

目追従を用いたビジュアルサーボによる人間の顔への視線移動実験

Eye Direction Moving to Human Face Experiment

by Visual Servoing with Eye-following

○ 奥村 康輔, 中村 翔, 矢納 陽, 見浪 護 (岡山大学)

Kosuke OKUMURA and Sho Nakamura and Akira YANOU and Mamoru MINAMI,
Okayama University 3-3-1, tushima-naka, Okayama, 7008530

In this paper, we present a system of patient robot developed with the aim at training of nursing student's medical treatment. We propose to perform emotion of patient robot by using motors of each links. Patient robot's eye-direction moves to human face by visual servoing, which generates human-like behavior. To make the patient robot to be self-contained for the training, we propose a 3-D injector pose recognition method for patient robot to help that the robot behave autonomously along with the injection procedures of the nurse students trainings.

Keywords : Patient robot, Chaos, Variable emotion, Action generation, Injector recognition

1 緒言

今日、高齢化社会が進み、高度な医療技術が求められている。特に看護において人間を相手にした技術向上は重要であり、看護者は患者の様子を常に観察して、患者が安心して安全に看護を受けられるように配慮しなくてはならない。しかし近年安全性や倫理的な側面から、実際の人間を相手にした十分な訓練が行えていないという現状がある。そこで、看護技量を高めるために、看護学生が患者からの反応に対応する訓練のできる教材が必要である。そのための教材として、人体モデルに各種センサを埋め込み、看護学生の看護動作の動きや力を計測し、それに応じた生理的反応や反射的身体動作、患者の心理状態を表現する表情や腕などの反応動作を模擬可能な人体モデルがあるとよい。現在、人体を模したファントムと呼ばれる人体モデルもいくつか開発されているが、その多くは医療・看護における部分的な個別技術の技量訓練用であり、人間相手の訓練とは感覚が大きく違うことが問題である。そこでファントムの代わりとなる、実際の人間を相手にしていると感じるようなシミュレータが必要となる。それ故、我々は注射訓練のためのシミュレータである“患者ロボット”を開発した。看護において、患者の安全を確保するだけでなく、患者が安心かつ効率的に看護を受けられるような看護訓練が求められており、患者ロボットは患者の心理状態を表情や身体動作を通して表現する必要がある。そこで、試作した患者ロボットは、搭載したサーボモータと各種アクチュエータにより表情、腕、首、腰の動作が可能であり [1]、センサとして目の部分にカメラを搭載している。このカメラにより看護学生が患者の顔の様子を見ながら採血をしているかどうかをセンシングする。更に、カオスを用いることにより患者ロボットの心理状態を模した内部状態を変化させ

ることが可能であり、カオスを用いることで無限の状態変化の推移を内部生成することができ、画一的な動作になりやすいロボットの表現に人間の持つ個性を与えることが可能となる。本報告では、患者ロボットにより人間らしい動作を行わせるため、人間のように目を用いたより高い追従性能を持つ“患者ロボットの顔を用いたビジュアルサーボ及び動く人間の顔への視線移動”を提案する。更にその最適な制御方法を提案し、動く人間の顔への視線移動実験を行う。

2 患者ロボット

我々が開発した患者ロボット Fig.1, Fig.2 に示す。患者ロボットの頭には二つの CCD カメラを看護訓練を観察する為の目として装着した、そして表情を作り出す為に、いくつかのサーボモータを頭の内部に取り付けた。これらのサーボモータの働きにより、Fig.3 のように患者ロボットは笑顔、怒り、悲しみ、痛い、といった表情を表すことが可能である [2]。また、患者ロボットの体の駆動部分を Fig.2 に示した。更に患者の定期的な状態確認では看護行為における危険を避けることが必要不可欠である。患者ロボットでは目に装着したカメラにより看護師が注射行為の間、患者に注意を払っているかどうかを評価する為に看護師の表情を検出する。

3 ステレオカメラによる認識

3.1 ステレオ視の機構について

本研究では、射影変換をそれぞれの物体への相関関係の射影に利用する。Fig. 4 に示した左右のカメラと対象物の座標系を世界座標系 Σ_W において、対象物座標系

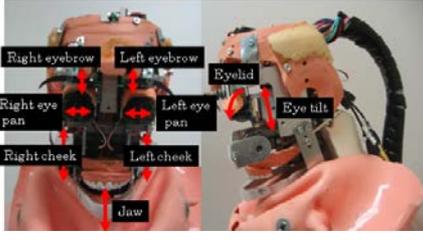


Fig. 1: Structure of robot's head

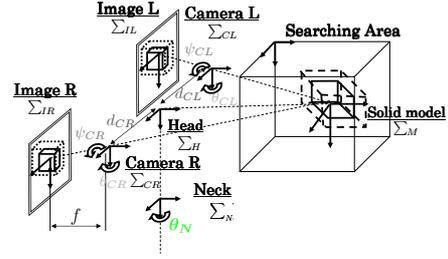


Fig. 4: Coordinate system

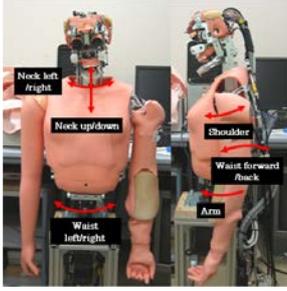


Fig. 2: Structure of robot's body

Σ_M , 左右カメラの座標系 Σ_{CR} , Σ_{CL} , 左右の画像座標系 Σ_{IR} , Σ_{IL} との関係がわかるように表した. 目標とする立体モデル上の任意の点 i はこれらの座標に対する同時変換行列を用いることで描画することが出来る. 初めに Σ_{CR} から Σ_M への同時変換行列は ${}^{CR}\mathbf{T}_M$ と定義される. 次に, 目標物体上の任意の点 i は, ${}^{CR}\mathbf{r}_i$ と ${}^M\mathbf{r}_i$ として定義される. それから, ${}^{CR}\mathbf{r}_i$ は,

$${}^{CR}\mathbf{r}_i = {}^{CR}\mathbf{T}_M {}^M\mathbf{r}_i. \quad (1)$$

となり, 右カメラ座標系における任意の点 i の位置ベクトルを表し, カメラの射影行列 P を用いることで ${}^{IR}\mathbf{r}_i$ となり,

$${}^{IR}\mathbf{r}_i = P {}^{CR}\mathbf{r}_i \quad (2)$$

となる. 定数の同時変換行列を用いた Σ_{CL} から Σ_{CR} への機構上の関係を表す ${}^{CL}\mathbf{T}_{CR}$, 及び ${}^{CL}\mathbf{r}_i$ は,

$${}^{CL}\mathbf{r}_i = {}^{CL}\mathbf{T}_{CR} {}^{CR}\mathbf{r}_i \quad (3)$$

となる. このような方法によって ${}^{IR}\mathbf{r}_i$, ${}^{IL}\mathbf{r}_i$ は, 射影変換行列 P を通して以下の式 (4) のように記述することが



(a) Normal face (b) Smile face (c) Painful face (d) Angry face

Fig. 3: Facial expressions

できる.

$${}^{IL}\mathbf{r}_i = P {}^{CL}\mathbf{r}_i \quad (4)$$

このようにして, 目標物体における Σ_{IR} , Σ_{IL} 上の任意の点 i の投影された位置ベクトルは, ${}^{IR}\mathbf{r}_i$, ${}^{IL}\mathbf{r}_i$ として記述することが出来る. ここで, 位置/姿勢など Σ_{CR} に基づく Σ_M の初期状態における ϕ , θ , ψ , そしてロール, ピッチ, ヨーはそれぞれ $\phi = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]^T$ として表される. そして, ${}^{IR}\mathbf{r}_i$, ${}^{IL}\mathbf{r}_i$ は以下のように記述される.

$$\begin{cases} {}^{IR}\mathbf{r}_i = f_R(\phi, {}^M\mathbf{r}_i) \\ {}^{IL}\mathbf{r}_i = f_L(\phi, {}^M\mathbf{r}_i) \end{cases} \quad (5)$$

この関係は, 人間の頭の姿勢を表しているそれぞれの ϕ を用いることで, 左右カメラ上の投影された点と物体における任意の点との関係を示し, それは本論文では関連が未知としている. 上記のように評価中の左右の点 i それぞれが描画されている時, 左右画像に一致した点の適合の問題が発生する. それ故, 上記の問題は定義した対象物の扱う点において, 点に基づく検出の代わりに 3-D Model-based Matching を用いた.

3.2 3次元物体認識手法

本論文では, 患者ロボットはそれぞれの過程の遷移を自動的に決定する為に人間の頭を認識している. この手法は Model-based Matching 法 (MBM) と genetic algorithm (GA) によって構成されている. 患者ロボットの以前のシステムの行動パターンでは, 各過程の遷移がロボットの操作者によって決められていた. それぞれの過程は人間の顔の認識と関連づけなければならない, 我々はロボットの目に取り付けられた2つのCCDカメラを用いることにより患者ロボットの3次元姿勢認識手法 [3] を提案する.

4 ビジュアルサーボ

患者ロボットの動作におけるビジュアルサーボシステムについて説明し, 患者ロボットがより人間らしい動作

を行うことを実証する．ここで、目標とする人間の頭は患者ロボットの頭に取り付けられた二つのカメラによって認識され、人間の表情を右カメラ画像の中央で観察し続ける為、患者ロボットの頭を制御する．患者ロボットは、二つの目のパン、チルト角 (3-DOF)、首 (2-DOF) の合計 5 自由度回転させることが可能であり、それによって各動作を表現する．ここでは、我々が [4, 5] において説明したモデルベースの認識手法を用い、実時間で頭の姿勢を計測する．Fig.5 において式 (6)、式 (7) から座標系 Σ_{CR} における認識した顔の位置 (x, y, z) を用いることで、 $\Delta\theta_{\hat{M}}, \Delta\phi_{\hat{M}}$ が計算できる．

$$\Delta\theta_{\hat{M}} = \text{atan2}(x, z) \quad (6)$$

$$\Delta\phi_{\hat{M}} = \text{atan2}(y, z) \quad (7)$$

4.1 目標視線方向

パン角の目標値を $\theta_{\hat{M}}^i$ 、チルト角を $\phi_{\hat{M}}^i$ とする．算出されたパン角の値を θ_M^i 、チルト角を ϕ_M^i とする．時系列は、 $i(0, 1, 2, \dots, i, i+1, \dots, t)$ として、以下のように記述できる．

$$\theta_M^i = \theta_{\hat{M}}^i + k_M \Delta\theta_M \quad (8)$$

$$\phi_M^i = \phi_{\hat{M}}^i + k_M \Delta\phi_M \quad (9)$$

式 (10)、式 (11) と実験の測定結果から、 θ_M^{i+1} と ϕ_M^{i+1} は、パン角とチルト角視線方向を用いることで以下のように求められる．

$$\theta_M^{i+1} = f_{\theta_M}(\theta^i, \theta_{\hat{M}}^i) \quad (10)$$

$$\phi_M^{i+1} = f_{\phi_M}(\phi^i, \phi_{\hat{M}}^i) \quad (11)$$

4.2 目の駆動を用いた追従

次に、人間のように早く動く物体に対する追従として、患者ロボットに取り付けられた二つのカメラによる目追従について提案する．これにより目追従は、以下の条件を満たす時に角度指示を行う．ここで、実機に取り付けられた二つカメラは、それぞれ左右に 6 度づつ旋回する．時系列は、 $i(0, 1, 2, \dots, i, i+1, \dots, t)$ 、パン方向の角度を θ_e^i 、チルト方向の角度を ϕ_e^i とすると以下のように記述できる．

$$\theta_e^{i+1} = \begin{cases} \theta_e^i - 6 & [deg] \quad (-6 \leq \Delta\theta_{\hat{M}}) \\ \theta_e^i & [deg] \quad (6 < \Delta\theta_{\hat{M}} < -6) \\ \theta_e^i + 6 & [deg] \quad (\Delta\theta_{\hat{M}} \leq 6) \end{cases} \quad (12)$$

$$\phi_e^{i+1} = \begin{cases} \phi_e^i - 6 & [deg] \quad (-6 \leq \Delta\phi_{\hat{M}}) \\ \phi_e^i & [deg] \quad (6 < \Delta\phi_{\hat{M}} < -6) \\ \phi_e^i + 6 & [deg] \quad (\Delta\phi_{\hat{M}} \leq 6) \end{cases} \quad (13)$$

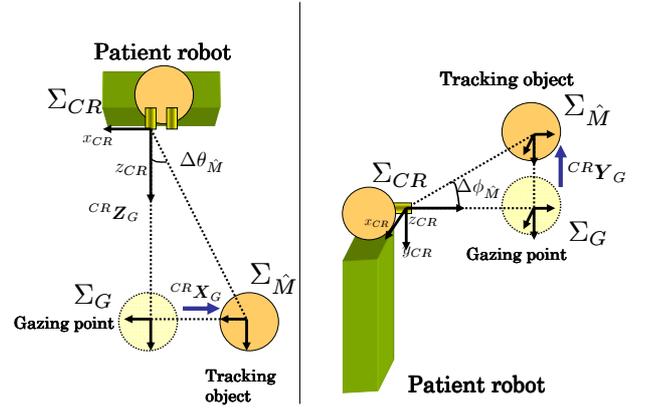


Fig. 5: Angle of servoing

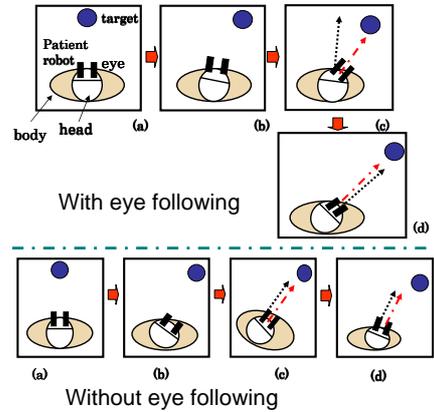


Fig. 6: With and without eye-following

このカメラの駆動は、 $\Delta\theta_{\hat{M}}, \Delta\phi_{\hat{M}}$ の値が大きくなった際に、Fig.6 に示したように首だけでは追いつけない対象物までの追従を助ける役割を持つ．このようにして、患者ロボットのパン、チルト角は、 $\Delta\theta_{\hat{M}}, \Delta\phi_{\hat{M}}$ が 0 に収束するように制御する．

4.3 Gazing Point

ここで、患者ロボットのビジュアルサーボを行う為、注視点の概念を定義する．Fig. 7 に右カメラの注視線の交点と $x_{M_0}-y_{M_0}$ 平面上に定義された注視点を定義した Σ_{M_0} と Σ_{CR} 関係は ${}^{M_0}\mathbf{T}_{CR}$ として同時変換で与えられ、 ${}^{M_0}\mathbf{T}_{CR}$ は回転行列 ${}^{M_0}\mathbf{R}_{CR}$ と位置ベクトル ${}^{M_0}\mathbf{p}_{CR}$ で求まる．そして、回転行列 ${}^{M_0}\mathbf{R}_{CR}$ は $[{}^{M_0}\mathbf{x}_{CR}, {}^{M_0}\mathbf{y}_{CR}, {}^{M_0}\mathbf{z}_{CR}]$ のように記述することが出来る．Fig. 7 に示した ${}^{M_0}\mathbf{l}_{CR}$ の方向は z_{CR} の方向と同じであり、 ${}^{M_0}\mathbf{l}_{CR}$ は以下のように表せる．

$${}^{M_0}\mathbf{l}_{CR} = {}^{M_0}\mathbf{p}_{CR} + k {}^{M_0}\mathbf{z}_{CR} \quad (14)$$

ここで、 k はスカラーの変数である． Σ_{M_0} 座標に表された右カメラの注視点は、 ${}^{M_0}\mathbf{p}_G = [{}^{M_0}x_G, {}^{M_0}y_G, 0]^T$ で

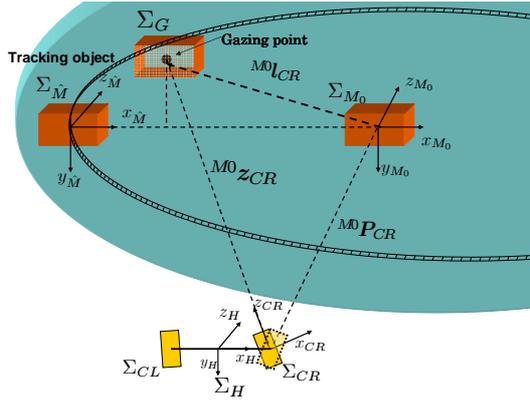


Fig. 7: Patient robot's gazing point

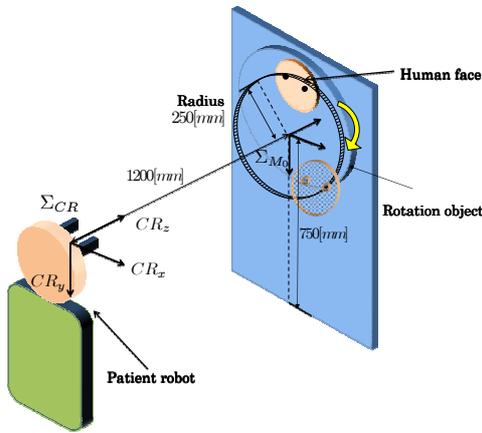


Fig. 8: Experiment environment

あり, z 方向における ${}^{M_0}l_{CR} = {}^{M_0}p_G$ は, $({}^{M_0}p_{CR})_z + k({}^{M_0}z_{CR})_z = 0$ となり, 更に, 通常 $({}^{M_0}z_{CR})_z \neq 0$, k は $k = -({}^{M_0}p_{CR})_z / ({}^{M_0}z_{CR})_z$ によって算出することが出来る. そして, Σ_{M_0} における注視点の x , y 座標は以下のように求められる.

$${}^{M_0}x_G = ({}^{M_0}p_{CR})_x + k({}^{M_0}z_{CR})_x \quad (15)$$

$${}^{M_0}y_G = ({}^{M_0}p_{CR})_y + k({}^{M_0}z_{CR})_y \quad (16)$$

5 実験

Fig.8 のように患者ロボットの正面に回転体を設置し, 首と目による物体追従を維持する実験を行った. 患者ロボットは人間の顔を印刷した回転体を追従する. 回転体は一定の速度 (0.63[rad/s], 0.21[rad/s], 0.063[rad/s]) で回転させた. 3種類の角速度で目追従応答と目追従応答なしの環境で実験を行った. そして, 視線方向を測定し, 顔の適合度を算出する.

5.1 目追従を用いたビジュアルサーボ

目追従あり, なしそれぞれで患者ロボットに人間の顔を追従をさせる. Fig.9 に実際の実験環境を示した. その変数 T は実験時間を示す.



Fig. 9: situation

5.2 角度制御

初めに, 以前までの制御方法であった首関節の角度制御により目標追従を用いて実験を行う. 回転体の角速度を 0.63[rad/s] とし, その結果を Fig.10, Fig. 11 に示した. ここで, 実験中の時刻 i における適合度 f^i は MBM と GA によって算出される. 目追従のありなしに関わらず, 角度制御では逐次的に角度指示を首関節のモータに与える為, Fig.10(a)(b), 11(a)(b) に示したように追従時の首関節の動きが機械的で荒くなる. この問題を解決する為, 今回首関節を人間らしく駆動させる為に首関節の角速度制御を提案する.

5.3 角速度制御

患者ロボットによる人間らしい関節駆動を実現する為, 首関節に内蔵されたステッピングモータに角速度指示を行い目標追従を行う. ここで, 角速度制御のコントローラについて説明する. 以前の制御方法は, 逐次的に首に角度指示を行うことで目標追従を行っていた. 今回は, 患者ロボットの首により人間動作をさせ, 安定して目標を追従させる為, 角速度指示による目標角速度への角速度制御を行う. パン方向の目標角速度を $\dot{\theta}_d$, チルト方向の目標角速度を $\dot{\phi}_d$ とし, Σ_{CR} における X 軸方向の比例ゲイン kp_x , Y 軸方向の比例ゲイン kp_y とすると以下の式から算出される.

$$\dot{\theta}_d = kp_x \Delta \theta_{\hat{M}} \quad (17)$$

$$\dot{\phi}_d = kp_y \Delta \phi_{\hat{M}} \quad (18)$$

回転体の角速度を 0.63[rad/s], 0.21[rad/s], 0.063[rad/s] の三通りで実験を行い, その結果を Fig. 12, Fig. 13 に

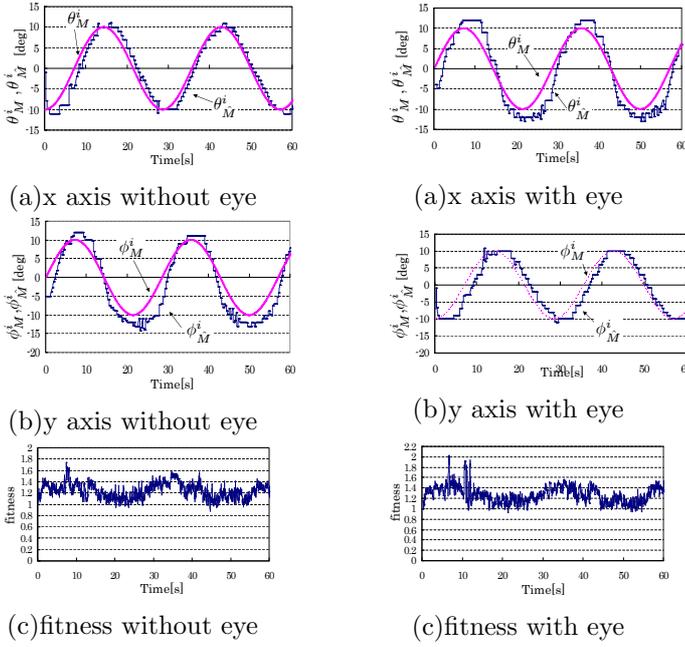


Fig. 10: Without eye($\omega = 0.21[\text{rad/s}]$)[angle-control]

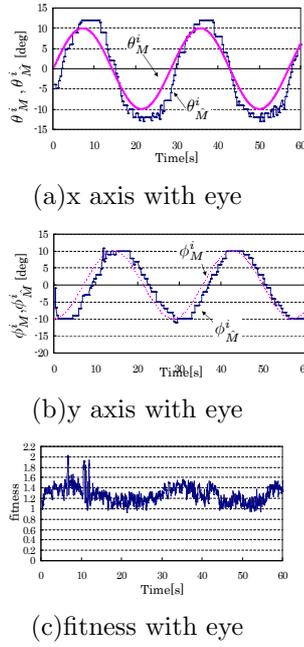


Fig. 11: With eye($\omega = 0.21[\text{rad/s}]$)[angle-control]

示した. Table. 1 にそれぞれの角速度で3度実験を行った結果から, 適合度の平均値 \bar{f} を示した.

- $0.63[\text{rad/s}]$ の場合 Fig12(c) に示したように目追従なしの場合, 回転体への追従が出来ず適合度が低下した. これは回転体の動きが速く首の駆動が追いつかなかったことが原因である. 一方, 目追従ありの場合, Fig.18,19 に示したグラフから, 偏差を0に近づけるように制御されていることがわかる. 更に, Fig.19 の a,b,c,d,e に示した箇所目追従を行い, 目標と注視点の偏差が大きくなった場合に目の駆動を行うことで, 偏差を瞬時に補償し追従が可能となっていることが確認できた.
- $0.21[\text{rad/s}]$ の場合 Fig.15(a) のAに示したように, 目標から突然値が跳ねている箇所がある. このように目追従を用いた場合, 目標値から大きく値が離れる箇所が見られる. これは, 認識誤差により目標物体が瞬時に動いたと誤認識してしまったことが原因として考えられる.
- $0.063[\text{rad/s}]$ の場合全体的に安定してできた. 目追従なしの方が精度よく追従出来ている. 目追従ありの場合, Fig.17 に示すように, に目追従のありなしに関わらず高い精度で追従でき結果は左程変わらなかった. これは, 目標物体の角速度が低い為, 目の駆動があまり行われなかったことが原因であると考えられる.

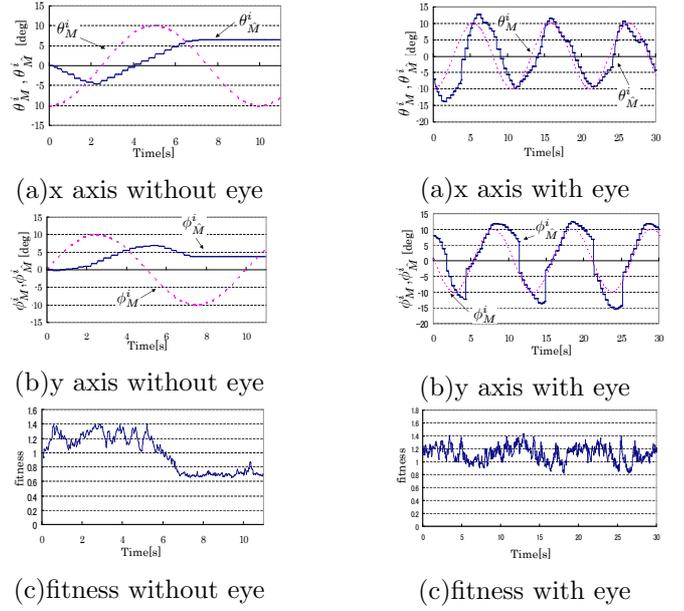


Fig. 12: Without eye($\omega = 0.63[\text{rad/s}]$)[angle velocity]

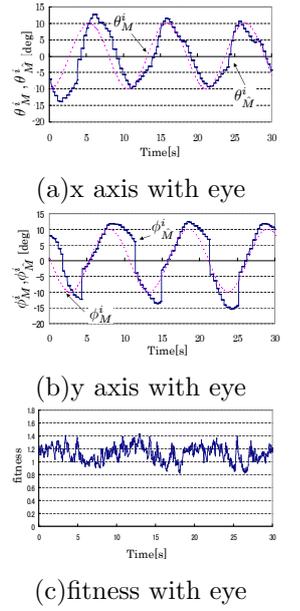


Fig. 13: With eye($\omega = 0.63[\text{rad/s}]$)[angle velocity]

表 1: Fitness value average: (a)with eye following, (b)without eye following [angle velocity-control]

angular velocity	(a)	(b)
$0.63[\text{rad/s}]$	1.08	0.83
$0.21[\text{rad/s}]$	1.20	1.19
$0.063[\text{rad/s}]$	1.24	1.24

6 結果

これらの結果から, 角速度制御を用いた場合, グラフの結果から角度制御の場合より滑らかに追従を行っていることがわかる. 更に, 安定して追従が行えるようになり目追従を行った際の追従性能が向上したことが確認でき, 動作が滑らかになることで人間らしさも改善することもできた. また, 目追従を用いた場合, 目追従なしに比べ認識の安定性が低下するが追従性能が向上することが確認できた. 角速度を偏差に比例して指示することから早い物体にも, 遅い物体にも対応する出来ることが確認できた.

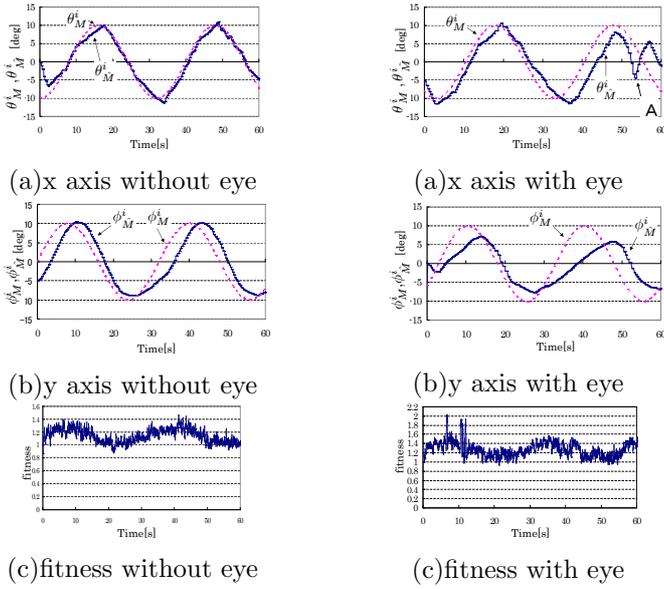


Fig. 14: Without eye($\omega = 0.21$ [rad/s])[angle velocity] Fig. 15: With eye($\omega = 0.21$ [rad/s])[angle velocity]

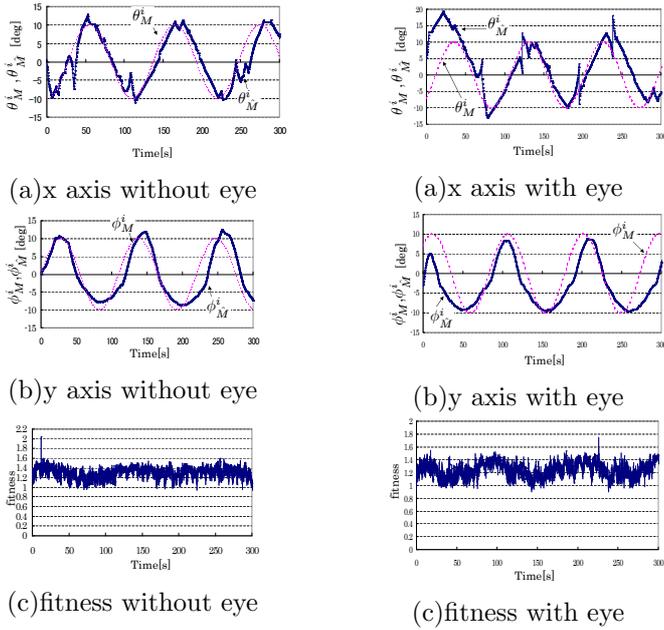


Fig. 16: Without eye($\omega = 0.063$ [rad/s])[angle velocity] Fig. 17: With eye($\omega = 0.063$ [rad/s])[angle velocity]

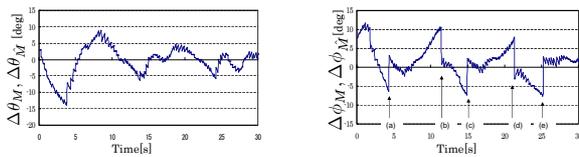


Fig. 18: recognition error($\Delta\theta$) Fig. 19: recognition error($\Delta\phi$)

7 結言

本論文では、患者ロボットの人間らしい物体追従について紹介した。また、人間の目の機能を患者ロボットに搭載し、その最適な制御方法について考察した。そして、実験結果から目追従を使用することの有効性を提案し、実証することができた。今後は、目追従の精度を上げ、更に多様な環境でも物体追従を可能し、患者ロボットによる医療訓練に取り入れたい。

参考文献

- [1] Yasushi Mae, Tomoharu Hashimoto, Satoko Tsuchiya, Mamoru Minami and Takeo Onishi: "Expression Generation of Patient Robot based on Emotion Model," *Journal of RSJ*, vol.25, 2J26, 2007. (in Japanese)
- [2] Yoshiro Kitagawa, Tomohito Ishikura, Wei Song, Yasushi Mae, Mamoru Minami and Kanji Tanaka: "Human-like Patient Robot with Chaotic Emotion for Injection Training," *Proc. of ICROS-SICE International Joint Conference*, pp.4635–4640, 2009.
- [3] Wei Song, Mamoru Minami and Yasushi Mae: "Evolutionary Head Pose Measurement by Improved Stereo Model Matching," *Proc. of SICE-ICASE International Joint Conference*, pp.4234–4239, 2006.
- [4] Fujia Yu, Wei Song, Minami Mamoru and Akira Yanou: "Visual Servoing with Quick Eye-Vergence to Enhance Trackability and Stability," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [5] Sho Nakamura, Kosuke Okumura, Akira Yanou and Mamoru Minami: "Visual Servoing of Patient Robot's Face and Eye-Looking Direction to Moving Human," *SICE Annual Conference 2011*, pp.1314–1319, 2011.
- [6] Yasushi Mae, Wei song, Tsuyoshi Ueki and Mamoru Minami: "Patient Robot for Training and Evaluation of Nursing Skill-Front Face Detection from View of Patient in Injection," *Journal of RSJ*, vol.23, 3J35, 2005.(in Japanese)
- [7] H. Suzuki and M. Minami: "Visual Servoing to catch fish Using Global/local GA Search," *Proc. of IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.10, Issue 3, pp.352–357, 2005.
- [8] B.Sciciliano and L.Villani:"Robot Force control", ISBN 0-7923-7733-8