

Eye-Vergence を用いたビジュアルサーボの周波数応答特性

侯森 (岡山大学) 見浪護 (岡山大学) 前田耕市 (岡山大学)
于福佳 (岡山大学) 矢納陽 (岡山大学)

1. 緒言

近年、ロボットビジョンの分野では、ビジュアルサーボと呼ばれる制御方法が注目されている [1]-[2]。ビジュアルサーボとは、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でロボットの動作を制御する方法であり、常に変化する環境や未知の環境で働くロボットへの適応が期待されている。

対象物を認識するために、二つのカメラをロボットアームの先端に固定した固定ハンドアイシステムを用いている。このようなシステムでは、対象物が速く動く場合、ハンドの質量と慣性モーメントが大きいため、追従しにくい欠点がある。本研究ではカメラ自身の姿勢が可変である Eye-Vergence システムを提案する。

Eye-Vergence システムは運動学と動力学についてのメリットがある。まず、運動学についてのメリットを説明する。カメラがハンドに固定されている固定ハンドアイシステムは、いくつかの欠点を持つ。例えば、対象物がカメラに近いとき対象物を認識できないこと(図 1 (a))、また二つのカメラの可視領域が狭いこと(図 1 (b))、さらに可視領域内の対象物であっても図 1 (c) に示すようにカメラ画像視野の中心に写像されることが挙げられる。これは、レンズ周辺部で大きくなるレンズのひずみの影響を受けやすいという問題を生む。以上より固定ハンドアイシステムは位置 / 姿勢計測が不正確になる場合や、不可能になる場合があるという本質的な問題を持っていることがわかる。ここで上述の問題を解決するため、本論文では画像の中心で対象物を捉えるためにカメラ自身の姿勢を変化させる自由度を与える。カメラの姿勢を変えることが可能になるので、図 2 の (a)-(c) に示すように、対象物をよりよく観測することができる。図 2(a), (b) は両眼可視領域が拡大すること、(c) はレンズの中心で対象物を観測することによってレンズ収差により発生する入力画像のひずみを避けられることを示している。

動力学についての Eye-Vergence システムのメリットはカメラが移動する対象物を注視できることである。ビジュアルサーボの応用では、安定な閉ループシステムで安定なサーボ動作を保つ必要がある。図 3(a) は、カメラが対象物を捉え続けることができる状態を示す。(b) に示すロボットのカメラはハンドに固定されており、対象物が速く動くと、マニピュレータ全体の運動特性に依存して対象物のスピードに追いつくことができない。このとき対象物はカメラの視界から消失し、制御系は暴走という危険な状態に陥る。よって、ビジュアルサーボシステムにおいては、動く対象物をカメラ視野内にとらえつづける能力である可追跡性を高めることが非常に重要である。また、カメラの質量と慣性モーメン

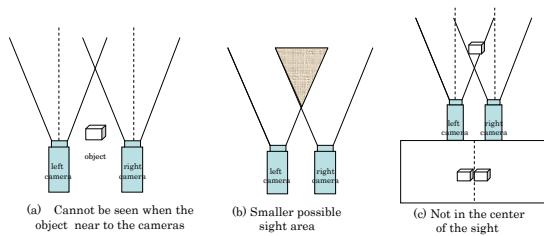


図 1 固定ハンドアイシステムの欠点

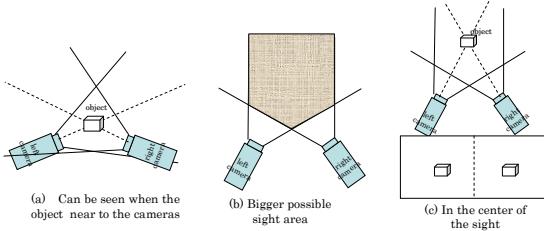


図 2 運動学についての Eye-Vergence システムの利点

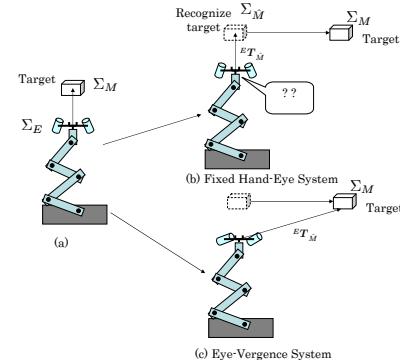


図 3 動力学についての Eye-Vergence システムの利点

トがマニピュレータ全体より小さいので、対象物のスピードに追いつくことができる。図 3(c) に示すように、カメラ視線制御をハンド制御に追加することで、対象物を追跡する能力が向上する。

本論文では、提案した Eye-Vergence システムの優位性を確認するために、正弦波周波数応答実験を行った。実験の結果から提案した Eye-Vergence システムが高い安定性と可追従性を持つことを確認する。

2. ハンドアイビジュアルサーボ

2.1 目標軌道生成

図 4 にハンドと対象物の関係を示す。世界座標系を Σ_W 、対象物の座標系を Σ_M と記述する。さらに、実際のハンドの座標系とその目標座標系をそれぞれ Σ_E 、 Σ_{Ed} で表すこととする。ハンドの目標状態と対象物との

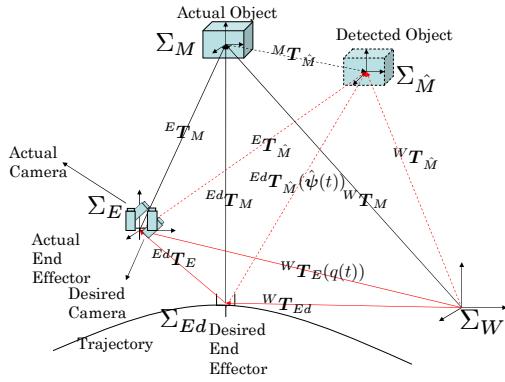


図 4 ハンドと対象物の関係

相対的な位置 / 姿勢関係は ${}^E T_M$ によって表し、実際のハンドと対象物との関係は ${}^E T_M$ によって表す。このとき、 Σ_E と Σ_{Ed} との差は ${}^E T_{Ed}$ として表され、 ${}^E T_{Ed}$ は以下のように記述できる。

$${}^E T_{Ed}(t) = {}^E T_M(t) {}^{Ed} T_M^{-1}(t) \quad (1)$$

式 (1) は任意の対象物の運動 ${}^W T_M(t) = ({}^W T_E(t) {}^E T_M(t))$ と任意の時変ビジュアルサーボの目標運動 ${}^{Ed} T_M(t)$ を含む。 ${}^E T_M(t)$ は 1-step GA とオンラインモデルベースド認識法を使って観測される。推定された対象物を $\Sigma_{\hat{M}}$ で表すと、実際の物体 Σ_M と検出された物体 $\Sigma_{\hat{M}}$ の間には、誤差が存在することが一般的である。ここで、式 (1) で表されるハンドの位置 / 姿勢誤差 ${}^E T_{Ed}(t)$ を推定した物体 $\Sigma_{\hat{M}}$ に基づいて次のように再構成する。

$${}^E T_{Ed}(t) = {}^E T_{\hat{M}}(t) {}^{\hat{M}} T_{Ed}(t) \quad (2)$$

式 (2) を時間に関して 2 回微分すると以下の式を得る。

$$\begin{aligned} {}^E \ddot{T}_{Ed}(t) = & {}^E \ddot{T}_{\hat{M}}(t) {}^{\hat{M}} T_{Ed}(t) + 2 {}^E \dot{T}_{\hat{M}}(t) {}^{\hat{M}} \dot{T}_{Ed}(t) \\ & + {}^E T_{\hat{M}}(t) {}^{\hat{M}} \ddot{T}_{Ed}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで ${}^{\hat{M}} T_{Ed}$, ${}^{\hat{M}} \dot{T}_{Ed}$, ${}^{\hat{M}} \ddot{T}_{Ed}$ はビジュアルサーボの目標軌道としてあらかじめ与えられ、 ${}^E T_{\hat{M}}$, ${}^E \dot{T}_{\hat{M}}$, ${}^E \ddot{T}_{\hat{M}}$ はカメラによって観測される。図 4 に示すように、ビジュアルサーボ過程において 0 にすべき二つの誤差が存在する。一つは実際の物体と検出された物体 ${}^M T_{\hat{M}}$ の誤差である。もう一つはハンドの目標状態と実際のハンド ${}^E T_{Ed}$ の誤差である。著者らの研究では、ある仮定のもとで ${}^M T_{\hat{M}}$ の誤差は 1-step GA オンライン認識法、MFF 補償法と Eye-Vergence システムによって 0 に収束することをアプローフ法により確認し実験でも確認している [4]。 ${}^E T_{Ed}$ の誤差はハンドビジュアルサーボコントロールによって減少することも実験により確認している。

2.2 ビジュアルサーボコントローラ

2.2.1 ハンドビジュアルサーボコントローラ

提案したハンドアイビジュアルサーボのコントローラはハンドとアイ二つのコントローラを組み合わせている。ハンドビジュアルサーボのブロック線図を図 5

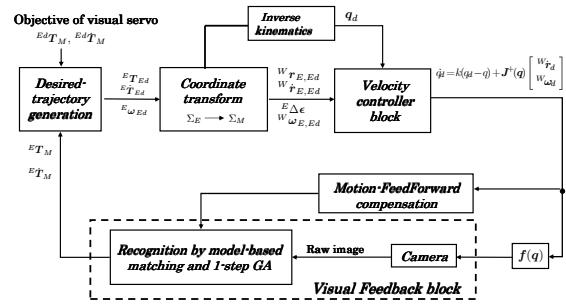


図 5 ビジュアルサーボのブロック線図

に示す。前節で議論したロボット手先の運動軌道を用いて、手先の目標速度 ${}^W \dot{r}_d$ は、

$${}^W \dot{r}_d = K_{P_p} {}^W r_{E,Ed} + K_{V_p} {}^W \dot{r}_{E,Ed}, \quad (4)$$

のように PD 制御を行う。ここで、 ${}^W r_{E,Ed}$, ${}^W \dot{r}_{E,Ed}$ は Σ_E から Σ_W への座標変換を使って ${}^E T_{Ed}$ と ${}^E \dot{T}_{Ed}$ から求められる。 K_{P_p} はバネ定数、 K_{V_p} は粘性抵抗を表す行列である。

ハンドの手先の目標角速度ベクトル ${}^W \omega_d$ は

$${}^W \omega_d = K_{P_o} {}^W R_E {}^E \Delta \epsilon + K_{V_o} {}^W \omega_{E,Ed}, \quad (5)$$

と与えられる。ここで、 ${}^E \Delta \epsilon$ はクォータニオンの偏差 [5] であり、 Σ_E で表された対象物の姿勢誤差であり、“1-step GA”による認識結果から直接得られる。 ${}^W \omega_{E,Ed}$ は Σ_E から Σ_W への座標変換を使って ${}^E T_{Ed}$ から求められる。 K_{P_o} はバネ定数、 K_{V_o} は粘性抵抗を表す行列である。ハンドの目標位置/姿勢は ${}^W \psi_d^T = [{}^W r_d^T, {}^W \epsilon_d^T]^T$ とする。

本研究で使用しているアームロボット PA-10(三菱重工)は一つの冗長自由度を持っている。システムの不安定さを改善するため、第 1 リンクの角度 q_1 を 0 とすることで、手先の目標位置から各リンクの目標角度を逆運動学により計算できる。この方法を利用し、冗長性の問題を解決する。ロボットの目標関節角度 q_d と角速度 \dot{q}_d は

$$q_d = f^{-1}({}^W \psi_d^T) \quad (6)$$

$$\dot{q}_d = k_p(q_d - q) + J^+(q) \begin{bmatrix} {}^W \dot{r}_d \\ {}^W \omega_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

と求められる。ここで、 $f^{-1}({}^W \psi_d^T)$ は逆運動学を表し、 k_p はバネ定数として与えられる。 $J^+(q)$ は $J(q)$ の擬似逆行列であり、 $J^+(q) = J^T (J J^T)^{-1}$ によって得られる。

また、ロボットへの入力トルクは次式によって与えられる。

$$\tau = K_{SP}(q_d - q) + K_{SD}(\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (8)$$

上式の K_{SP} はバネ定数、 K_{SD} は粘性抵抗を表す行列である。

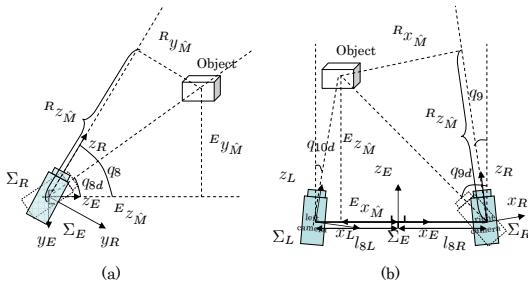


図 6 カメラのパン角とチルト角

2.2.2 Eye-Vergence ビジュアルサーボコントローラ

本論文では Eye-Vergence ビジュアルサーボに対し二つのパンチルトカメラを用いる。カメラは手先に取り付けており、二自由度を持っている。 q_8 は左右カメラ共通のチルト角を表し、 q_9 と q_{10} はパン角を表す。図 6 に示すように、 ${}^E x_{\hat{M}}$ 、 ${}^E y_{\hat{M}}$ および ${}^E z_{\hat{M}}$ はハンド座標において認識された物体の位置を表す。また、カメラの目標角度は以下によって計算される。

$$q_{8d} = \text{atan}2({}^E y_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (9)$$

$$q_{9d} = \text{atan}2(l_{8R} - {}^E x_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (10)$$

$$q_{10d} = \text{atan}2(l_{8L} + {}^E x_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (11)$$

Eye-Vergence ビジュアルサーボコントローラは

$$\dot{q}_8 = K_P(q_{8d} - q_8) + K_D(\dot{q}_{8d} - \dot{q}_8) \quad (12)$$

$$\dot{q}_9 = K_P(q_{9d} - q_9) + K_D(\dot{q}_{9d} - \dot{q}_9) \quad (13)$$

$$\dot{q}_{10} = K_P(q_{10d} - q_{10}) + K_D(\dot{q}_{10d} - \dot{q}_{10}) \quad (14)$$

と与えられる。ここで、 K_P はバネ定数、 K_D は粘性抵抗を表す。

3. ハンドアイビジュアルサーボ実験

本稿では、実機によって Eye-Vergence システムの優位性を確認する。

3.1 実験環境

提案したビジュアルサーボシステムの有効性を実機によって確認するために、アームロボット PA-10(三菱重工製)を使用する。PA-10 の手先には SONY 製のステレオカメラ CCD-TRV86(撮影素子: 1/6 インチ CCD, 焦点距離: $f = 3.6[\text{mm}]$, 視野角: $\alpha = 38[\text{deg}]$)を二台取り付け、複眼で対象物を観測する。対象物は赤、緑、青のポールを組み合わせた 3D マークであり、ポールの直径は $40[\text{mm}]$ 、ポールの中心とマーカーの中心点の距離は $100[\text{mm}]$ である。実験の対象物とマニピュレータの座標を図 7 に示す。白い矢印は対象物の移動方向を示す。

ビジュアルサーボシステムの性能を確認するために、まず、対象物の真の位置/姿勢 $(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ 6 変数をサーボコントローラに入力し、周波数応答実験を行う。次に、カメラによる認識を含めた 3 つの周波数応答実験を行う。一つ目は x 軸方向だけ未知として対象物の位置を認識する。二つ目は x, y, z 軸方向を未知とする。三つ目は位置/姿勢の 6 変数をすべて未知とする。各実験に対して、対象物の角速度を $\omega = 0.314\text{rad/s}$, 0.628rad/s , 1.256rad/s と設定する。

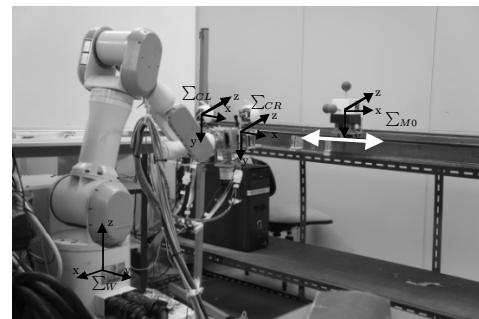


図 7 実機実験の環境

3.2 実験条件

対象物の初期位置を Σ_{M_0} として定義する。 Σ_W から Σ_{M_0} への同次変換行列は以下のように与えられる。

$${}^W T_{M_0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1235[\text{mm}] \\ 1 & 0 & 0 & -150[\text{mm}] \\ 0 & -1 & 0 & 555[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

対象物は Σ_{M_0} の x 軸に沿って運動し、次式で与える。

$${}^M_0 x_M(t) = 150 - 150 \cos(\omega t)[\text{mm}] \quad (16)$$

対象物の目標位置/姿勢と手先の関係は時不变とし、

$${}^E d \psi_M = [0, -90[\text{mm}], 545[\text{mm}], 0, 0, 0] \quad (17)$$

と与えられる。

3.3 実験結果

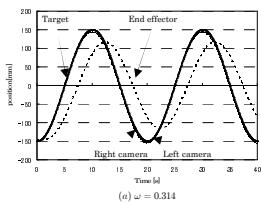
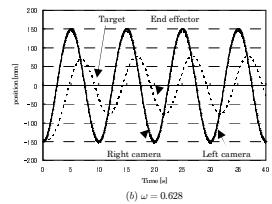
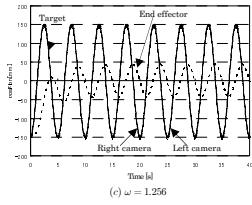
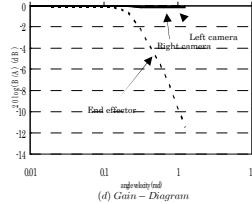
ハンドアイ二重ビジュアルサーボの実機実験の結果を図 8-図 11 に示す。 $\omega = 0.314, 0.628, 1.256$, それぞれの角速度における時間応答波形を図 8-図 11 の (a), (b), (c) に示す。また、振幅周波数曲線と位相周波数曲線を (d) と (e) に示し、横軸は ω の対数目盛りとしている。“End effector”と指示している曲線は固定カメラ / 手先 Trackability を表し、Right camera, Left camera と指示している曲線は Eye-Vergence システムの Trackability を表す。

図 8-図 11 の (a)-(c) より、Eye-Vergence システムは固定カメラシステムに比べて、振幅の差、位相の遅れ共に小さいことがわかる。

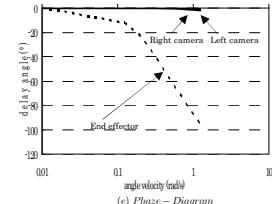
図 8-図 11 の (d), (e) より、 $\omega = 0.1\text{rad/s}$ までは、ハンドとカメラの可追跡性はほぼ等しいが、 ω が増するにしたがってハンドの共振の振幅と位相は、カメラよりも大きくなることがわかる。また、 ω が 0.5rad/s より増加していく場合、固定カメラシステムの振幅は減少していく。一方、Eye-Vergence システムにおいては、 ω が 1.256rad/s までの範囲ではカメラの視界に物体を常に捉えつづけることができる。よって、Eye-Vergence システムは固定カメラシステムよりも優れた安定性を有し、良い追跡性を有することが分かる。

4. 結言

本報告では、提案したビジュアルサーボシステムの有効性を確認するために、移動対象物のビジュアルサー

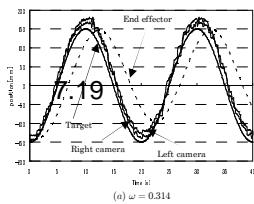
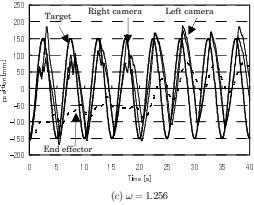
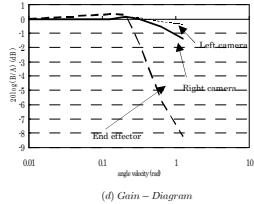
(a) $\omega = 0.314$ (b) $\omega = 0.628$ (c) $\omega = 1.256$ 

(d) Gain - Diagram

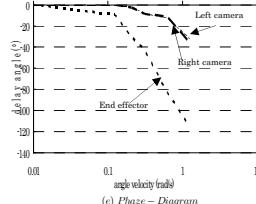


(e) Phase - Diagram

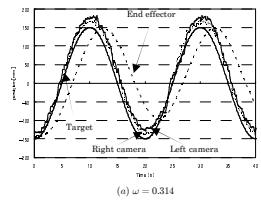
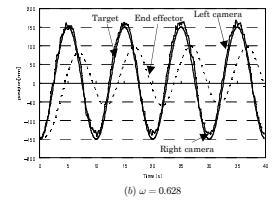
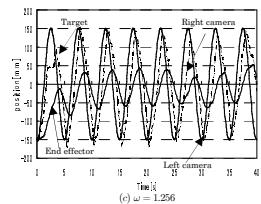
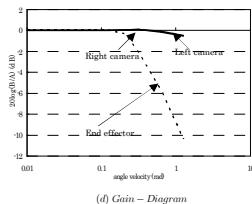
図 8 対象物の位置/姿勢を与えた場合

(a) $\omega = 0.314$ (b) $\omega = 0.628$ (c) $\omega = 1.256$

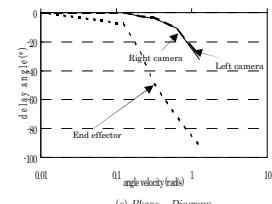
(d) Gain - Diagram



(e) Phase - Diagram

図 10 x , y , z 軸方向を未知として実験した場合(a) $\omega = 0.314$ (b) $\omega = 0.628$ (c) $\omega = 1.256$ 

(d) Gain - Diagram



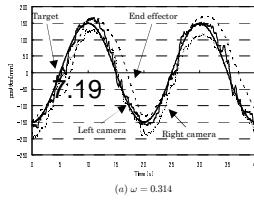
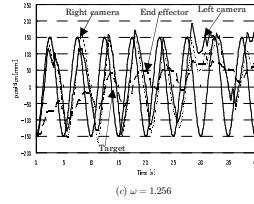
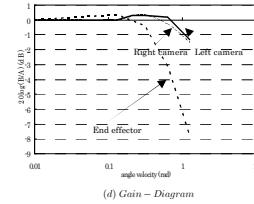
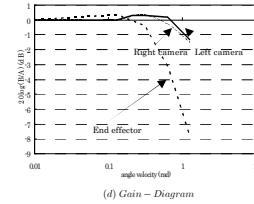
(e) Phase - Diagram

図 9 x 軸方向だけを未知として実験した場合

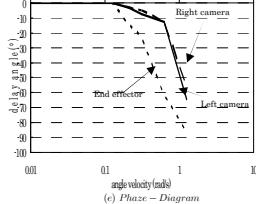
ボ実機実験を行った。実機実験の結果から固定カメラシステムと Eye-Vergence システムのカメラの周波数特性を比較し、Eye-Vergence システムの可追跡性が固定カメラシステムよりも優れているという結論を得た。

参考文献

- [1] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, 1996.
- [2] P. Y. Oh, and P. K. Allen, "Visual Servoing by Partitioning Degrees of Freedom", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 17, no. 1, pp. 1-17, 2001.
- [3] Wei. Song, M. Minami, Fujia Yu, Yanan Zhang and Akira Yanou "3-D Hand & Eye-Vergence Ap-

(a) $\omega = 0.314$ (b) $\omega = 0.628$ (c) $\omega = 1.256$ 

(d) Gain - Diagram



(e) Phase - Diagram

図 11 位置/姿勢の 6 変数を認識する場合

proaching Visual Servoing with Lyapunov-Stable Pose Tracking", ICRA, pp.11, 2011.

- [4] W. Song, F. Yu, M. Minami, "3D Visual Servoing by Feedforward Evolutionary Recognition", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing Vol. 4, No. 4 Page 739-755 (2010).
- [5] W. Song, M. Minami, S. Aoyagi, "On-line Stable Evolutionary Recognition Based on Unit Quaternion Representation by Motion-Feedforward Compensation", International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences and Image Processing (IC-MED) Vol. 2, No. 2, Page 127-139 (2007).