平行2リンクマニピュレータのPID型視覚フィードバック制御*

河合 宏之[*1], 橋本 龍馬[*2], 鈴木 亮一[*3], 小林 伸明[*4]

Visual Feedback PID Control for 2-DOF Parallel Link Manipulator

Hiroyuki KAWAI[*1], Ryoma HASHIMOTO, Ryoichi SUZUKI and Nobuaki KOBAYASHI

[*1] Kanazawa Institute of Technology
7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa 9218501, Japan

This paper investigates the visual feedback control for 2-DOF parallel link manipulator with zero steady-state error. Firstly we present the model of visual feedback system of the eye-in-hand configuration. Secondly we consider a novel variable defined by visual information and joint angles in order to overcome steady-state error. Next we propose the PID control law for the visual feedback system and stability analysis of the closed loop system is discussed. Finally the validity of the proposed control law can be confirmed by comparing the experimental results.

Key Words : Robot, Motion Control, Stability, Computer-assisted surgery

1. はじめに

フィードバックループに視覚情報を組み込んだ制御は視覚フィードバック制御と呼ばれ，多くの制御方法が提案されている(1)．近年では，工場における組み立て用ロボット以外での応用例として，飛行体の位置姿勢制御(2)，移動体の位置姿勢制御(3)，注視 GA による魚の捕獲(4)などがあり，特に医療分野における研究も活発におこなわれている(5)．中でも腹腔鏡を把持する手術支援ロボット (以下，腹腔鏡把持ロボット) に手術視野を自動で確保させるために視覚フィードバック制御が適用されている(6)．腹腔鏡把持ロボットのひとつとして，安全上のメリットとして機構上の特徴から腹腔鏡を挿入する挿入孔を支点とする視野の操作が可能である平行リンク機構を有するロボットが提案されている(7)．そこで，本研究では腹腔鏡による視野の自動確保を想定した平行 2 リンクマニピュレータにおける視覚フィードバック制御について考える．平行 2 リンクマニピュレータによる腹腔鏡把持ロボットを視覚フィードバックシステムとして捉え，画像ベース法による 2 自由度平面マニピュレータの制御手法(8)を適用した場合

- 動きが平面でなくなるため，制御則に含まれるパラメータが未知となる
- 実システムにおいては摩擦やモデル化誤差，設置の変更などが原因で定常偏差が残る

という点が問題となる．この未知となるパラメータとはカメラと観測対象との相対位置に関するものである．従来研究(9)において，筆者らはこの相対位置姿勢をオブザーバにより推定しながら制御に用いる手法を提案し，その安定性解析をおこなっている．しかしながら，文献(9)の方法では観測対象として 4 点以上の既知の特徴点が必要となるため，腹腔鏡把持ロボットにおいては実用面から適用が困難となる．一方，実環境における視覚フィードバックシステムでは定常偏差が残ることが多いが，安定性を議論する上で明示的に問題として取り上げている研究はほとんどない．Garrido ら(10)によって画像ベース法での PID 制御がおこなわれているが，カメラや観測対象の動きを平面に限定しているものであり，平行 2 リンクマニピュレータによる視覚フィードバックシステムに対し

---

* 原稿受付 2012 年 2 月 29 日
[*1] 金沢工業大学工学部ロボティクス学科（〒 921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1）
[*2] 金沢工業大学大学院工学研究科
[*3] 正員，金沢工業大学工学部ロボティクス学科
[*4] 金沢工業大学工学部ロボティクス学科
Email: hiroyuki@neptune.kanazawa-it.ac.jp

て定常特性を考慮した研究は進められていない．

そこで本研究では，平行 2 リンクマニピュレータによる視覚フィードバックシステムに対して，定常特性を考慮した PID 型の視覚フィードバック制御について考える．マニピュレータの制御目的は，腹腔鏡から得られる画像の中心で観測対象をとらえることである．画像特徴量を直接利用するのでなく，変数変換から新たな状態変数を定義し，未知のパラメータを必要としない制御則を考える．また，画像特徴量と関連するその状態変数を積分した値を制御則に含ませることで定常特性を改善する．

本論文の構成は以下のとおりである．2 節で視覚情報と目標値の生成方法について説明する．3 節では PID 型視覚フィードバック制御則を提案し，構成される閉ループ系の安定性解析をおこなう. 4 節で実システムにおける実験結果を示し，最後に 5 節でまとめをおこなう．

2. 視覚情報による目標値生成

本研究で考える視覚フィードバック制御の制御目的は，観測対象をカメラ画像平面の中心でとらえることである．そこで，本節では最初に座標系の設定をした後，腹腔鏡から得られるカメラ画像における観測対象の特徴量 (特徴点) についてカメラモデルを用いて考える．つぎに，本研究で提案する視覚情報による目標値の生成について述べる．

2·1 座標系の定義と座標変換

本研究では，Fig. 1 に示すような Eye-in-Hand 構造をした平行 2 リンクマニピュレータの視覚フィードバック制御について考える．座標系を, 基準座標系 Σ_w，腹腔鏡下外科手術における腹腔鏡挿入孔位置を想定した座標系 Σ_h，カメラ (腹腔鏡) 座標系 Σ_c として定義する．平行 2 リンクマニピュレータの機構的特徴により Σ_w と Σ_h の座標原点の位置関係は不変であり，Σ_h と Σ_c の座標軸方向 (姿勢) と座標間距離は常に同じである. l_1, l_2 は各リンクの長さ，l_3 は Σ_h と Σ_c の座標間距離を表している．$q := (q_1, q_2)^T$ はアクチュエータにより制御可能な関節の角度を表している．

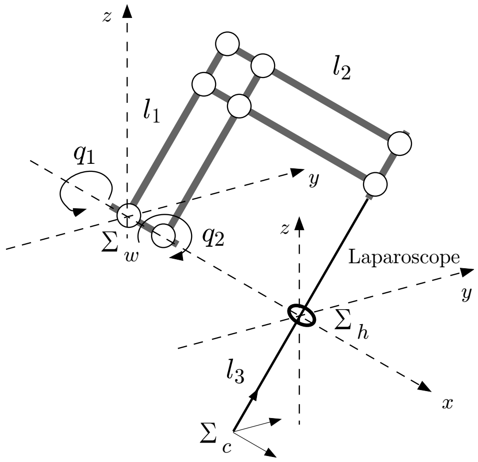

Fig. 1 2-DOF parallel link manipulator model

Σ_c 座標の軸方向を Σ_w 座標で表現するための回転行列 $R_{wc} \in R^{3\times3}$ について考える．なお，以降は式簡略化のため

$$\begin{cases} S_1 := \sin q_1 & C_1 := \cos q_1 \\ S_2 := \sin q_2 & C_2 := \cos q_2 \end{cases}$$

と表記する．関節 1 は Σ_w の x 軸まわりに回転するものであり，回転後の座標系を Σ_1 とおく．同様に関節 2 は Σ_1 の y 軸まわりの回転をするものであり，回転後の座標系を Σ_2 とおく．ここで，Σ_w から Σ_1 への回転行列を R_{w1}，Σ_1 から Σ_2 への回転行列を R_{12}，Σ_2 から Σ_c への回転行列を R_{2c} とすると，これらの回転行列は

$$R_{w1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & -S_1 \\ 0 & S_1 & C_1 \end{bmatrix},\ R_{12} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_2 & 0 & C_2 \end{bmatrix},\ R_{2c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

となる．よって R_{wc} は

$$R_{wc} = R_{w1}R_{12}R_{2c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & -S_1 \\ 0 & S_1 & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_2 & 0 & C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 \\ S_1S_2 & C_1 & -S_1C_2 \\ -C_1S_2 & S_1 & C_1C_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

と定めることができる．R_{wc} を用いると Σ_w を基準とした Σ_c の相対位置 p_{wc} は

$$\begin{aligned} p_{wc} &= p_{w2} + R_{w2}p_{h2} = p_{w2} + R_{wc}p_{2c} (\because R_{w2} = R_{wc}) \\ &= \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 \\ S_1S_2 & C_1 & -S_1C_2 \\ -C_1S_2 & S_1 & C_1C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -l_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + l_3 \begin{bmatrix} -S_2 \\ S_1C_2 \\ -C_1C_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

となる．Σ_h は Σ_w を x 軸方向に l_2 だけ平行移動した座標系であるため，Σ_h におけるカメラ光軸方向を正規化したベクトル n_c は

$$n_c := \frac{p_{hc}}{\|p_{hc}\|} = \begin{bmatrix} -S_2 \\ S_1C_2 \\ -C_1C_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

で表わされる．

2·2　カメラモデル

本研究における視覚フィードバックシステムでは，カメラを基準とした観測対象までの相対位置 $p_{co} = (x_{co}\ y_{co}\ z_{co})^T$ を直接取得することはできない．取得できるのはカメラからの視覚情報だけであり，Fig. 2 に示すようなピンホールカメラを考える．

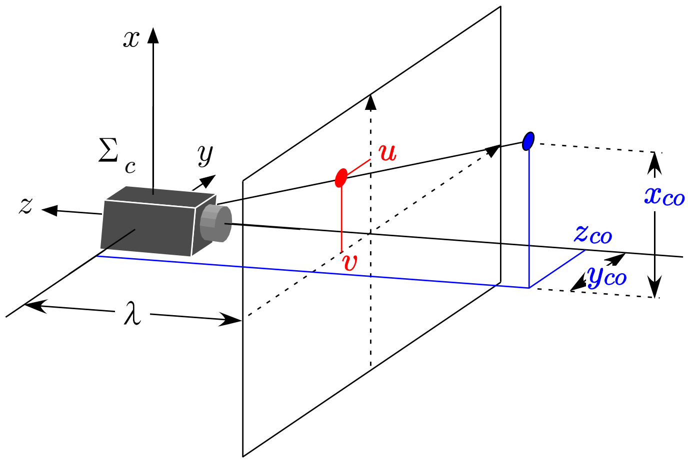

Fig. 2　A simple camera model

画像特徴量 f として観測対象の一点の画像面上の座標 $(u,\ v)^T$ を定義する．カメラの焦点距離を λ とすると，透視変換により

$$f = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{-z_{co}} \begin{bmatrix} x_{co} \\ y_{co} \end{bmatrix} \qquad (\because z_{co} < 0) \tag{5}$$

という関係が成り立つ[11]．しかし，本研究における制御システムは手先 (カメラ) の動きが平面運動に限られておらず，z_{co} が一定でない．また，文献[9]のようにオブザーバにより相対位置姿勢を推定することは腹腔内を想定すると困難である．そのため画像特徴量 f から相対位置 p_{co} を取得することは現実的に困難である．

2·3　目標値の定義と生成

制御目的を達成するための目標値について考える．制御目的は静止した観測対象 o を画像面中心 $f = 0$ でとらえることである．関節角度 q を操作することでカメラ光軸方向が決まるため，制御目的を達成する関節角度 q_d と q を一致させることが制御目的と等価となる．この q_d を視覚情報から生成することができれば文献[12]などにまと

められているような様々な制御方法で制御目的を達成することができる．しかし，本研究における視覚フィードバックシステムでは先ほど述べたように p_{co} が未知であるため，順運動学や逆運動学などによる解析をおこなったとしても q_d を直接生成することはできない．

制御目的を達成する目標関節角度 q_d を生成することはできないため，本研究では，仮想的な目標関節角度 q_f を考案し，制御目的を達成する制御方法について考える．

2·3·1　仮想的な目標関節角度 q_f の定義

仮想的な目標関節角度 q_f の定義を図を用いながら説明する．Fig. 3 は Σ_c を中心に画像面や観測対象の位置関係を表したものである．図中に示したように Σ_h における観測対象の位置ベクトル p_{ho} と式 (4) で定義した n_c とのなす角を θ_d，p_{co} と n_c とのなす角を θ_f と定義する．ただし，θ_d，θ_f は hco 平面上でのなす角とする．

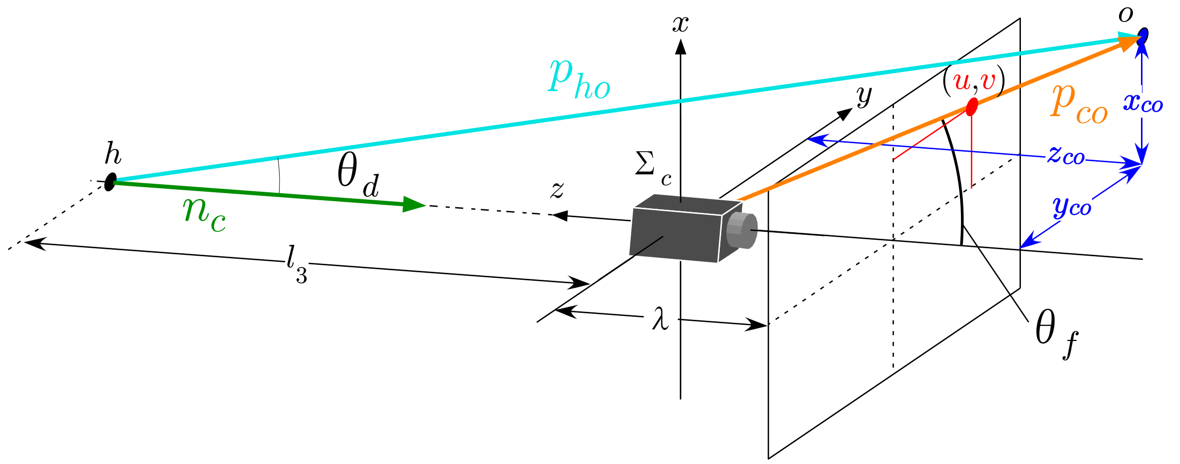

Fig. 3　Definition θ_d and θ_f

$\theta_d = 0$ を満たすことは制御目的と等価であり，そのときの関節角度が q_d であるため

$$f = 0 \Leftrightarrow \theta_d = 0 \Leftrightarrow q_d - q = 0 \tag{6}$$

という関係となる．ここで θ_f にも注目すると，θ_f と θ_d は同一平面 hco における角度であり

$$\begin{cases} \theta_d = 0 \Leftrightarrow |\theta_d| = |\theta_f| = 0 \\ \theta_d \neq 0 \Leftrightarrow |\theta_d| < |\theta_f| \end{cases} \tag{7}$$

となる．n_c を hco 平面上で θ_f 動かす関節角度を本研究で考案する仮想的な目標関節角度 q_f と定義する．このように定義した q_f は式 (6)(7) より

$$\text{式 (6)} \Leftrightarrow \theta_f = 0 \Leftrightarrow q_f - q = 0 \tag{8}$$

$$\|q_d - q\| \leq \|q_f - q\| < \gamma \tag{9}$$

$$\left\| \frac{d}{dt}(q_d - q) \right\| \leq \left\| \frac{d}{dt}(q_f - q) \right\| \tag{10}$$

の関係が常に成り立つ．ただし，γ は関節の可動域から決まる正の定数である．

2·3·2　q_f の生成方法

上述した q_f の生成方法について考える．まず，p_{co} は式 (5) を変形すると

$$p_{co} = \begin{bmatrix} x_{co} \\ y_{co} \\ z_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{z_{co}u}{\lambda} \\ -\frac{z_{co}v}{\lambda} \\ z_{co} \end{bmatrix} = -z_{co} \begin{bmatrix} \frac{u}{\lambda} \\ \frac{v}{\lambda} \\ -1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

となるため，z_{co} が未知であっても画像特徴量 f からベクトルの方向は取得できる．ここで，p_{co} が指す方向を Σ_w で表したベクトル β を

$$\beta := -\frac{1}{z_{co}} R_{wo} p_{co} = R_{wc} \begin{bmatrix} \frac{u}{\lambda} \\ \frac{v}{\lambda} \\ -1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

と定義する. q_f は n_c を β と同じ方向とする関節角度であるため，式 (4) より

$$\begin{bmatrix} -\sin(q_{f2}) \\ \sin(q_{f1})\cos(q_{f2}) \\ -\cos(q_{f1})\cos(q_{f2}) \end{bmatrix} = \frac{1}{\|\beta\|}\beta \tag{13}$$

を満たすため，q_{f2}，q_{f1} の順に

$$q_{f2} = \sin^{-1}\left(\frac{-uC_2+\lambda S_2}{\sqrt{u^2+v^2+\lambda^2}}\right) \tag{14}$$

$$q_{f1} = \sin^{-1}\left(\frac{uS_1S_2+vC_1+\lambda S_1C_2}{\sqrt{(uS_2+\lambda C_2)^2+v^2}}\right) \tag{15}$$

と生成することができる[1].

3. PID 型視覚フィードバック制御

前節にて本研究で提案する視覚情報からの目標値生成方法を説明した．本節では, 提案する制御則について説明する．次に，平行 2 リンクマニピュレータの制御における閉ループ系を新たな状態変数を定義して示していく. その後，安定性解析について述べる.

3·1 PID 型視覚フィードバック制御則

制御対象であるマニピュレータのダイナミクスは

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q) = \tau \tag{16}$$

のように表わされる．ただし $\tau \in R^2$ はトルク，$M(q) \in R^{2\times 2}$ は慣性行列，$C(q,\dot{q})\dot{q} \in R^2$ は遠心力・コリオリ力項を表すベクトル，$g(q) \in R^2$ は重力項を表すベクトルである．マニピュレータダイナミクスの性質として以下が知られている(12).

性質 1 $\frac{1}{2}\dot{M}(q)-C(q,\dot{q})$ は歪対称行列である.

性質 2 ベクトル $x,y,z \in R^2$ の全てにおいて次式を満たす非負となる定数 k_{C1} が存在する.

$$\|C(x,y)z\| \le k_{C1}\|y\|\ \|z\| \tag{17}$$

性質 3 ベクトル $x,y \in R^2$ の全てにおいて次式を満たし $k_g \le \left\|\frac{\partial g(q)}{\partial q}\right\|$ の非負となる定数 k_g が存在する.

$$\|g(x)-g(y)\| \le k_g\|x-y\| \tag{18}$$

ここで，新たな状態として

$$x = \int_0^t (q_f - q)dt \tag{19}$$

を定義し，本研究における PID 型視覚フィードバック制御の制御則として

$$\tau = K_p\dot{x}+K_v\ddot{x}+K_i x \tag{20}$$

を提案する．ただし $\tau \in R^2$ はトルクであり，$K_p,K_v,K_i \in R^{2\times 2}$ は対角に正の値を持つ正定対称行列でありそれぞれ位置（position）ゲイン，速度（velocity）ゲイン，積分（integral）ゲインと呼ぶ. Fig. 4 に式 (20) をブロック線図で表したものを示す．この制御則の特徴は大きく二点あり，一点目はこれまで議論してきたように視覚情報から生成された目標値の偏差系をとっており積分項を含んでいることである．この特徴を持たせることにより定常特性の改善が期待できる. 二点目は重力補償項が含まれていないことである．後に議論する安定性解析において，重力補償項を必要としないことは大きな意味を持っており，制御対象の設置に不確かさが含まれていても安定性に影響を与えないことを意味している.

---

[1]本研究で考えるシステムの関節角度 q_1，q_2 の可動域は $\pm\frac{\pi}{2}$[rad] のため一意に定まる

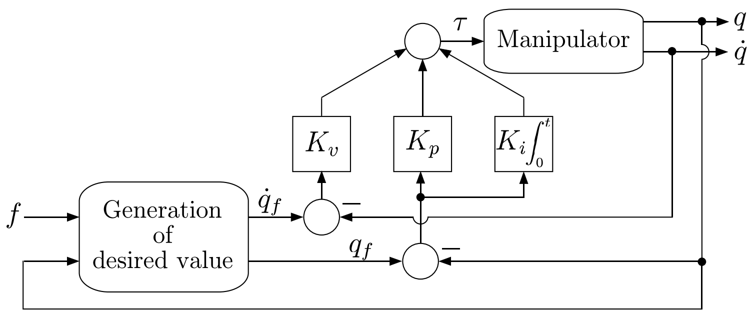

Fig. 4　Block-diagram: PID control

3·2　状態変数と閉ループ系

マニピュレータダイナミクス (16) と提案した入力トルク (20) で構成される閉ループ系は

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)=K_p\dot{x}+K_v\ddot{x}+K_ix \tag{21}$$

であり，状態ベクトルを $[x^T\ \dot{x}^T\ \dot{q}^T]^T\in R^6$ とすると

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\\ M(q)^{-1}\left[K_p\dot{x}+K_v\ddot{x}+K_ix-C(q,\dot{q})\dot{q}-g(q)\right]\end{bmatrix} \tag{22}$$

となる. 式 (22) における平衡点は

$$\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}K_i^{-1}g(q_d)\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \tag{23}$$

のように重力項と状態 x（偏差を積分したもの）に関する項が釣り合ったものとなる.

そこで，平衡点を原点とするために新たな状態変数

$$z:=x-K_i^{-1}g(q_d) \tag{24}$$

を定義し，状態ベクトルを $[z^T\ \dot{x}^T\ \dot{q}^T]^T\in R^6$ とした閉ループ系は

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}z\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\\ M(q)^{-1}\left[K_p\dot{x}+K_v\ddot{x}+K_iz-C(q,\dot{q})\dot{q}-g(q)+g(q_d)\right]\end{bmatrix} \tag{25}$$

で表わされる.

さらに，安定性解析をおこなうために，状態変数として

$$\tilde{q}:=q_d-q \tag{26}$$

$$\xi:=\alpha z+\tilde{q}\quad (\text{s.t. }\alpha>0) \tag{27}$$

を定義する．観測対象が静止しているので $\dot{q}_d=0$ であるため

$$\frac{d}{dt}(\tilde{q})=\dot{\tilde{q}}=-\dot{q} \tag{28}$$

が成り立つ．以上より，状態ベクトルを $[\xi^T\ \dot{x}^T\ \tilde{q}^T\ \dot{q}^T]^T\in R^8$ とすると，平衡点を原点に持つ閉ループ系は

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \tilde{q}\\ \dot{q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha\dot{x}-\dot{q}\\ \ddot{x}\\ -\dot{q}\\ M(q)^{-1}\left[K_p\dot{x}-\frac{1}{\alpha}K_i\tilde{q}+K_v\ddot{x}+\frac{1}{\alpha}K_i\xi-C(q,\dot{q})\dot{q}-g(q)+g(q_d)\right]\end{bmatrix} \tag{29}$$

となる．このとき，式 (8) より

$$\dot{x}=0\ \Leftrightarrow\ \tilde{q}=0 \tag{30}$$

であることにも注意しておく.

3·3　安定性解析

本項では，閉ループ系 (29) の平衡点の安定性解析をおこなう. 解析はリアプノフの安定定理（Lyapunov stability theorem）を拡張したラサールの不変性原理（LaSalle’s invariance principle）を用いる[13].

視覚フィードバック制御においては，制御全体のシステムに観測対象の動きを予測，探索するようなシステムが組み込まれていない限り，観測対象がカメラ視野外に存在する場合は目的の動作をしない．視野に関する領域のほか，本研究の PID 型視覚フィードバック制御では

$$\eta := \frac{1}{k_{C1}}\left[\frac{\lambda_{\min}\{K_v\}[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}} - \lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}\right] \tag{31}$$

で定義される実数を半径とする吸収領域

$$D := \left\{\xi,\dot{x},\ddot{x} \in R^2 : \left\|\begin{matrix}\xi\\ \dot{x}\\ \ddot{x}\end{matrix}\right\| < \eta\right\} \tag{32}$$

における安定性を考える．ただし，式中の k_{C1},k_g はマニピュレータダイナミクスの**性質 2,3** で示したものであり，$\lambda_{\min}$，λ_{Max} は行列の最小，最大固有値である．

ここで，式 (27) で定義した α を含むスカラ値

$$Q_{11} := \alpha[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g] - \lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\} \tag{33}$$

$$Q_{22} := \lambda_{\min}\{K_v\} - \alpha[\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}+k_{C1}\gamma] \tag{34}$$

を定義することで安定性解析に関する次の定理が示される．

定理 1 吸収領域 D において閉ループ系の平衡点 $(\xi^T\ \dot{x}^T\ \tilde{q}^T\ \dot{q}^T)^T = 0 \in R^8$ は

$$\lambda_{min}\{K_p\} > k_g \tag{35}$$

$$\frac{\lambda_{min}\{M\}\lambda_{min}\{K_v\}}{\lambda_{Max}^2\{M\}} > \frac{\lambda_{Max}\{K_i\}}{\lambda_{min}\{K_p\}-k_g} \tag{36}$$

$$Q_{11}Q_{22} - \frac{1}{4}\,\lambda_{Max}^2\{K_p\} > 0 \tag{37}$$

を満たすとき漸近安定である．

（証明）　リアプノフ関数候補 V を考え，それが正定関数であり時間微分した $\dot{V}$ が準負定関数となり $\dot{V}=0$ となる解の唯一性を示すことで証明をおこなう．

リアプノフ関数候補

リアプノフ関数候補 V として

$$V(\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q}) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix}\frac{1}{\alpha}K_i & 0 & 0\\ 0 & \alpha K_v & -\alpha M(q)\\ 0 & -\alpha M(q) & M(q)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix} + \frac{1}{2}\tilde{q}^T[K_p - \frac{1}{\alpha}K_i]\tilde{q} + U(q_d-\tilde{q}) - U(q_d) + \tilde{q}^T g(q_d) \tag{38}$$

を考える. $U(q)$ は位置エネルギーを意味しており $g(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q}$ である．まず，V が正定関数であることを示していく．

式 (38) 右辺の行列で表現されていない部分から K_{pi}，V_{pi} を

$$K_{pi} := K_p - \frac{1}{\alpha}K_i \tag{39}$$

$$V_{pi}(\tilde{q}) := \frac{1}{2}\tilde{q}^T K_{pi}\tilde{q} + U(q_d-\tilde{q}) - U(q_d) + \tilde{q}^T g(q_d) \tag{40}$$

と定義し，V_{pi} が正定値をとることを示す．式 (40) から

$$V_{pi}(0) = 0 \in R \tag{41}$$

である．式 (40) を $\tilde{q}$ で微分すると

$$\frac{\partial}{\partial\tilde{q}}V_{pi} = K_{pi}\tilde{q} + \frac{\partial}{\partial\tilde{q}}U(q_d - \tilde{q}) + g(q_d) \tag{42}$$

が導かれる．$g(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q}$ から

$$\frac{\partial}{\partial\tilde{q}}U(q_d - \tilde{q}) = \frac{\partial(q_d - \tilde{q})}{\partial\tilde{q}}^T \frac{\partial U(q_d - \tilde{q})}{\partial(q_d - \tilde{q})} = -g(q_d - \tilde{q}) \tag{43}$$

が成り立つため，式 (42)(43) より

$$\frac{\partial}{\partial\tilde{q}}V_{pi} = K_{pi}\tilde{q} - g(q_d - \tilde{q}) + g(q_d) \tag{44}$$

である．これをさらに $\tilde{q}$ で微分すると

$$\frac{\partial}{\partial\tilde{q}}\left[\frac{\partial}{\partial\tilde{q}}V_{pi}\right] = K_{pi} - \frac{\partial(q_d - \tilde{q})}{\partial\tilde{q}}^T \frac{\partial g(q_d - \tilde{q})}{\partial(q_d - \tilde{q})} = K_{pi} - \frac{\partial(q_d - \tilde{q})}{\partial\tilde{q}}^T \frac{\partial g(q)}{\partial q} = K_{pi} + \frac{\partial g(q)}{\partial q} \tag{45}$$

となる．K_{pi} が正定行列ならば

$$\lambda_{\min}\{K_{pi}\} > \left\|\frac{\partial g(q)}{\partial q}\right\| \tag{46}$$

を満たす，いいかえるとマニピュレータダイナミクスの**性質 3** と式 (39) から

$$\lambda_{\min}\{K_p - \frac{1}{\alpha}K_i\} > k_g \tag{47}$$

を満たすのであれば式 (45) は正定である. K_p, K_i が正定行列であるため，式 (47) から

$$\lambda_{\min}\{K_p - \frac{1}{\alpha}K_i\} \geq \lambda_{\min}\{K_p\} - \frac{1}{\alpha}\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\} \tag{48}$$

となる．ここで，α が

$$\alpha > \frac{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}}{\lambda_{\min}\{K_p\} - k_g} \tag{49}$$

であれば，式 (47) より V_{pi} を二階微分した式 (45) は正定となる．よって V_{pi} は正定関数である．

V_{pi} が正定関数であるためリアプノフ関数候補 V は

$$V(\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q}) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix}\frac{1}{\alpha}K_i & 0 & 0\\ 0 & \alpha K_v & -\alpha M(q)\\ 0 & -\alpha M(q) & M(q)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix} + V_{pi} \geq \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix}\frac{1}{\alpha}K_i & 0 & 0\\ 0 & \alpha K_v & -\alpha M(q)\\ 0 & -\alpha M(q) & M(q)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\xi\\ \dot{x}\\ \dot{q}\end{bmatrix} \tag{50}$$

を満たす. 一方で以下の不等式

$$\frac{1}{\alpha}\xi^T K_i \xi \geq \frac{1}{\alpha}\lambda_{\min}\{K_i\}\|\xi\|^2 \tag{51}$$

$$\alpha\dot{x}^T K_v \dot{x} \geq \alpha\lambda_{\min}\{K_v\}\|\dot{x}\|^2 \tag{52}$$

$$\dot{q}^T M(q)\dot{q} \geq \lambda_{\min}\{M\}\|\dot{q}\|^2 \tag{53}$$

$$-\alpha\dot{x}^T M(q)\dot{q} \geq -\alpha\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}\|\dot{x}\|\,\|\dot{q}\| \tag{54}$$

も考慮するとリアプノフ関数候補の下界は

$$V(\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q}) \geq \frac{\alpha}{2}\begin{bmatrix}\|\xi\|\\ \|\dot{x}\|\\ \|\dot{q}\|\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix}\frac{1}{\alpha^2}\lambda_{\min}\{K_i\} & 0 & 0\\ 0 & \lambda_{\min}\{K_v\} & -\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}\\ 0 & -\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\} & \frac{1}{\alpha}\lambda_{\min}\{M\}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\|\xi\|\\ \|\dot{x}\|\\ \|\dot{q}\|\end{bmatrix} \tag{55}$$

と表すことができる．式 (55) 右辺の 3×3 行列が正定行列であればリアプノフ関数候補 V(38) は正定関数となる．式 (55) 右辺の 3×3 行列が正定行列である条件は，その行列の右下の 2×2 要素からなる部分行列のノルムが正であることである．よって条件は

$$\frac{1}{\alpha}\lambda_{\min}\{K_v\}\lambda_{\min}\{M\} - \lambda_{\mathrm{Max}}^2\{M\} > 0 \tag{56}$$

となり，整理することで

$$\frac{\lambda_{\min}\{M\}\lambda_{\min}\{K_v\}}{\lambda^2_{\mathrm{Max}}\{M\}} > \alpha \tag{57}$$

が導かれる．

以上のことから安定条件である式 (35)(36) を満たすのであれば式 (49)(57) を満足する

$$\frac{\lambda_{\min}\{M\}\lambda_{\min}\{K_v\}}{\lambda^2_{\mathrm{Max}}\{M\}} > \alpha > \frac{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}}{\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g} \tag{58}$$

となる α が存在し，リアプノフ関数候補 V(38) は正定関数となる．

リアプノフ関数候補の時間微分

リアプノフ関数候補 V(38) を展開すると

$$\begin{aligned} V(\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q}) =& \frac{1}{2\alpha}\xi^T K_i\xi + \frac{\alpha}{2}\dot{x}^T K_v\dot{x} - \alpha\dot{x}^T M(q)\dot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} \\ &+\frac{1}{2}\tilde{q}^T[K_p - \frac{1}{\alpha}K_i]\tilde{q} + U(q_d-\tilde{q}) - U(q_d) + \tilde{q}^T g(q_d) \end{aligned} \tag{59}$$

であり，マニピュレータダイナミクスの**性質 1** や閉ループ系 (29) を用いてそれぞれの項を時間微分すると

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2\alpha}\xi^T K_i\xi\right) = \frac{1}{\alpha}(\alpha\dot{x}-\dot{q})^T K_i\xi = \dot{x}^T K_i\xi - \frac{1}{\alpha}\dot{q}^T K_i\xi \tag{60}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\alpha}{2}\dot{x}^T K_v\dot{x}\right) = \alpha\dot{x}^T K_v\ddot{x} \tag{61}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(-\alpha\dot{x}^T M(q)\dot{q}) &= \alpha\left[-\ddot{x}^T M(q)\dot{q} - \dot{x}^T\dot{M}(q)\dot{q} - \dot{x}^T M(q)\ddot{q}\right] \\ &= -\alpha\ddot{x}^T M(q)\dot{q} - \alpha\dot{x}^T C(q,\dot{q})^T\dot{q} - \alpha\dot{x}^T K_p\dot{x} \\ &\quad +\dot{x}^T K_i\tilde{q} - \alpha\dot{x}^T K_v\ddot{x} - \dot{x}^T K_i\xi + \alpha\dot{x}^T g(q) - \alpha\dot{x}^T g(q_d) \end{aligned} \tag{62}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q}\right) &= \frac{1}{2}\dot{q}^T\dot{M}(q)\dot{q} + \dot{q}^T M(q)\ddot{q} \\ &= \dot{q}^T K_p\dot{x} - \frac{1}{\alpha}\dot{q}^T K_i\tilde{q} + \dot{q}^T K_v\ddot{x} + \frac{1}{\alpha}\dot{q}^T K_i\xi + \dot{q}^T g(q_d) - \dot{q}^T g(q) \end{aligned} \tag{63}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}\tilde{q}^T[K_p - \frac{1}{\alpha}K_i]\tilde{q}\right) = -\dot{q}^T[K_p - \frac{1}{\alpha}K_i]\tilde{q} = -\dot{q}^T K_p\tilde{q} + \frac{1}{\alpha}\dot{q}^T K_i\tilde{q} \tag{64}$$

$$\frac{d}{dt}U(q_d-\tilde{q}) = \frac{d}{dt}U(q) = \dot{q}^T g(q) \tag{65}$$

$$\frac{d}{dt}(-U(q_d)) = 0 \tag{66}$$

$$\frac{d}{dt}(\tilde{q}^T g(q_d)) = -\dot{q}^T g(q_d) \tag{67}$$

となるため，リアプノフ関数候補 (38) を時間微分すると

$$\begin{aligned} \dot{V}\,(\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q}) =& -\alpha\dot{x}^T K_p\dot{x} + \dot{x}^T K_i\tilde{q} - \alpha\ddot{x}^T M(q)\dot{q} + \dot{q}^T K_p(\dot{x}-\tilde{q}) \\ &+\dot{q}^T K_v\ddot{x} - \alpha\dot{x}^T C(q,\dot{q})^T\dot{q} - \alpha\dot{x}^T g(\tilde{q}) \end{aligned} \tag{68}$$

となる．ここで，式 (9)(10) より

$$\|\dot{x}\| \geq \|\tilde{q}\| \tag{69}$$

$$\|\dot{x}\| \geq \|(\dot{x}-\tilde{q})\| \tag{70}$$

$$\|\ddot{x}\| \geq \|-\dot{q}\| \tag{71}$$

であることを考慮して各項の上界を考えると，正定対称行列の特性から

$$-\alpha\dot{x}^T K_p\dot{x} + \dot{x}^T K_i\tilde{q} \leq -\alpha\dot{x}^T K_p\dot{x} + \dot{x}^T K_i\dot{x} \leq -[\alpha\lambda_{\min}\{K_p\} - \lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}]\|\dot{x}\|^2 \tag{72}$$

$$-\alpha\ddot{x}^T M(q)\dot{q} + \dot{q}^T K_v\ddot{x} = -\dot{q}^T[\alpha M(q) - K_v]\ddot{x} \leq [\alpha\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\} - \lambda_{\min}\{K_v\}]\|\ddot{x}\|^2 \tag{73}$$

$$-\dot{q}^T K_p(\dot{x}-\tilde{q}) \leq \lambda_{\mathrm{Max}}\{K_p\}\|\dot{q}\|\|(\dot{x}-\tilde{q})\| \leq \lambda_{\mathrm{Max}}\{K_p\}\|\ddot{x}\|\|\dot{x}\| \tag{74}$$

であり，マニピュレータダイナミクスの**性質 2,3** から

$$-\alpha\dot{x}^TC(q,\dot{q})^T\dot{q} \le \alpha k_{C1}\|\dot{x}\|\|\dot{q}\|^2 \le \alpha k_{C1}\|\dot{x}\|\|\ddot{x}\|^2 < \alpha k_{C1}\gamma\|\ddot{x}\|^2 \tag{75}$$

$$-\alpha\dot{x}^Tg(\tilde{q}) \le \alpha\ k_g\|\dot{x}\|\|\tilde{q}\| \le \alpha k_g\|\dot{x}\|^2 \tag{76}$$

が導かれる．したがって式 (33)(34) より

$$\dot{V}\ (\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q}) \le -\begin{bmatrix}\|\dot{x}\|\\ \|\ddot{x}\|\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix}Q_{11} & -\frac{1}{2}\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_p\}\\ -\frac{1}{2}\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_p\} & Q_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\|\dot{x}\|\\ \|\ddot{x}\|\end{bmatrix} \tag{77}$$

と $\dot{V}$ の上界を示すことができる．

次に，吸収領域 D において $\dot{V}$ が準負定関数であることを示していく．まず，安定条件である式 (36) から

$$\frac{\lambda_{\min}\{M\}\lambda_{\min}\{K_v\}[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}} > \lambda^2_{\mathrm{Max}}\{M\} \tag{78}$$

を満たしており，$\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\} \ge \lambda_{\min}\{M\}$ であるのは明らかであるため

$$\frac{\lambda_{\min}\{K_v\}[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}} > \lambda_{\mathrm{Max}}\{M\} \tag{79}$$

であり，$k_{C1} \ge 0$ であるため

$$\frac{1}{k_{C1}}\left[\frac{\lambda_{\min}\{K_v\}[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}} - \lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}\right] \ge 0 \tag{80}$$

となる．したがって式 (31) より式 (32) の吸収領域 D であれば $\|\dot{x}\| < \gamma < \eta$ であるため

$$\gamma < \frac{1}{k_{C1}}\left[\frac{\lambda_{\min}\{K_v\}[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}} - \lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}\right] \tag{81}$$

となり，整理すると

$$\frac{\lambda_{\min}\{K_v\}}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}+k_{C1}\gamma} > \frac{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}}{[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]} \tag{82}$$

であり，上式と式 (58) から α は

$$\frac{\lambda_{\min}\{K_v\}}{\lambda_{\mathrm{Max}}\{M\}+k_{C1}\gamma} > \alpha > \frac{\lambda_{\mathrm{Max}}\{K_i\}}{[\lambda_{\min}\{K_p\}-k_g]} \tag{83}$$

を満たしていることが分かる．したがって Q_{11}, Q_{22} は正の値をとり，安定条件である式 (37) を満たせば Schur の補題から $\dot{V}$ の上界を示した式 (77) の右辺は負定関数である．よって，$\dot{V}$ は ξ の大きさに依存しないことを考慮して準負定関数となる．

解の唯一性

式 (77) より $\dot{x}=0$ かつ $\ddot{x}=0$ のとき $\dot{V}\ (\xi,\dot{x},\tilde{q},\dot{q})=0$ となる．閉ループ系 (29) と仮想的な目標関節角度の定義からなる式 (69)(71) より $\dot{V}\ =0$ となる時刻 t における状態を考えると

$$\dot{x}(t)=0 \Leftrightarrow \tilde{q}(t)=0 \tag{84}$$

$$\ddot{x}(t)=0 \Leftrightarrow -\dot{q}(t)=0 \tag{85}$$

$$\dot{\tilde{q}}(t)=-\dot{q}(t)=0 \tag{86}$$

$$\dot{\xi}(t)=\alpha\dot{x}(t)-\dot{q}(t)=0 \tag{87}$$

$$\ddot{q}(t)=\frac{1}{\alpha}M(q_d)^{-1}K_i\xi(t) \tag{88}$$

である．時刻 t 以降 $\dot{x}=0$ かつ $\ddot{x}=0$ であれば $\ddot{q}(t)=0$ である．そのため式 (88) より

$$\xi(t)=0 \tag{89}$$

を合わせた各状態の原点 $[\xi^T\ \dot{x}^T\ \tilde{q}^T\ \dot{q}^T]^T=0\in R^8$ のときに唯一 $\dot{V}\ =0$ をとる．よって，リアプノフの安定定理を拡張したラサールの定理よりシステムの平衡点は漸近安定である．

(Q.E.D.)

吸収領域 D は式 (31) で定義する η の大きさで決まるため，ゲインによって調整可能である．

4. 検　証　実　験

4·1　システム構成

提案した制御則を実装した視覚フィードバックシステムを構成し，提案手法の検証実験をおこなう．実験システムの構成を Fig. 5 に示す．腹腔鏡を手先に固定したマニピュレータ，画像処理をおこなう PC，制御則を実装するディジタル制御装置 (DSP：dSPACE，DS1104)，観測対象としてのマーカを先端に取り付けた鉗子から構成されている．腹腔鏡と鉗子は実際に腹腔鏡下手術で使用するものと同形のもの (Schoelly , FlexiScope 180X-3CCD) を用いている．画像処理は画像処理ライブラリ OpenCV を用いており，画像のゆがみによる誤差を小さくするために腹腔鏡から取り込んだ画像のキャリブレーションをおこなった後，閾値関数によりマーカの位置 (画像特徴量) を検出している．腹腔内を想定するものとして背景を赤色，マーカは緑色という実験環境を構築し，画像処理による誤認識が発生しにくいようにする．DSP では，画像特徴量とエンコーダから得られる各関節角度情報を基に目標値を生成し，制御則に従い 1[ms] 周期で制御量を決定し，モータドライバを介してマニピュレータを制御することで制御目的を達成する．

4·2　実験方法

初期姿勢における視野内に観測対象を設置し，観測対象が画像中心となるようマニピュレータを制御する定置制御実験をおこなう．この実験では提案した制御則の定常特性の評価のほか，ゲイン変更による特性の変化，マニピュレータ設置姿勢に不確かさを含む場合の特性の評価をおこなう．ここでの初期姿勢とは，腹腔鏡の向きがマニピュレータ底面に対して鉛直となる姿勢のことであり，そのときの関節角度は $q=0$ である．今回の実験では初期姿勢において $u=140\pm10$[pixels]，$v=-160\pm10$[pixels] となる位置に観測対象を設置して実験をおこなう．提案した制御則のゲインとして $K_0=\{K_{p0},K_{v0},K_{i0}\}$ と $K_1=\{K_{p1},K_{v1},K_{i1}\}$ の 2 つを用意する．ただし，$K_{p0}=\mathrm{diag}\{2.0,3.4\}$, $K_{p1}=\mathrm{diag}\{2.0,20.0\}$, $K_{v0}=\mathrm{diag}\{2.6,26.0\}$, $K_{v1}=\mathrm{diag}\{2.6,26.0\}$, $K_{i0}=\mathrm{diag}\{0.8,1.0\}$, $K_{i1}=\mathrm{diag}\{0.8,8.0\}$ である．なお，これらのゲインを前述した安定条件と照らし合わせると K_0 は条件を満たすが，K_1 は条件を満たさないものとなる．

また，マニピュレータ設置の姿勢に不確かさを含むものとして Fig. 6，Fig. 7 のようにマニピュレータの基準座標 x 軸方向と y 軸方向にそれぞれ 25[deg] 傾けた状態となるようマニピュレータを設置して実験をおこなう．ここではマニピュレータを傾けずに設置した実験環境を Setup O，x 軸方向に傾けたものを Setup X，y 軸方向に傾けたものを Setup Y と呼ぶこととする．設置姿勢の不確かさを含むときの特性を比較して評価するために，今回提案する PID 型視覚フィードバック制御だけでなく，重力補償を含む従来の画像ベース法による制御[8]でも実験をおこなう．この制御方法は画像特徴量をそのまま偏差とした PD 制御のような制御則になっているため，ここでは PD 制御と呼ぶこととする．PD 制御の制御則には観測対象との相対距離情報が必要であるが，今回は目標姿勢をとるときの相対距離をあらかじめ測定しておき，定数として設定している．提案手法と PD 制御では共通のゲインで比較させることができないため，PD 制御のゲインは，予備実験として Setup O でゲイン K_1 を用いて提案手法で制御したときの記録をとり，立ち上がり時間が同じくらいになるよう実験的に調整したものを用いる．

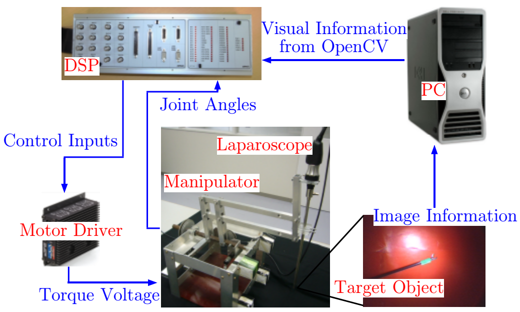

Fig. 5　Experiment system configuration


Fig. 6　Setup X

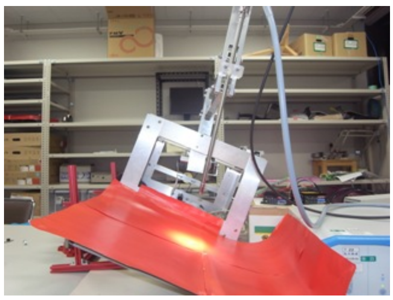
Fig. 7　Setup Y

4·3　実験結果

実験結果を Fig. 8–14 に示す．表記を簡略化するため提案手法のゲイン K_0 での結果を PID_{K_0} と，ゲイン K_1 での結果を PID と表記している．これらの実験結果は 1 [sec] 時から制御を開始したときのものとなっている．

Fig. 8 に注目すると，マニピュレータの動作が一度停止した後も動作を再開し，定常偏差を減らす動作をしてい

ることが分かる．よって，本研究で取り組む問題として設定した，定常特性が改善された制御則の提案が達成されていると言える．しかし，100 [sec] 経過後も偏差が ±5 [pixels] 程度残っており，収束するまでに長い時間がかかっている．それに対して Fig. 9 に注目すると，ゲイン K_1 は安定性解析で示した安定条件を満たすものではないが，安定性を損なうことなく，10 [sec] 程度で偏差が ±5 [pixels] 程度以内に収束していることが分かる．この結果から，前述した安定条件は十分条件のため，実際に安定となる領域は前述したものより広い範囲で存在すると考えられる．

設置姿勢に不確かさを含んだ場合の実験結果を見ていく．まず，比較する際の基準となる，通常の姿勢で設置したときの実験結果を示す Fig. 9–10 に注目すると，立ち上がり時間が同じ程度となっていることが分かる．PID 制御と比べ PD 制御での定常偏差が少し大きいが，許容できる範囲である．したがって，マニピュレータの設置姿勢に不確かさがなければ重力補償が適切に機能し PD 制御でも優れた制御性能を示すことが分かる．Fig. 11–12 および Fig. 13–14 に注目すると，PID 制御での実験結果はマニピュレータを傾けて設置した場合でもオーバーシュートの大きさは変化するが立ち上がり時間や定常特性に大きな変化はなかった．それと比較して PD 制御での実験結果は，それぞれ傾けた方向の重力の影響を受ける定常偏差が大きくなるものとなった．よって，PD 制御では重力補償のモデル化誤差が大きくなってしまうことで定常偏差も大きくなってしまっているが，PID 制御ではマニピュレータの設置姿勢が制御特性に影響を与えないロバストなシステムとなっていることが実験結果からも確認された．

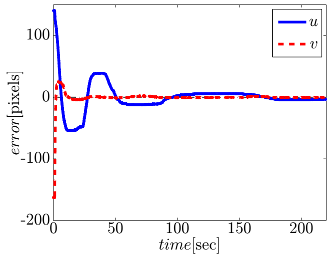

Fig. 8　PID$_{K_0}$ Setup O

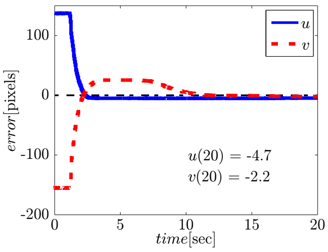

Fig. 9　PID　Setup O

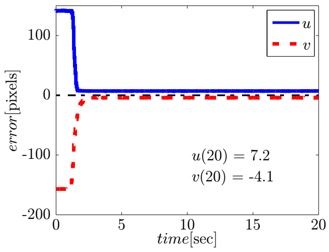

Fig. 10　PD　Setup O

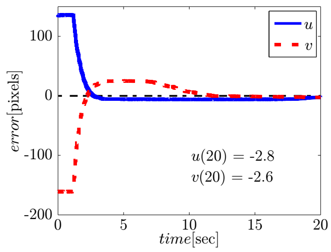

Fig. 11　PID　Setup X

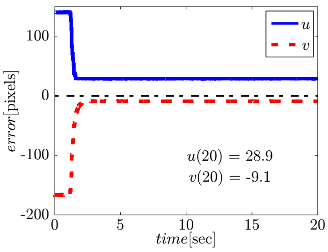

Fig. 12　PD　Setup X

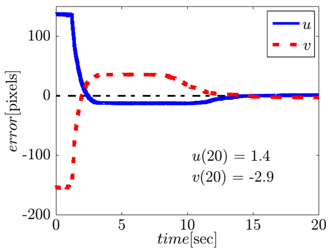

Fig. 13　PID　Setup Y

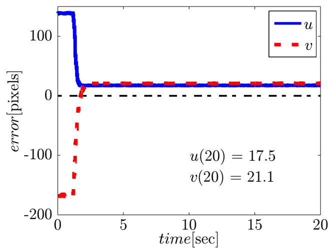

Fig. 14　PD　Setup Y

5. お　わ　り　に

本論文では，定常特性を改善した平行 2 リンクマニピュレータの PID 型視覚フィードバック制御について考えた．視覚情報 f を変数変換することで目標値を生成する方法と視覚情報 f に関する積分要素を制御則に含む PID 型の制御則を提案し，安定性解析をおこなった．また，定置制御実験において従来法との比較よりに提案する制御則の有効性を示した．提案した手法は制御則に重力補償項を必要としないため，マニピュレータを任意の姿勢で設置することが可能であり，実用面において有効的な手法であると考えられる．本論文で示した安定性の条件は十分条件であり，実験結果から実際に安定となる領域は広いことが示唆されているため，安定性の条件を緩めることは今後の課題となる．また，今回は観測対象が静止した場合のみを考えたが，腹腔鏡把持ロボットの使用を想定した追従特性の評価を考えていく必要がある．

文　　献

(1) Chaumette, F., and Hutchinson, S.A., “Visual Servoing and Visual Tracking”, In: Siciliano, B., and Khatib, O. (Eds), *Springer Handbook of Robotics*, Springer-Verlag, (2008), pp. 563-583.

(2) 岩谷靖，渡部渓，橋本浩一, “ 隠れにロバストなビジュアルサーボ ”，日本ロボット学会誌，Vol. 27，No. 1 (2009)，pp. 55-62.

(3) 尾里淳，丸 典明, “ 線形ビジュアルサーボによる全方向移動ロボットの位置と姿勢の制御 ”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 77，No. 774 (2011)，pp. 460-469.

(4) 見浪護，鈴木秀和，AGBANHA Julien, “ 注視 GA ビジュアルサーボを用いたロボットによる魚の捕獲 ”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 68，No. 668 (2002)，pp. 1198-1206.

(5) 特集, メディカルロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 4 (2004).

(6) Omote, K., Feussner, H., Ungeheuer, A., Arbter, K., Wei, G.-Q., Siewert, J.R., and Hirzinger, G., “Self-Guided Robotic Camera Control for Laparoscopic Surgery Compared with Human Camera Control”, *The American Journal of Surgery*, Vol. 177, No. 4 (1999), pp. 321–324.

(7) 西川敦，細井利憲，小荒健吾，宮崎文夫，関本貢嗣，三宅泰裕, “ 腹腔鏡外科手術支援システムに関する研究 (第 1 報) 基本概念:術者の顔画像処理に基づく腹腔鏡操作方式の提案 ”，第 18 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集 (2000)，pp. 829-830.

(8) Maruyama, A., and Fujita, M., “Robust Control for Planar Manipulators with Image Feature Parameter Potential”, *Advanced Robotics*, Vol. 12, No. 1 (1998), pp. 67–80.

(9) Fujita, M., Kawai, H., and Spong, M.W., “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L_2–gain Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1 (2007), pp. 40–52.

(10) Garrido, R., Soria, A., and Trujano, M., “Visual PID Control of a redundant Parallel Robot,” *Proc. 5th Int. Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Automatic Control (CCE 2008)* (2008), pp. 91–96.

(11) 出口光一郎, ロボットビジョンの基礎, コロナ社, (2000).

(12) Kelly, R., Santibanez, V., and Loria, A., *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, Springer, (2005).

(13) 井村順一, システム制御工学シリーズ 12 システム制御のための安定論, コロナ社, (2000).