感知することが重要である.Fig.1の示すように、人 間では、環境中の物体を二つ目で距離を測れる、それは視差によ り、大脳に三角測量と生活の経験で距離が分かる、精確的な結果 と言えないですが、大体の距離感を掴むことができる.しかし、 現段階では、ロボットが人間の知性というものを持つことができ ないから、障害物を避けるため、ロボットが一般的に距離センサ を搭載し、周辺の環境を感知する.距離センサが主に光学式、超 音波式、レーザー光線式に分かれている.距離センサでロボット が環境と距離を感知できるが、距離センサの検出距離が短い、影 響を受けやすい、検出空間が狭いなどの欠点が持っている.さら に、複雑な環境をマッピングするなら時間をかかるの特徴がある. 常に変化するの環境へ応用することが難しい.

その問題に対して,我々はビジュアルサーボが一つの解決策と 考える.ビジュアルサーボとは,ロボットを制御する方式のひと つである.搭載される視覚センサから得られる視覚情報をフィー ドバックループに組み込むことによりロボットを制御する.

現在,ビジュアルサーボを実現するため,いくつかの方法が提 案されているが,これらの方法では,対象物の大きさ,色,或い は形状などの事前知識がある程度必要であり,これによりシステ ムに柔軟性が低下する可能性がある.この問題を解決するため, 我々の研究グループは射影ベース認識法という方法を提案した. この方法では,任意対象物に対するビジュアルサーボを目的とし



Fig.1 The Sense of Distance

て、Dual-eyes カメラによる認識を行う.射影ベース法は、実時 間にモデルを作り、変更することができるという特徴により、シ ステムの柔軟性を向上しながら、任意物体を対象物として認識す ることが可能である.さらに、Dual-eyes カメラを搭載し、両カ メラの視差により奥行き方向の距離を検出しやすい、可視領域が 広いなどのメリットがある.

本研究では、まず左側のカメラに映し出された画像をモデルとして作成し、逆射影変換の原理を用いて、作った2次元モデルを3次元探索空間へ逆射影して探索用モデルを生成する.生成され

た探索用モデルを右カメラへ再投影する結果により,実時間で任 意対象物の位置及び姿勢を探索することができる.本報では,未 知対象物の位置と姿勢の認識精度を検証する.

対象物の位置:姿勢計測法 Projection-based 認識法

2.1 モ探索用モデ成生成法



(a) 背景+対象物

(b) モデルの抽出

Fig.2 Model Generation Process

まず, Fig.2(a) に示すような画像を左カメラから取得する. 画 像中心点から辺の長さが 240(*Pixel*) の正方形をモデルとして切 り出す. 正方形内部が 13(*Pixel*) ごとにサンプリング点を生成 し,各サンプリング点の色情報が記録される.そして,画像座標 系 Σ_{IL} が Fig.2(a) に示すように画像の中心に設定されている. これにより,各サンプリング点が画像座標系 Σ_{IL} での位置情報が 得られる.そこで,画像座標系での位置情報と色情報を持ってい るモデルが生成される.モデルの外側から二層が帯部分 ($S_{L,out}$) であり,正方形の部分は面部分 ($S_{L,in}$) と定義されている.

2.2 射影ベース認識法の概要

Fig.3 に示すように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 Σ_{VL} ,右のカメラ座標系を Σ_{CR} ,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_{IL} ,右のカメラ座標系を Σ_{CR} ,画像座標系を Σ_{IR} とする.前節で説明したモデル生成の方法で左カメラ画像に映った対象物をモデルとして抽出し,Fig.3 に示すようにモデルを左カメラ画像から GA(遺伝的アルゴリズム)の遺伝子からの位置/姿勢 $\phi = (x, y, z, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ (ϵ はクォータニオンの姿勢変数)情報を用いて、3 次元空間へ逆射影する.逆射影されたモデルを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、対象物の位置と姿勢を得ることができる.従って、平面モデルの位置/姿勢 ϕ (6 変数)が対象物の位置/姿勢(6 変数)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、探索範囲内すべての可能性を探す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.従って、 GA がある程度収束した時、GA の遺伝子により決定される立体 モデルの位置/姿勢 ϕ 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 認識結果評価手法

提案するシステムでは、両眼カメラから取得した画像を PC に 転送し、Real-Time Multi-Step GA と Model-based Matching 法 [1] を組み合わせて対象物との相対的位置・姿勢を認識してい る.一般的に、GA (遺伝的アルゴリズム)を用いた最適解探索



Fig.3 Overview of Projection-based Method

では、GA が最適解を決定する際ある程度の時間を要するため、 最適解が得られた時には周囲の環境が大きく変化している可能 性が高い.そこで本研究では、Real-Time Multi-Step GA を採 用した. Real-Time Multi-Step GA とは、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 遺伝子の進化を進め、その時点で最大適合度を与える遺伝 子情報を最新の対象物の位置・姿勢として出力する方法で、これ により実時間での認識を可能としている.また、このとき評価に 使用する適合度とは、Model-based Matching 法で定義される対 象物とモデルとの一致度合いを示す適合度関数から得られる値で ある.これにより、提案システムでは対象物の3次元位置・姿勢 の実時間認識を可能としている.また、提案システムによる対象 物の位置・姿勢の認識情報は、Fig.3 に示す GA 探索空間内で獲 得される.

3.1 適合度関数

ſ

左右カメラ映る画像と逆射影した結果を評価するため、本研究 は適合度関数を利用して、認識結果を評価する.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.4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、N は面部分 と帯部分の評価点の総点数, $H_{IR}(^{IR}r_i)$ は右カメラ画像の色相値, $H_{MR}(^{IR}r_i)$ はモデル各サンプリング点の色相値と定義し、右画像 領域 $^{IR}r_i^j(\phi_M^J)$ における色相値に基づく評価値を $p_R(^{IR}r_i(\phi_M^J))$ 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が 20 以上離れていた場合は、評価値を"-1" と設定する.モデルの色相値を右カメラ画像の色相値の差が 20 以下の場合は、評価値を"+2"と設定する.また、モデルの色 相値と右カメラ画像の色相値の差が 20 以下の場合は、評価値を "+0.1"と設定し、他の点の評価値を"-0.5"とする.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.

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

$$\begin{split} p_{R,in}({}^{IL}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) = &\begin{cases} 2, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) - H_{MR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j}))| \leq 20); \\ -1, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) - H_{MR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j}))| > 20); \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \\ p_{R,out}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) = \begin{cases} 0.1, & \text{if}(|H_{IR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j})) - H_{MR}({}^{IR}\boldsymbol{r}_{i}^{j}(\boldsymbol{\phi}_{M}^{j}))| \leq 20); \\ -0.5, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{split}$$

)

No. 18-2 Proceedings of the 2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kitakyushu, Japan, June 2-5, 2018



Fig.4 Searching Model

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 なる入力画像の評価値 $p(^{IR}r_i)$ の合計値から、 $S_{R,out}(\phi_M^j)$ のそ れを差し引くことで、右画像の適合度 $F_R(\phi_M^j)$ を得る.これら を加算した適合度関数 $F(\phi_M^j)$ 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 $F(\phi_M^j)$ 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、 $F_R(\phi_M^j) \leq 0$ の場合、 $F_R(\phi_M^j) = 0$ とする.

3.2 RT-MS GA

前節で述べてき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 $F_R(\phi_M^j)$ 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.

$CL_{z_{MiC}}$	$H^{x}\theta_{M}$	$H_{y}_{\theta_{M}}$
$\underbrace{01\cdots 01}_{00}\underbrace{00\cdots 01}_{11\cdots 01}\underbrace{11\cdots 01}_{11\cdots 01}$		
10bit	7bit	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.

探索時に、Fig.5に示すようにまず、探索区間中にGAの初期 個体を生成する.次に、式(1)に示した適合度関数 $F(\phi_M^j)$ より 各個体の適合度値を得る.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.

しかし,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 であり,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.5 Evolution Process of GA

本研究では、まず GA-PC1 で左画像から切り出した部分を モデルとして左画像中 RT-MS GA で (${}^{IL}x_{ij}, {}^{IL}y_{ij}$)を探索す る. 求められた (${}^{IL}x_{ij}, {}^{IL}y_{ij}$)をルーターで GA-PC2 に転送し、 逆射影を行う. 逆射影の計算により空間中探索用モデルの位置 (${}^{M}x_{ij}, {}^{M}y_{ij}, {}^{M}z_{ij}$)を見つける. そして RT-MS GA で各探索用 モデルを右カメラ比較し、適合度が高い結果を求める. ここで、 現段階射影ベース法を用いたビジュアルサーボシステムが 33[ms] の中に、左カメラの進化世代数は 20 代、右カメラの進化世代数 は 15 代、その特徴により実時間で対象物の位置と姿勢を検出す ることができる.

4 移動中対象物に向けた認識実験

4.1 システム構成

Fig.??configuration)の示すように、本システム構成は対象物 把持ロボット (Target Object-Robot) とビジュアルサーボ認識 ロボット (V.S.-Robot) 二つ部分で構成されている. ロボットは PA10 三菱重工業株式会社製であり、認識部のカメラセンサーが FCR-IX11A(Sony 製)である.各部分の座標関係は Fig.7 で表す.



Fig.6 Configuration of Visual Servoing System

No. 18-2 Proceedings of the 2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kitakyushu, Japan, June 2-5, 2018



Fig.7 The Coordinate System



Fig.8 The Experiment Environment

4.2 実験内容

実験の構成図は Fig.8 で表されている.本実験では、対象物とハンドの間の位置と姿勢を一定の値を保つことを目標として、30秒の周期で奥行方向 (Σ_x 方向)のビジュアルサーボをする.ここで、対象物とハンドの位置と姿勢の関係は式 (3)のように表されている.また、対象物の移動は式 (4)で表されている.まず GA-PC1で左画像から切り出した部分をモデルとして左画像中 RT-MS GAで ($^{IL}x_{ij}$, $^{IL}y_{ij}$)を探索する.求められた ($^{IL}x_{ij}$, $^{IL}y_{ij}$)を次って GA-PC2 に転送し、逆射影を行う.逆射影の計算により空間中探索用モデルの位置 ($^{M}x_{ij}$, $^{M}y_{ij}$, $^{M}z_{ij}$)を見つける.そして RT-MS GA で各探索用モデルを右カメラ比較し、適合度が高い結果を求める.そして、対象物を ^{M}X に軸回るの回転角度を ϵ_1 , ^{M}Y に軸回るの回転角度を ϵ_2 として、30 秒周期で $-5^{\circ} \sim 5^{\circ}$ の往復回転についてビジュアルサーボをする.

$${}^{H_d}\boldsymbol{\phi}_M = [0[mm], -80[mm], 500[mm], 0, 0, 0].$$
 (3)

$$L = -100 + 100\cos(\omega t)[mm].$$
 (4)

そこで,式(3)の関係を用いて,ハンドの目標位置と姿勢が認識 された対象物の位置と姿勢から得られる.ハンドの目標位置と姿 勢を用いて,ビジュアルサーボをすることができる.



Fig.9 The Recognition Result in Longitudinal Direction

4.3 実験結果

実験の結果は Fig.9 で示す. 図中赤い線は対象物位置の真値, 黒点線は認識結果である. 結果から見ると,射影ベース法を用い たビジュアルサーボシステムは対象物の移動軌道を沿って,見失 うことなしで連続に対象物を認識した. 最初の4秒間で対象物を 探索し,4秒以後認識結果は対象物の軌道に収束している. 奥行 方向 (Σ_x)の認識結果は約最大 50[mm]の誤差が持っている.上 下,左右及び姿勢の認識結果が真値に収束していることが分かる.

5 結言

本文では、射影ベース認識法を用いたビジュアルサーボシス テムで対象物の認識結果を報告した.今回行った実験結果より、 我々が提案したビジュアルサーボシステムが位置及び姿勢におけ る認識できることが分かる.今後は対象物の位置/姿勢認識精度 を向上させることを目指して、本システムロバスト性を検証し研 究を進めていく予定である.

References

[1] 大西祥太,須浪唯介,西村健太,矢納陽,石山新太郎,見浪護(岡山大),藤本勝樹(広和(株))"MOS制御知能を搭載した遠隔操作型水中ロボット(ROV)の自律制御化(AUV)技術",第57回自動制御連合講演会,1B08-2,2014.