

—修士学位論文—

視空間座標を用いた
2.5次元ビジュアルサーボ

2.5D visual servo using visuospatial coordinates

令和4年度(2022)

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程電気電子工学科
山口 英也

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景と目的	1
第2章 分割簡易化した座標変換手法	3
2.1 各座標系に用いる添字の定義	3
2.2 分割簡易化した座標変換手法	3
2.3 視空間座標系	4
2.4 球面座標系	5
2.5 関節空間座標系	6
第3章 球面座標系を用いた分割簡易化した座標変換手法	8
3.1 球面座標系を用いた分割簡易化した座標変換手法	8
3.2 視空間から頭中心の球面座標空間への変換	8
3.3 頭中心の球面座標空間から胸中心の球面座標空間への変換	11
3.4 胸中心の球面座標空間から再定義した胸中心の球面座標空間への変換	12
3.5 再定義した胸中心の球面座標空間から肩中心の球面座標空間への変換	13
3.6 肩を中心とした球面座標空間から関節空間への変換	14
3.7 座標変換の利用	15
第4章 特徴ベースビジュアルサーボ	16
4.1 イメージヤコビアン	16
4.2 特徴ベースビジュアルサーボ	17
4.3 ハイブリッドビジュアルサーボ	19
第5章 シミュレーション	20
5.1 シミュレーション条件	20
5.2 位置ベースビジュアルサーボと特徴ビジュアルサーボの比較	21
5.3 提案手法との比較	21

5.4 シミュレーション結果と考察	23
第 6 章 結言	27
付録 A	28
参考文献	31
謝辞	33

第1章 緒言

1.1 研究背景と目的

近年、ロボットの作業環境が工場などの整備された非人間環境から、病院やオフィスなどの変化する人間環境へと拡大しつつある。工場などでは、単純な繰り返し作業に対して、高速かつ高精度な動作性能を持つ産業用ロボットが活躍している。それに対して、病院などでは、変化する環境に対応しながら安全に動作させる必要がある。本研究では、ビジュアルサーボヒューマノイドロボットを研究対象としている。ビジュアルサーボは、視覚センサをフィードバックループに直接組み込むことで、環境をリアルタイムに認識しながら動作が可能な手法である。

ビジュアルサーボの手法は、eye-in-hand 型のビジュアルサーボと eye-and-hand 型のビジュアルサーボに分類することができる。eye-in-hand 型とは、ロボットの手先位置にカメラを取り付け制御を行う手法である。[1][2] しかしこの手法は、周りが変化する環境において手先カメラ全体が障害物によって遮蔽されやすく誤認知する恐れがあるためヒューマノイドロボットとしての活用としては適していない。そのためロボット頭部にカメラを取り付け広い視野を確保できる eye-and-hand 型が適している。eye-and-hand 型のビジュアルサーボは、位置ベースビジュアルサーボと特徴ベースビジュアルサーボの2種類に分けることができる。位置ベースビジュアルサーボは、視覚情報から対象物とロボットの作業座標上の位置・姿勢情報を復元し、ロボットへの指令値を導出する手法である。[3][4] この手法は対象物やロボットの作業座標上の位置を視覚から復元することで、既存の制御理論をそのまま利用できることが利点である。しかし、視覚情報から作業座標における位置・姿勢を正確に復元するためにはカメラキャリブレーションを正確に行う必要があり、カメラパラメータの誤差にロバストではないことが欠点である。一方、特徴ベースビジュアルサーボは画像座標上の特徴点の速度とロボットアームの3次元座標上の速度とのヤコビアンを用いて画像座標上の偏差を小さくする制御手法である。[5][6][7] この手法はカメラパラメータにロバストであることや画像上の特徴誤差を減らす方向に直線的に手先を移動させるため、画像特徴量が画像画面から失われる可能性が低いことが利点であるが、ローカルミニマムや特異点といった特徴誤差

の収束に問題が生じる可能性があることが欠点である。

先行研究で橋本氏は、“人間のセンサ情報は、最も簡易に処理される空間へフィードバックされる”との神経生理学的知見に基づき、複数座標系を経由する分割簡易化した座標変換手法を提案している.[8] 橋本氏の手法ではロボットの頭部からアームの手先まで複数の座標を定義することで、ロボットの各部位に設置されたセンサを最も利用しやすい任意の座標系へと簡易にフィードバックループを接続可能である。各座標変換式は直列に接続されており、各フィードバックループに重みを設定し、利用するセンサを切り替えることができる。このように各センサからの信号を利用したセンサフュージョンとして複数センサを合成する事で、状況によって利用するフィードバックループを切り替え、任意のセンサを利用することが可能である。

加藤氏は、極座標平面の値を用いた分割簡易化した座標変換手法を拡張し、ロボットの各部位を 3 次元の空間である球面座標系へ再定義、座標変換を 3 次元に拡張し、ステレオカメラの視空間、及びロボットアームの動作空間が 3 次元となるような座標変換手法を提案した.[9] しかし、カメラの視野から外れやすく動作が不安定であるため、本稿では、視空間座標を用いた 3 次元空間で制御を行う位置ベース手法にカメラ座標上の二次元空間で制御を行う特徴ベース法を加えたハイブリッドビジュアルサーボ手法を提案する。

第2章 分割簡易化した座標変換手法

本章では、加藤氏が提案した分割簡易化した座標変換手法 [9] の説明と、それに用いられる座標系について述べる。

2.1 各座標系に用いる添字の定義

本研究で用いる各座標系の値は添字によって区別する。各値について表 2.1 に示す。

表 2.1: 添字の意味

カメラ座標系	* Img	肩関節の値	* 0
眼中心の球面座標系	* v	第1関節の値	* 1
頭中心の球面座標系	* h	第2関節の値	* 2
胸中心の球面座標系	* c	左カメラの値	* L
再定義した胸中心の球面座標系	* rs	右カメラの値	* R
肩中心の球面座標系	* s	左右カメラの垂直方向の値	* D

2.2 分割簡易化した座標変換手法

本研究で用いる座標変換手法は、ロボットの頭部からアーム関節までの座標系を設定し、隣接する座標系間をヤコビ行列を用いて変換する。本研究で用いるシステムのブロック線図を図 2.1 に示す。

本手法では、視空間座標系、球面座標系、関節空間座標系の3種類の座標系を用いている。利用する各センサは、その信号を最も簡易に接続可能な座標系を選択し、フィードバックループを接続することができる。ここでは、ステレオカメラから得た手先の位置情報を視空間座標系に変換したビジュアルフィードバックと、アームの関節エンコーダから得た手先の位置情報を肩中心の球面座標系に変換したジョイントフィードバックを示す。

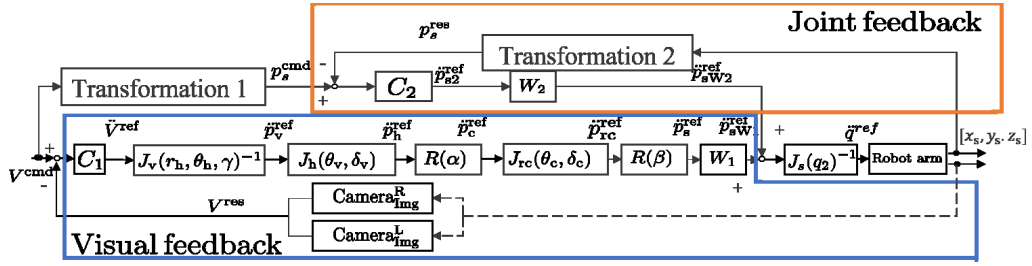


図 2.1: 分割簡易化した座標変換手法を用いたロボットアームの制御ブロック線図

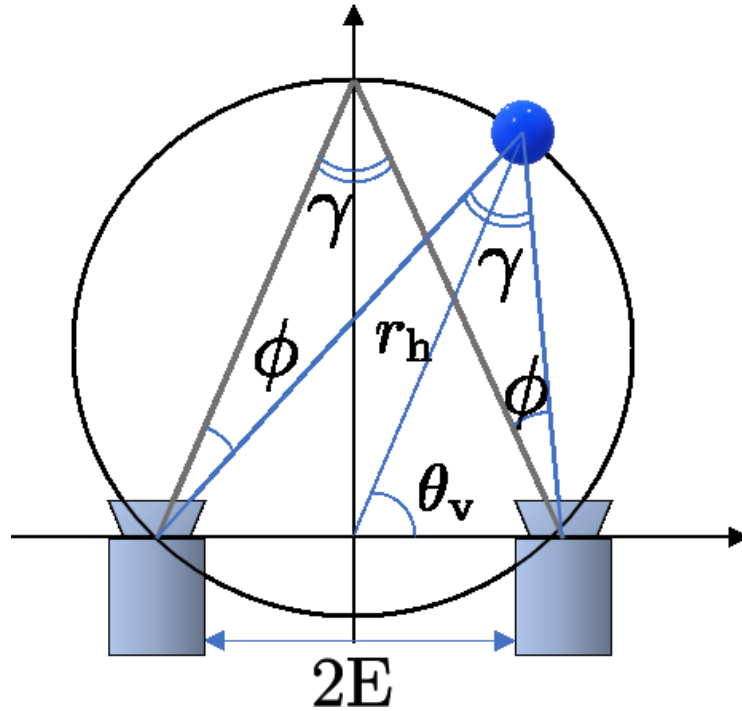


図 2.2: 視空間平面

2.3 視空間座標系

視空間を用いたビジュアルサーボは、制御空間として図 2.2 に示す視空間座標を扱う。視空間は両眼視差を用いて表される座標系であり、人間の空間認知と深い関係のある座標系であることが知られている。[10] 本研究では視覚センサとして図 2.3 に示すステレオカメラを用いる。目標点と左カメラ、右カメラの成す角である、輻輳角 γ と水平視線方向角 ϕ を用いた視空間平面が定義される。更に、 δ_v の垂直視線方向角を用いて 3 次元化が可能である。 α_R, α_L はそれぞれ右カメラと左カメラの水平方向のカメラ角度、 α_D は視空間平面と z 軸のなす角度である。ここで、画像平面から視空間への変換式は次式で表される。

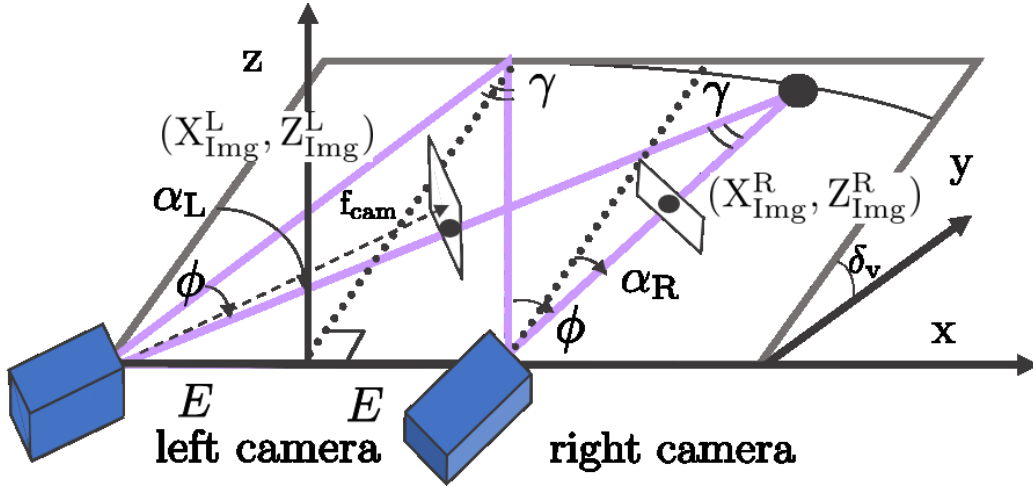


図 2.3: ステレオカメラ画像と視空間

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \phi \\ \delta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_{\text{Img}}^L - X_{\text{Img}}^R)/f_{\text{cam}} \\ (X_{\text{Img}}^L + X_{\text{Img}}^R)/2f_{\text{cam}} \\ (Z_{\text{Img}}^L + Z_{\text{Img}}^R)/2f_{\text{cam}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_L - \alpha_R \\ (\alpha_L + \alpha_R)/2 \\ \alpha_D \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで、 f_{cam} は焦点距離、 X^L と X^R はそれぞれ左カメラと右カメラの画像平面上における水平方向位置、 Z_{Img}^L と Z_{Img}^R はそれぞれ左カメラと右カメラの画像平面上における鉛直方向位置である。ここでは、 $X_{\text{Img}} \ll f_{\text{cam}}$ とすることで、 $\tan^{-1}(X_{\text{Img}}/f) \simeq (X_{\text{Img}}/f)$ の近似を用いている。上式より、画像平面から視空間への座標変換は、画像平面上の位置情報の項とカメラ角度の項による単純な線形式で表すことが可能となっている。

2.4 球面座標系

図 2.4 に示す球面座標系は、対象物体までの距離 r 、水平方向角 θ 、鉛直方向仰角 δ からなる座標系である。視空間と同様に距離と方向からなる空間であるため、視空間座標と球面座標は相互に簡易な変換が可能である。複数座標系間の簡易変換を実現するために、本研究では頭、胸、肩を中心とした球面座標系を利用し、アームの手先位置を各部位からの相対的な位置として認識する。

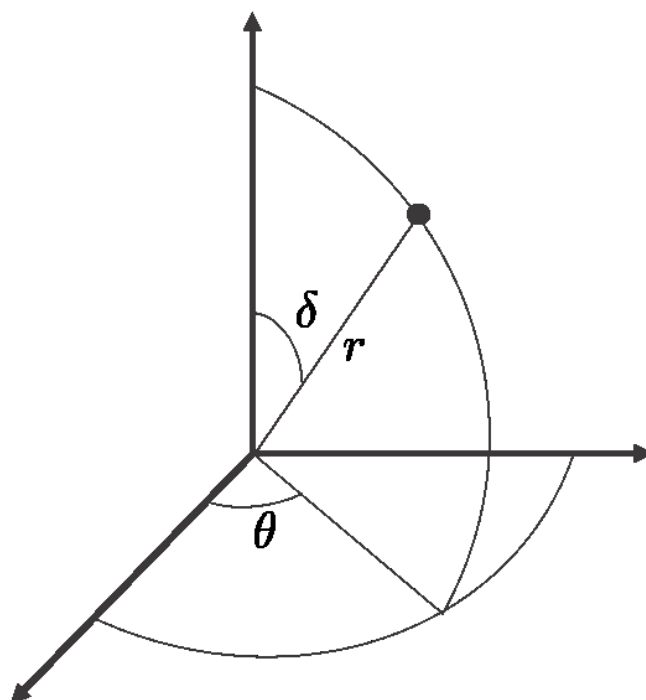


図 2.4: 球面座標系の定義

2.5 関節空間座標系

図 2.5 に示す関節空間座標系はロボットの関節角度 q によってアームの姿勢を表す座標系である. 座標変換を経て球面座標系に変換することによって, アームの手先位置を原点とした時の目標点の座標を求め, これを関節空間座標系に変換しロボットのアームを動作させる. また, 一般的にロボットは逆運動学計算を行うことで直行座標系から関節空間へ変換し, 手先制御を行う. しかし, 逆運動学計算は多自由度系になると非常に煩雑となり, リアルタイム制御を行う際の性能低下に直結する. 本研究では手先位置を球面座標系に変換するため, リアルタイム制御を円滑に行うことが可能である.

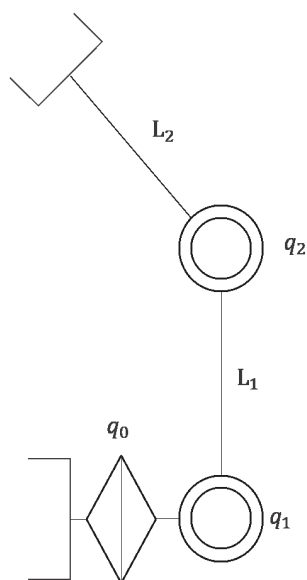


図 2.5: 関節座標系の定義

第3章 球面座標系を用いた分割簡易化した座標変換手法

本章では，ステレオカメラの画像座標上における手先位置を視空間，さらに各部の球面座標空間，関節空間までの座標変換の手法について示す．

頭部と肩部の変換の間に胸部を経由し，[9] 更に各座標系の値を3次元に拡張して，座標間のヤコビ行列を導出する．

3.1 球面座標系を用いた分割簡易化した座標変換手法

本章で用いる変換は図3.1に示すロボットの頭，胸，肩の3点を中心とした球面座標系を経由する．また，頭中心の球面座標系と胸中心の球面座標系が対象物体となす角を α ，胸中心の球面座標系と肩中心の球面座標系が対象物体となす角を β と定義し，座標変換の簡易化に利用する．

3.2 視空間から頭中心の球面座標空間への変換

視空間から頭中心の球面座標空間に変換するにあたって，まず図3.2に示す，視空間 Σ_v の値 γ ， ϕ を距離と方向の値 r_h ， θ_v へ変換し，その後図3.3に示す左右カメラの中点を原点とした球面座標空間 Σ_h へ変換を行う．

図3.3において， r_h ， θ_h ， δ_h はそれぞれ頭中心の球面座標空間から対象物体までの距離，水平方向方位角，鉛直方向仰角を示す．

視空間における各要素は以下のように表される．

$$\cos \gamma \simeq \sqrt{1 + \frac{2E^2}{r_h^2} (\cos 2\theta_h - 1)} \quad (3.1)$$

$$\phi \simeq \frac{\pi}{2} - \theta_v \quad (3.2)$$

ここで， $2E$ は基線長(眼間距離)であり， $r_h \gg E$ より近似を行っている．ここで発生する近似誤差については，先行研究[11]により，ステレオカメラの設置軸を回転させ，両

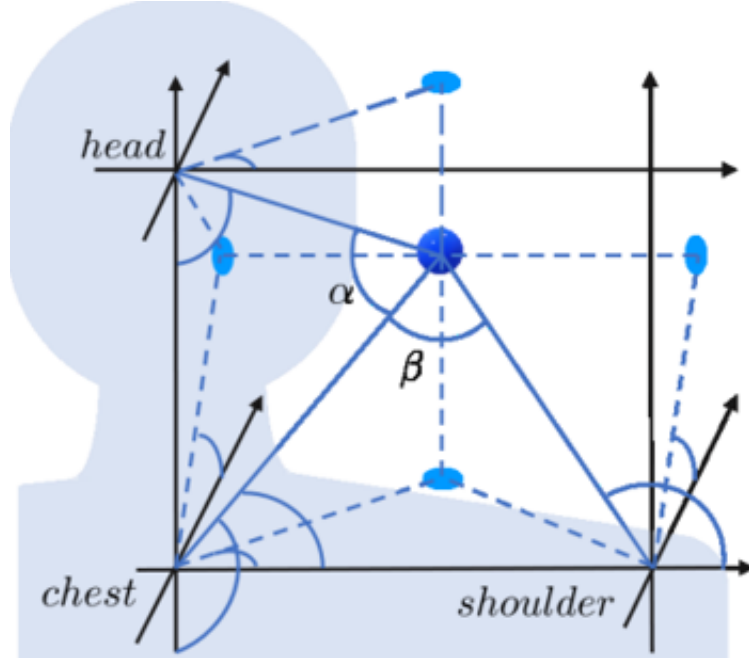


図 3.1: 利用する球面座標空間の定義

カメラの中心軸上において対象を捉えることによって低減が可能であることが示されている [付録 A].

まず, 視空間 Σ_v の値 γ, ϕ を距離と方向の値 r_h, θ_v へ変換する. 式 (3.2) を以下のように微分することで変換を行う.

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \gamma}{\partial r_h} & \frac{\partial \gamma}{\partial \theta_h} \\ 0 & -\frac{1}{r_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_h \\ r_h \dot{\theta}_v \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ここで,

$$\frac{\partial \gamma}{\partial r_h} = -\frac{2E \sin \theta_h}{r_h^2 \cos \gamma} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \theta_h} = \frac{2E \cos \theta_h}{r_h \cos \gamma} \quad (3.5)$$

である.

ここで, 図 3.2 に示される視空間において対象物体と頭中心と右カメラが成す角 θ_v , 視空間平面の鉛直方向の角 δ_v は

$$\cos \theta_v = \sin \delta_h \cos \theta_h \quad (3.6)$$

$$\delta_v = \sin^{-1} \left(\frac{\cos \delta_h}{\cos \theta_v} \right) \quad (3.7)$$

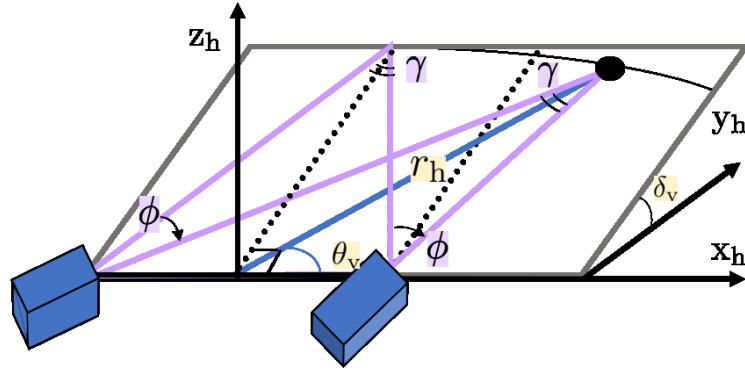


図 3.2: 視空間から頭中心の球面座標空間への変換 1

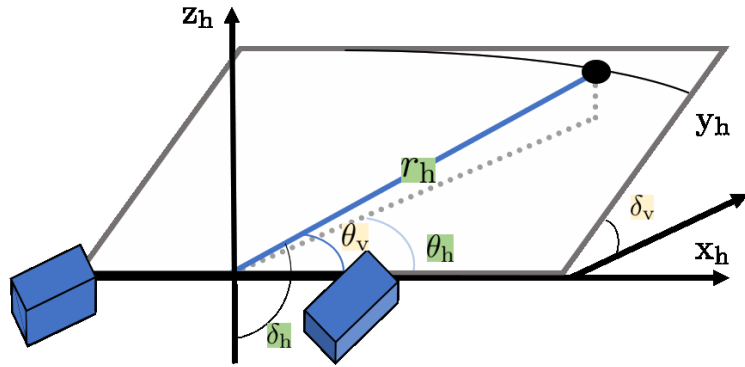


図 3.3: 視空間から頭中心の球面座標空間への変換 2

と表される. 上式を用いて求められた $\dot{\theta}_v$, 及び $\dot{\delta}_h$ をもとに, 頭中心の球面座標空間 Σ_h へのヤコビ行列による変換を (3.8) 式において表す.

$$\begin{bmatrix} r_h \dot{\theta}_h \\ \dot{\delta}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_h}{\partial \theta_v} & \frac{\partial \theta_h}{\partial \delta_v} \\ \frac{\partial \delta_h}{\partial \theta_v} & \frac{\partial \delta_h}{\partial \delta_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_h \dot{\theta}_v \\ \dot{\delta}_v \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ここで,

$$\frac{\partial \theta_h}{\partial \theta_v} = -\frac{\cos \delta_v}{\sin^2 \delta_v \sin^2 \theta_v - 1} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \theta_h}{\partial \delta_v} = -\frac{\tan \theta_v \sin \delta_v}{\tan^2 \theta_v \cos^2 \delta_v + 1} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \delta_h}{\partial \theta_v} = -\frac{\sin \delta_v \cos \theta_v}{\sqrt{1 - \sin^2 \delta_v \sin^2 \theta_v^2}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \delta_h}{\partial \delta_v} = -\frac{\sin \theta_v \cos \delta_v}{\sqrt{1 - \sin^2 \delta_v \sin^2 \theta_v}} \quad (3.12)$$

として表される.

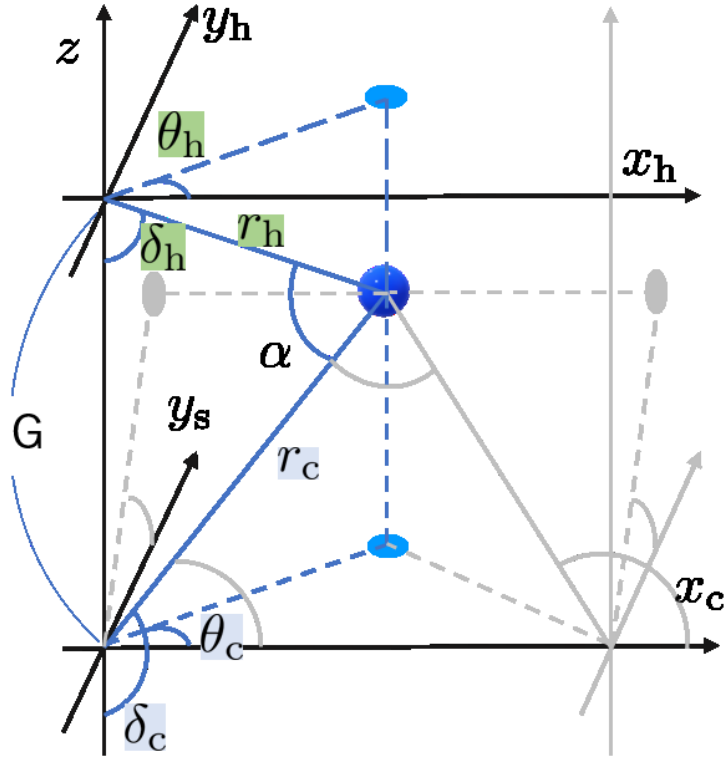


図 3.4: 視空間から頭中心の球面座標空間への変換

3.3 頭中心の球面座標空間から胸中心の球面座標空間への変換

図 3.4 に示す頭を中心とした球面座標空間 Σ_h と胸を中心とした球面座標空間 Σ_c について、首長 G だけ z 軸の負方向へ原点移動を行う。

ここで、両球面座標空間の $[x_h, y_h]$ 平面と $[x_c, y_c]$ 平面が平行であることから、共通する 1 変数 $\theta_h = \theta_c$ を持つように定義される。これ以外の 2 変数について、2 行 2 列のヤコビ行列を用いた座標変換を行う。また、ロボットの頭から胸までの長さを G として定義する。

胸中心の球面座標系は以下で示される。

$$r_c = \sqrt{(r_h \cos \delta_h - G)^2 + (r_h \sin \delta_h)^2} \quad (3.13)$$

$$\theta_c = \theta_h \quad (3.14)$$

$$\delta_c = \tan^{-1}\left(\frac{r_h \sin \delta_h}{r_h \cos \delta_h - G}\right) \quad (3.15)$$

上式より、ヤコビアンは図 3.4 の頭中心の球面座標空間 Σ_h と胸中心の球面座標空間 Σ_c

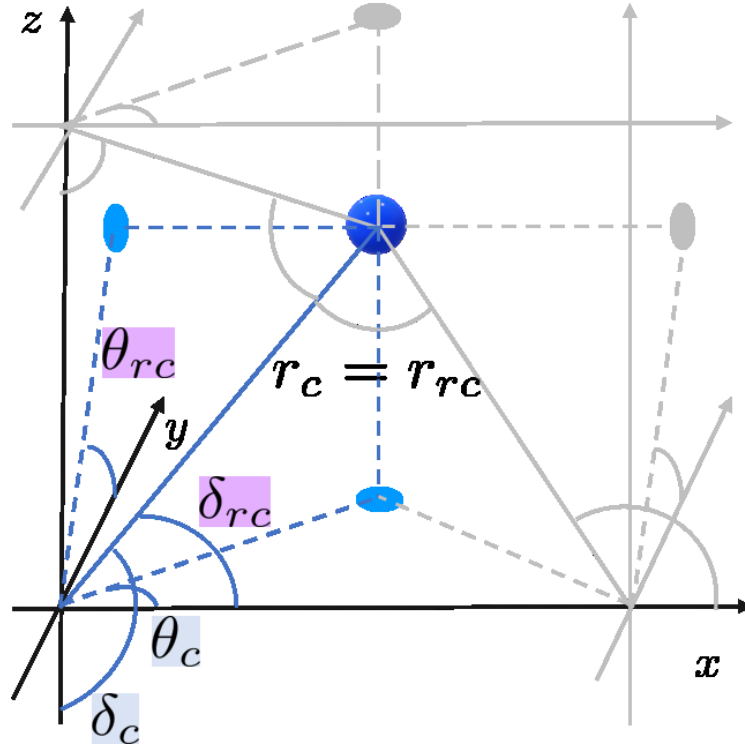


図 3.5: 胸中心の球面座標空間から再定義した胸中心の球面座標空間への変換

がなす角 $\alpha = \delta_c - \delta_h$ を用いた回転行列により簡易化が可能となる [付録 A].

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_c \\ r_c \dot{\delta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_h \\ r_h \dot{\delta}_h \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

このヤコビ行列は回転行列となっていることから、逆行列が非対角要素の符号が逆転するのみであり、相互の座標変換が簡易に表現できる.

3.4 胸中心の球面座標空間から再定義した胸中心の球面座標空間への変換

胸中心の球面座標空間 Σ_c を中心に、肩中心の球面座標空間 Σ_s への変換を簡易化するために方位角 θ と仰角 δ について用いる軸を再定義した胸中心の球面座標空間 Σ_{rc} を利用する.

図 3.5 より、再定義した胸中心の球面座標空間 Σ_{rc} における各要素は以下のように表

される.

$$r_{rc} = r_c \quad (3.17)$$

$$\delta_{rc} = \cos^{-1}(\sin \delta_c \cos \theta_c) \quad (3.18)$$

$$\theta_{rc} = \tan^{-1}\left(-\frac{\cos \delta_c}{\sin \theta_c \sin \delta_c}\right) \quad (3.19)$$

胸中心の球面座標空間 Σ_c から再定義した胸中心の球面座標空間 Σ_{rc} へのヤコビアンは式 (3.17)~(3.19) より以下のように表される.

$$\frac{\partial \delta_{rc}}{\partial \theta_c} = \frac{\sin \theta_c \sin \delta_c}{\sqrt{1 - \sin^2 \delta_c \cos^2 \theta_c}} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial \delta_{rc}}{\partial \delta_c} = -\frac{\cos \theta_c \cos \delta_c}{\sqrt{1 - \sin^2 \delta_c \cos^2 \theta_c}} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \theta_{rc}}{\partial \theta_c} = \frac{\cos \theta_c \sin \delta_c \cos \delta_c}{1 - \sin^2 \delta_c \cos^2 \theta_c} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \theta_{rc}}{\partial \delta_c} = \frac{\sin \theta_c}{1 - \sin^2 \delta_c \cos^2 \theta_c} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_{rc} \\ \dot{\theta}_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta_{rc}}{\partial \theta_c} & \frac{\partial \delta_{rc}}{\partial \delta_c} \\ \frac{\partial \theta_{rc}}{\partial \theta_c} & \frac{\partial \theta_{rc}}{\partial \delta_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_c \\ \dot{\delta}_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.5 再定義した胸中心の球面座標空間から肩中心の球面座標空間への変換

図 3.6 に示す胸を中心とした球面座標空間 Σ_{rc} と肩を中心とした球面座標空間 Σ_s は肩長 W だけ X 軸負方向へ原点移動を行う. 肩中心の球面座標系は以下のように表される.

$$r_s = \sqrt{(r_c \cos \theta_{rc} - W)^2 + (r_c \sin \theta_{rc})^2} \quad (3.25)$$

$$\delta_s = \tan^{-1}\left(\frac{r_{rc} \sin \delta_{rc}}{r_{rc} \cos \delta_{rc} - W}\right) \quad (3.26)$$

$$\theta_s = \theta_{rc} \quad (3.27)$$

(3.25) から (3.27) 式より、ヤコビアンは図 3.1 に示した再定義した胸中心の球面座標空間 Σ_{rc} と肩中心の球面座標空間 Σ_s がなす角 $\beta = \delta_s - \delta_{rc}$ を用いた回転行列で表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_s \\ r_s \dot{\delta}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_c \\ r_{rc} \dot{\delta}_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

ここで用いたヤコビ行列は、逆行列が非対角要素の符号が逆転するのみであり、相互の座標変換が簡易に表現できる.

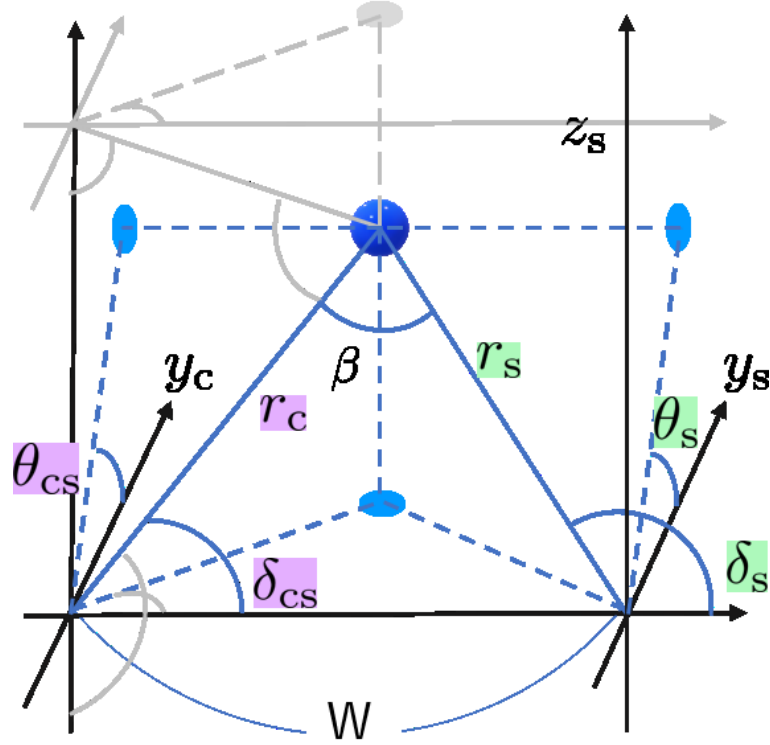


図 3.6: 再定義した胸中心の球面座標空間から肩中心の球面座標空間への変換

3.6 肩を中心とした球面座標空間から関節空間への変換

図 3.7 に肩を中心とした球面座標空間 Σ_s と関節空間の関係を表す. 通常 2 リンクマニピュレータで扱われる関節角度変数 $[q_1, q_2]$ ではなく, 座標変換式を簡単にするために, $L_1 = L_2 = L$ とし, $[\frac{q_2}{2}, q_1 + \frac{q_2}{2}]$ を取り入れる. また, ここでは $q_0 = \theta_s$ とする.

肩を中心とした球面座標空間 Σ_s と関節空間 Σ_q の位置の関係を次式に示す.

$$\begin{bmatrix} r_s \\ \delta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2L \cos \frac{q_2}{2} \\ q_1 + \frac{q_2}{2} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

上式を時間微分すると次式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_s \\ r_s \dot{\delta}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -2L \sin \frac{q_2}{2} \\ 2L \cos \frac{q_2}{2} & 2L \cos \frac{q_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \frac{\dot{q}_2}{2} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$(3.31)$$

以上のようにして、頭中心の球面座標系から関節空間までのヤコビ行列を用いた変換を行う.

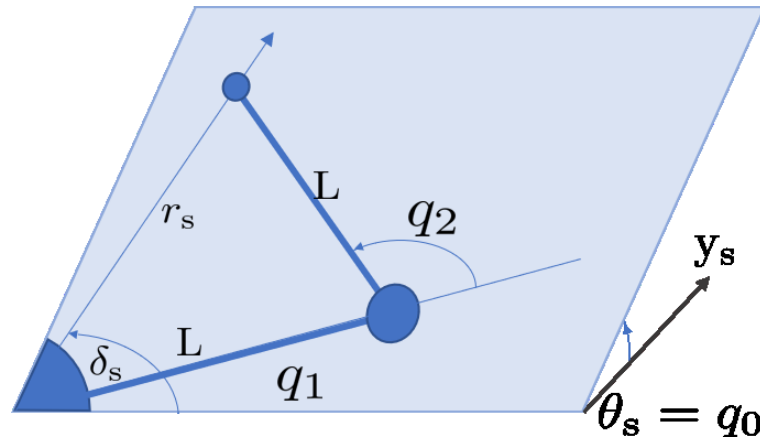


図 3.7: 肩中心の球面座標空間から関節空間への変換

3.7 座標変換の利用

このように座標変換を分割することで，簡易に座標変換を行うことができるのみでなく，ロボットの制御を行う際に，センサの設置部位によって最も利用しやすい座標系を選択し，フィードバックループを接続することが可能である．

本手法では，図 2.1 に示すようにビジュアルフィードバックを視空間に変換し頭中心の球面座標系に，ジョイントフィードバックを肩中心の球面座標系で行う．

第4章 特徴ベースビジュアルサーボ

4.1 イメージャコビアン

本章では、ステレオカメラを用いた一般的な特徴ベースビジュアルサーボのヤコビアンを求める。特徴ベースビジュアルサーボでは、左右カメラの画像座標での特徴点の変化を利用して手先の速度入力を生成するので、左右カメラの画像座標上の特徴点速度と手先の移動速度の関係を求める必要がある。これらの画像座標中の特徴点速度と手先の移動速度の関係をイメージャコビアンと呼び、以下のように求める。まず、カメラ位置の中心を原点とした、カメラ座標系 ${}^c p$ と左右カメラの画像座標 ${}^I p = (X^L, Y^L, X^R, Y^R)^T$ との関係は式(4.1)となり、時間微分することで、式(4.2)の関係を導くことができる。

$${}^I p = \begin{pmatrix} X^L \\ Y^L \\ X^R \\ Y^R \end{pmatrix} = f_{\text{cam}} \begin{pmatrix} \frac{{}^c x + E}{{}^c z} \\ \frac{{}^c y}{{}^c z} \\ \frac{{}^c x - E}{{}^c z} \\ \frac{{}^c y}{{}^c z} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^I \dot{p} = {}^I J_c {}^c \dot{p} \quad (4.2)$$

ここで、 ${}^I J_c$ は式(4.3)で表される。

$${}^I J_c = f_{\text{cam}} \begin{pmatrix} \frac{1}{{}^c z} & 0 & \frac{-{}^c x - E}{{}^c z^2} \\ 0 & \frac{1}{{}^c z} & \frac{-{}^c y}{{}^c z^2} \\ \frac{1}{{}^c z} & 0 & \frac{-{}^c x + E}{{}^c z^2} \\ 0 & \frac{1}{{}^c z} & \frac{-{}^c y}{{}^c z^2} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

ここで式(4.2)は、左右カメラの画像座標の特徴点速度 ${}^I \dot{p}$ とカメラ座標の特徴点速度 ${}^c \dot{p}$ の関係を示している。

続いて、 ${}^c \dot{p}$ とカメラ座標系から見た手先の移動速度 u_c の関係式は式(4.4)のように表される。

$${}^c \dot{p} = u_c \quad (4.4)$$

したがって、式(4.2)と式(4.4)より式(4.5)の関係式が得られる。

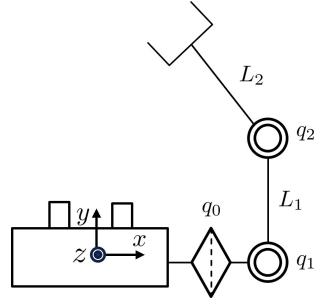


図 4.1: 関節座標系の定義

$$\begin{aligned} {}^I\dot{p} &= {}^I J_c^c \dot{p} \\ &= {}^I J_c u_c \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$(4.6)$$

${}^I J_c$ を J_I と置きなおし左右のカメラ画像座標を利用したイメージャコビアンと呼ぶ.

4.2 特徴ベースビジュアルサーボ

本章では, 式 (4.5) を利用することによりビジュアルサーボのフィードバック入力を考える. 式 (4.5) の両辺の左から J_I の擬似逆行列 J_I^+ を掛けると, 次式 (4.7) となる.

$$u_c = J_I^+ {}^I\dot{p} \quad (J_I^+ = (J_I^T J_I)^{-1} J_I^T) \quad (4.7)$$

ここで, フィードバック入力を u'_c フィードバックゲインを λ とすると, 式 (4.7) より, フィードバック入力 u'_c は式 (4.8) で定義される.

$$u'_c = \lambda J_I^+ ({}^I p_d - {}^I p_h) \quad (4.8)$$

ここで, 手先マーカの特徴点の左右カメラの画像座標を ${}^I p_h$, 目標点の画像座標を ${}^I p_d$ とする.

次に, 式 (4.8) を用いて目標関節角度を求める. 本研究で用いるロボットアームの模式図を図 4.1 に示す. 図 4.1 における関節座標系の定義に従って, 3 軸 2 リンクマニピュ

レータの運動学は以下の式で表すことができる.

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \\ y &= L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2) \sin q_0 \\ z &= L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2) \cos q_0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

式 (4.9) を偏微分することで式 (4.10) が求まり, 手先速度 \dot{p} とロボットの関節角度 q_d は式 (4.11) の関係が成り立つ.

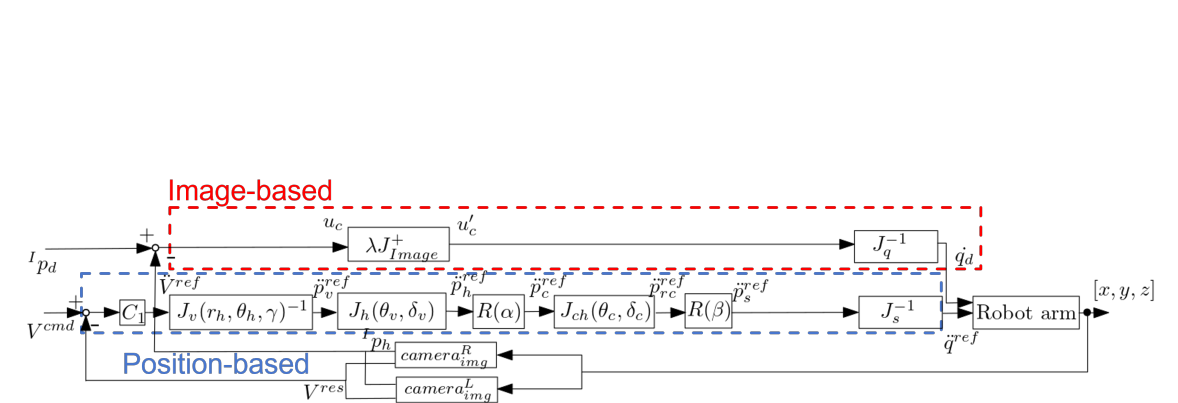
$$\begin{aligned} J_q &= \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_0} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_0} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2) & -L_2 \sin(q_1 + q_2) & 0 \\ L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \sin q_0 & L_2 \cos(q_1 + q_2) \sin q_0 & L_2 \sin(q_1 + q_2) \cos q_0 \\ L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \cos q_0 & L_2 \cos(q_1 + q_2) \cos q_0 & -L_2 \sin(q_1 + q_2) \sin q_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_0} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_0} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$\dot{p} = J_q \dot{q}_d \quad (4.12)$$

以上のヤコビアンより画像ベースビジュアルサーボのコントローラは式 (4.13) に式 (4.8) を代入を行い設計を行う.

$$\dot{q}_d = J_q^{-1} u'_c \quad (u'_c = \lambda J_I^+ ({}^I p_d - {}^I p_h)) \quad (4.13)$$



第5章 シミュレーション

本章ではシミュレーションにて、前章で述べた位置ベースと特徴ベースのハイブリッド制御器を用いたビジュアルサーボの動作を確認する。本章は、5.1 節でシミュレーション条件について述べる。5.2 節で視空間を用いた位置ベースと特徴ベースの応答に関する比較を行い、各手法の優位に働く状況について確認を行う。5.3 節では提案法の応答を加えたシミュレーション結果とその考察を述べる。

5.1 シミュレーション条件

図 4.2 に示したシステムを用いて matlab 上でシミュレーションを行う。ステレオカメラによって知覚した物体に対してロボットアームの手先到達運動を想定した動作を行う。case 1 では、表 5.1 の条件、case2 では、表 5.2 に値を設定し、位置ベースビジュアルサーボは視空間、特徴ベースビジュアルサーボは特徴量をフィードバックをし、それぞれの応答について確認を行う。制御時間 0[s] で初期値を入力し、制御対象である 3 自由度 2 リンクアームロボットの手先を任意の位置から 2 つのカメラの中心に向かって動作させ評価をする。

ステレオカメラを用いたビジュアルフィードバックを行う場合、画像処理による遅れが発生する。これを考慮し、ビジュアルフィードバック信号に画像処理遅れ時間 0.03[s] を適用し、動作を確認する。

コントローラは位置ベースビジュアルサーボが PD 制御、特徴ベースビジュアルサーボが P 制御で設計されている。生成される視空間の加速度指令値を式 (5.1) に示す。

$$\dot{\mathbf{V}}^{\text{ref}} = K_{Pv}(\mathbf{V}^{\text{cmd}} - \mathbf{V}^{\text{res}}) + K_{Dv} \frac{d}{dt}(\mathbf{V}^{\text{cmd}} - \mathbf{V}^{\text{res}}) \quad (5.1)$$

ここで、 K_{Pv} は比例ゲイン、 K_{Dv} は微分ゲインを表す。また、本研究では式 (5.2) によって関節トルク指令値を生成することでロボットアームの関節トルクを制御し、手先位置を目標位置まで移動させる。目標関節角速度を \dot{q}_d 、現在の関節角速度を \dot{q} 、関節トルク係数 $k_{\text{torque}} = 100$ とする。

$$\tau_d = k_{\text{torque}}(\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (5.2)$$

5.2 位置ベースビジュアルサーボと特徴ビジュアルサーボの比較

アームの初期姿勢を変えた 2 つの case についての位置ベースビジュアルサーボと特徴ベースビジュアルサーボの比較を行う. 指令値及び設計パラメータは表 5.1, 5.2, 5.4, 5.5 となっている. 青線が指令値, 赤線が特徴ベースのビジュアルサーボ, 緑線が位置ベースの位置応答となっている. 視空間を用いたビジュアルサーボでは特徴ベースビジュアルサーボと比べると応答速度は速くオーバーシュート量が多いことが確認できる. 特に case1 のような手先の初期位置がカメラの正面付近にある場合において整定時間が短く安定して動作することが確認できた. 一方特徴ベースビジュアルサーボでは, 位置ベース手法と比較すると安定した動作が可能な領域が広いことが確認できた. それぞれの利点を考慮しながら提案手法では位置ベースと特徴ベースの切り替えタイミングについて検討を行った.

表 5.1: アーム関節角度の初期値と直交座標および視空間座標の指令値 (case1)

Initial value of joint angle [degree]	$q_0 = 45, q_1 = 90, q_2 = 45$
Command value of cartesian coordinate[m]	$x = 0, y = 0.2, z = 0$
Command value of visual space coordinate[radian]	$\gamma = 0.35, \phi = 0, \delta_v = 0$

表 5.2: アーム関節角度の初期値と直交座標および視空間座標の指令値 (case2)

Initial value of joint angle [degree]	$q_0 = 50, q_1 = 100, q_2 = 60$
Command value of cartesian coordinate[m]	$x = 0, y = 0.2, z = 0$
Command value of visual space coordinate[radian]	$\gamma = 0.35, \phi = 0, \delta_v = 0$

表 5.3: 制御対象のパラメータ

Arm Length [m]	$L_1 = 0.245, L_2 = 0.245$
Position of Shoulder [m]	$W = 0.225, G = 0.265$
forcal Length [m]	$f = 0.003$
Arm weight [kg]	$M_1 = 2.5, M_2 = 1$
Sampling time [s]	0.001

5.3 提案手法との比較

シミュレーションにおける位置ベースビジュアルサーボと特徴ベースビジュアルサーボのそれぞれの設計パラメータを表 5.6 に示す. 提案手法のハイブリッドビジュアルサー

表 5.4: シミュレーションの設計パラメータ (case1)

Parameter of position-based visual servoing	$K_{P_V} = [30, 30, 6], K_{D_V} = 0.2$
Parameter of image-based visual servoing	$\lambda = 6$

表 5.5: シミュレーションの設計パラメータ (case2)

Parameter of position-based visual servoing	$K_{P_V} = [10, 10, 6], K_{D_V} = 0.2$
Parameter of image-based visual servoing	$\lambda = 6$

ボは, 開始 [0s] 時点では特徴ベースビジュアルサーボを行い, 開始後 [0.15s] で位置ベースビジュアルサーボへと切り替えを行っている. シミュレーションに用いるアーム関節角度 q_1, q_2, q_3 の初期値と各フィードバックの指令値を表 5.1 に示す.

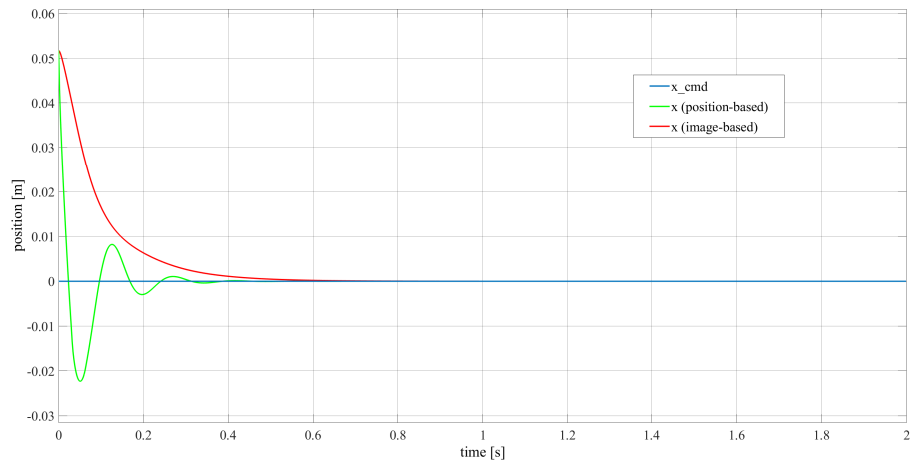
表 5.6: シミュレーションの設計パラメータ

Parameter of position-based visual servoing	$K_{P_V} = [10, 10, 6], K_{D_V} = 0.2$
Parameter of image-based visual servoing	$\lambda = 6$
Parameter of hybrid visual servoing	$K_{P_V} = [22, 22, 22], K_{D_V} = 0.75, \lambda = 6$

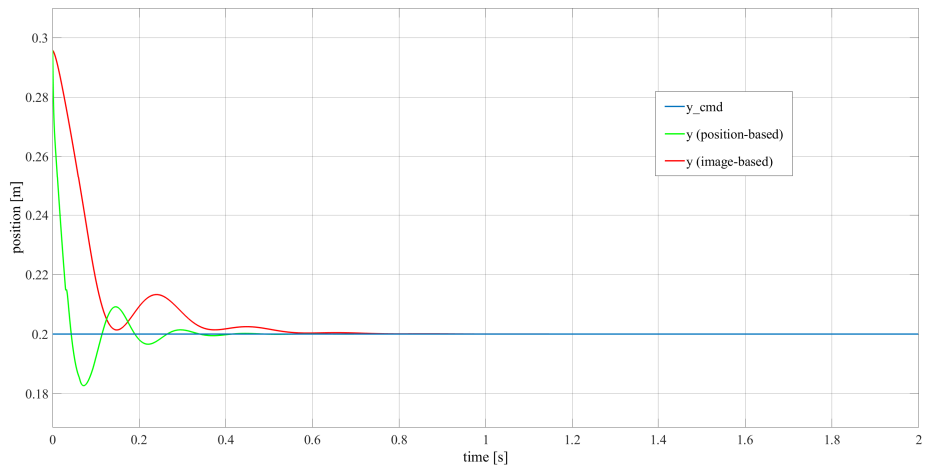
5.4 シミュレーション結果と考察

位置ベースビジュアルサーボ，特徴ベースビジュアルサーボ，ハイブリッドビジュアルサーボそれぞれの応答値のシミュレーション結果について図 5.3a から図 5.3c に示す。

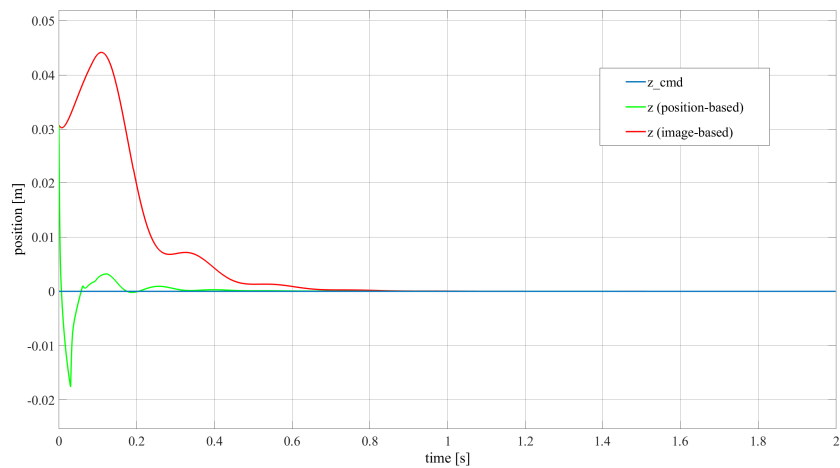
青線が直交座標系における指令値，緑線が視空間を用いた位置ベースビジュアルサーボ法，赤線が特徴ベースビジュアルサーボ法，紫線が提案法の応答を示している。どの手法においても指令値まで収束していることがわかる。しかし，それぞれの手法について比較を行うと整定時間は，位置ベースビジュアルサーボが [0.78s]，特徴ベースビジュアルサーボが [0.52s]，ハイブリッドビジュアルサーボが [0.39s] となった。提案手法であるハイブリッドビジュアルサーボが最も良い性能を示した。次にアンダーシュート量とオーバーシュート量について見てみると位置ベースでは最大 40[mm] のアンダーシュート，特徴ベースでは最大 10[mm] のオーバーシュート，ハイブリッドビジュアルサーボでは最大 9[mm] のオーバーシュートが生じており，提案法，特徴ベース，位置ベースの順でオーバーシュート量が小さいことが確認できた。制御ゲインが大きく上げることで，速い応答が得られる位置ベースビジュアルサーボ法とゲインは大きく上げられないがオーバーシュート量が小さい特徴ベースビジュアルサーボの性能の良い側面を掛け合わせることで制御性能の良い応答が得られることが出来た。視空間を用いたビジュアルサーボではゲインを大きく上げると立ち上がり時不安定になりやすいためカメラの遅延によって高い制御入力を送られ続けていることが考えられる。



(a) x 座標

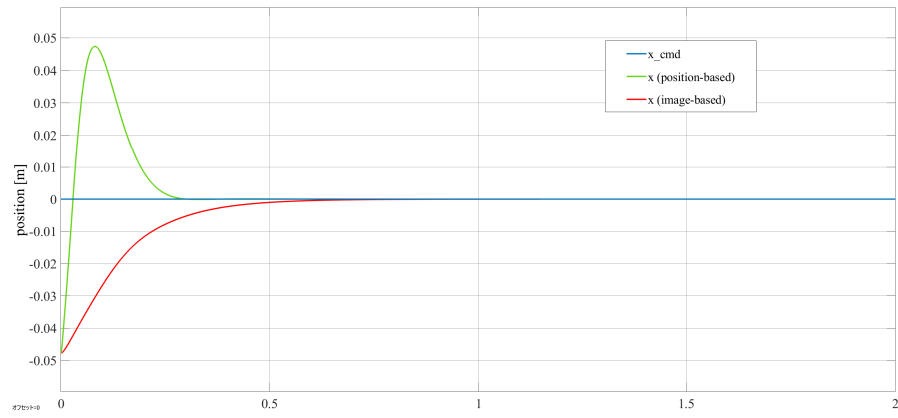


(b) y 座標

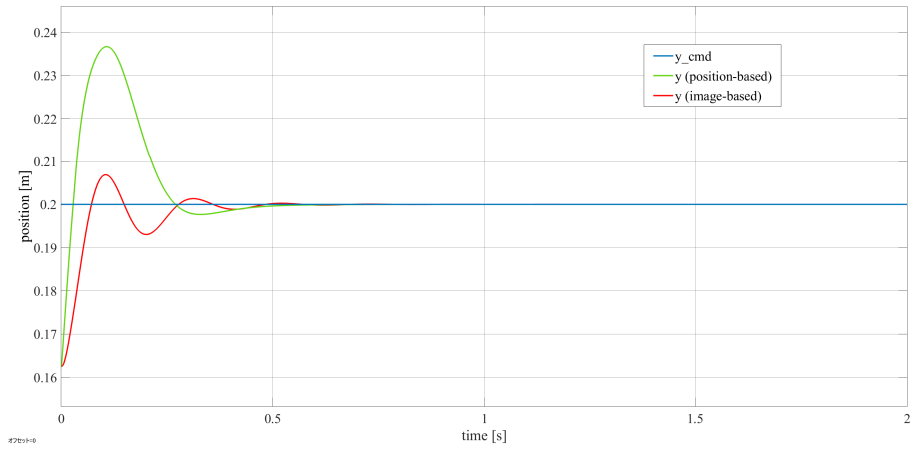


(c) z 座標

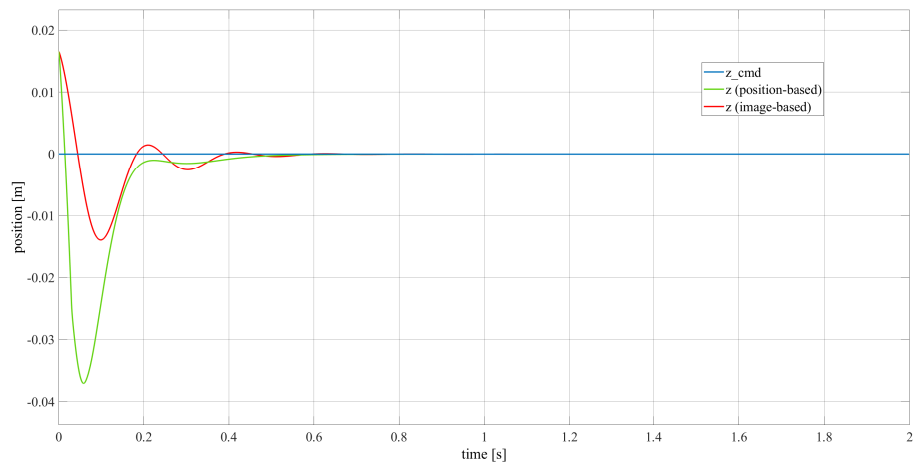
図 5.1: 位置ベースビジュアルサーボと特徴ベースビジュアルサーボの応答値比較 (case1)



(a) x 座標

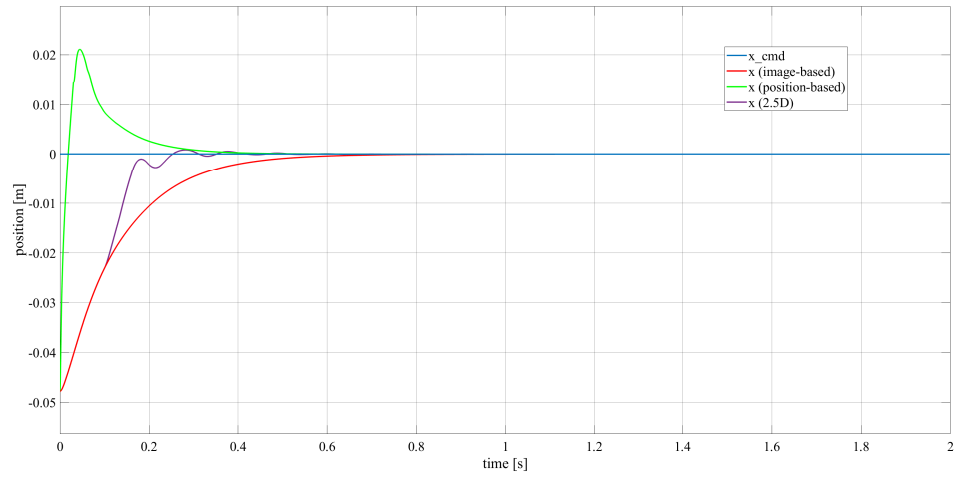


(b) y 座標

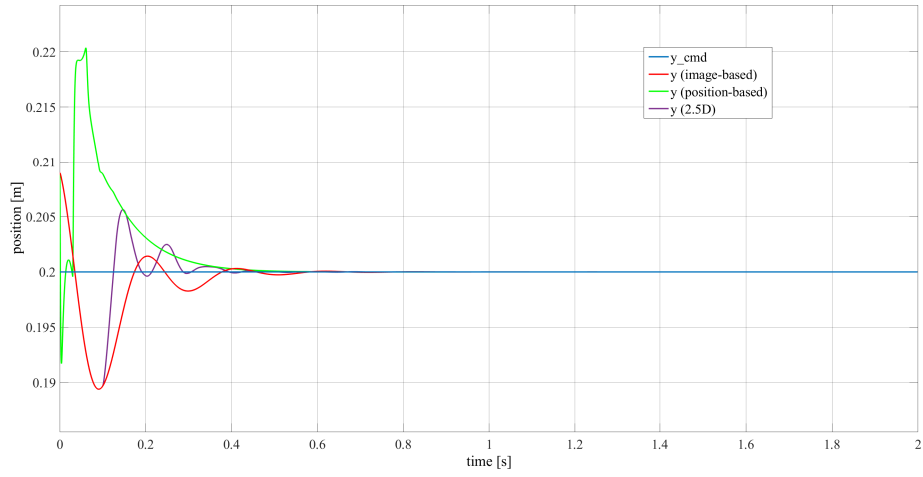


(c) z 座標

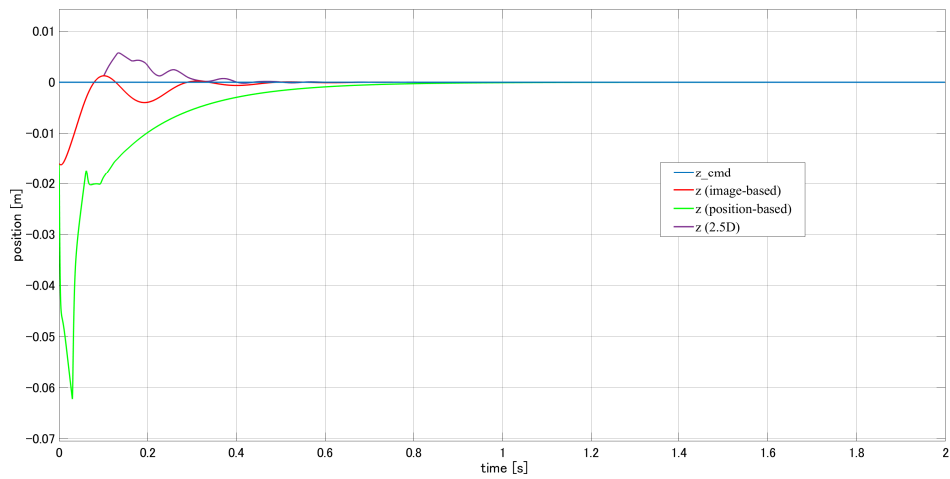
図 5.2: 位置ベースビジュアルサーボと特徴ベースビジュアルサーボの応答値比較 (case2)



(a) x 座標



(b) y 座標



(c) z 座標

図 5.3: 各手法における手先位置の応答値比較

第6章 結言

本稿では、Eye-and-hand 型ロボットアームにおいて、視空間を用いた位置ベースと特徴ベースを組合わせたハイブリッドビジュアルサーボを提案し、位置ベースビジュアルサーボと特徴ベースビジュアルサーボとシミュレーションによって比較を行った。視空間を利用した提案手法は、位置ベースと特徴ベース単一の制御器と比較すると整定時間は他の2つより短く、オーバーシュート量も小さくなることをシミュレーションによって示した。応答速度が速いもののオーバーシュート量が多く収束に時間のかかる視空間を用いた位置ベース法と応答速度は遅いがオーバーシュート量が小さく安定した動作が行える特徴ベースビジュアルサーボの利点を活かした切り替え制御により制御性能が向上した。また、特徴ベースビジュアル法は特徴点を近づける方向に向かうためカメラの画面内から外れにくく、安定した動作が可能となる。一方、視空間を用いた位置ベースビジュアルサーボでは安定して動作を行える範囲が狭いことや、設計パラメータを綿密に設定しないと制御性能が良くないことが、問題となっている。

今後の課題としては、設計者の裁量に大きく左右されない制御器の切り替え方法の検討と実機検証が必要である。また、カメラ回転を用いて物体を中心に捉え、不安定化しない制御手法を確立する必要がある。

付録 A

近似式 (3.1) と (3.2) の導出

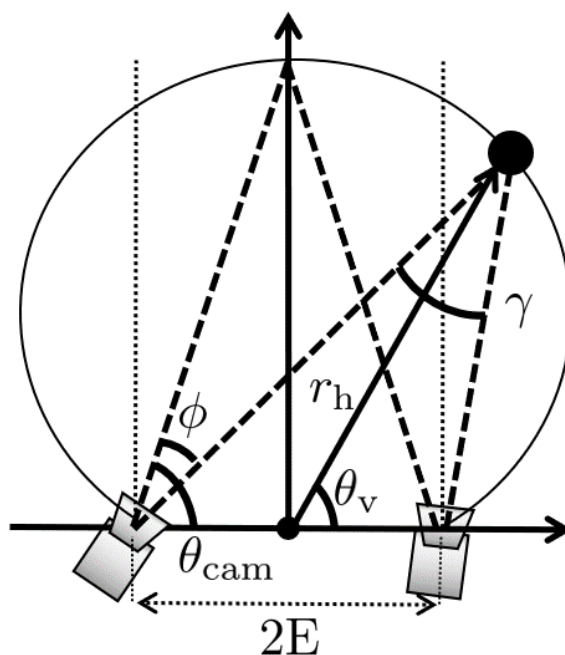


図 6.1: 視空間平面の近似に用いる変数

まず、式 (3.2) の ϕ の近似式の導出過程を示す。図 2.2 において、2つのカメラと対象物体がなす角は、3点になす円上で γ が円周角となるため等しい。そこで、 $2E$ を底辺とする二等辺三角形に対して考える。図 6.1 のように θ_{cam} を定義すると ϕ は次式で表される。

$$\phi = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\gamma}{2} \right) - \theta_{\text{cam}} \quad (6.1)$$

ここで、 $r_h \gg E$ の関係から $\frac{\gamma}{2} \simeq 0$ と $\theta_{\text{cam}} \simeq \theta_v$ が成り立つ。よって ϕ は式 (3.2) のように近似することができる。

次に式 (3.1) の $\cos \gamma$ の近似式の導出過程を示す。まず、頭を中心とした直交座標空間では次式で x が与えられる。

$$x = \frac{E \sin 2\phi}{\sin \gamma} \quad (6.2)$$

ここで極座標に変換するために $x = r_h \cos \theta_v$ を用いると、次式となる。

$$r_h \cos \theta_v = \frac{E \sin 2\phi}{\sin \gamma} \quad (6.3)$$

次に $\phi \simeq \frac{\pi}{2} - \theta_v$ を用いて整理すると、次式となる。

$$\sin \gamma = \frac{2E \sin \theta_v}{r_h} \quad (6.4)$$

これを \cos の形にすると次式となる。

$$\cos \gamma = \sqrt{1 + \frac{2E^2 (\cos 2\theta_v - 1)}{r_h^2}} \quad (6.5)$$

最後に $1 \gg a$ における $(1 + a)^n \simeq 1 + na$ の関係を用いることで式 (3.1) が得られる。

式 (3.16) の導出

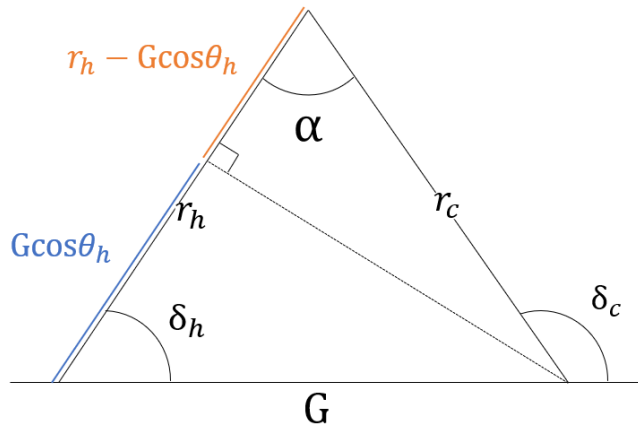


図 6.2: 球面座標系の平行移動に用いる変数

式 (3.13), (3.15) からヤコビ行列を計算すると、次式となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_c}{\partial r_h} & \frac{\partial r_c}{\partial \delta_h} \\ \frac{\partial \theta_c}{\partial r_h} & \frac{\partial \theta_c}{\partial \delta_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_h \\ \dot{\theta}_h \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{r_h - G \cos \delta_h}{r_c} & \frac{r_h G \sin \delta_h}{r_c^2} \\ -G \sin \delta_h & \frac{r_h (r_h - G \cos \delta_h)}{r_c^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_h \\ \dot{\theta}_h \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

ここで図 6.2 の直角三角形を考えると、 $\cos \alpha$ と $\sin \alpha$ は次のように定義することができる。

$$\cos \alpha = \frac{r_h - G \cos \delta_h}{r_c} \quad (6.8)$$

$$\sin \alpha = \frac{G \sin \delta_h}{r_c} \quad (6.9)$$

そこで式 (6.7) に r_c と r_h を加えることで、式 (3.16) の回転行列が得られる。

参考文献

- [1] Hong GAO, Toshiro Noritsugu, and Tsutomu WADA, "Tracking and Measuring a Moving Object Based on Multi-Sensory Information with Eye-in-Hand Robot System" Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 28, No.8, pp. 972-981, 1992.
- [2] 細田耕, 森山斉, 浅田稔, "ズーム機構を利用した視覚サーボ系の構成" 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.6, pp. 845-850, 1998.
- [3] M.Parsapour, S. RayatDoost, and H. D. Taghirad, "Position based sliding mode control for visual servoing system" Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on. IEEE, pp. 337-342, 2013.
- [4] P. Vicente, L. Jamone and A. Bernardino, "Towards markerless visual servoing of grasping tasks for humanoid robots," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, pp. 3811-3816, 2017.
- [5] Xin J, Cheng H, Ran B. "Visual servoing of robot manipulator with weak field-of-view constraints." International Journal of Advanced Robotic Systems., January 2021.
- [6] Hernandez-Vicen, Juan and Martinez, Santiago and Garcia-Haro, Juan Miguel and Balaguer, "Carlos Correction of Visual Perception Based on Neuro-Fuzzy Learning for the Humanoid Robot". TEO Sensors, 2018, 18.
- [7] Vicente, Pedro and Jamone, Lorenzo and Bernardino, "Alexandre Towards markerless visual servoing of grasping tasks for humanoid robots." 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3811-3816, 2017.
- [8] 駒田諭, 橋本賢人, 矢代大祐, 平井淳之, "複数座標系間の簡易な変換を用いた筋骨格アームのビジュアルサーボ", 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.136 No.6, p. 392-398, 2016.
- [9] 加藤進之介 "分割簡易化した座標変換によるセンサフュージョンを用いたヒューマノイドロボットの制御", 三重大学修士論文, 2021.

付録 A

- [10] Leah M.M. McGuire and Philip N. Sabes, “Sensory transformations and the use of multiple reference frames for reach planning”,(2009 August) Nat Neurosci, pp.1056(1061)
- [11] 岸寛海 “視空間からの簡易な座標変換を用いたアクティブステレオカメラによるロボットアームのビジュアルサーボ”, 三重大学修士論文,2019.

謝辞

本研究の遂行ならびに修士論文作成にあたり、終始丁寧かつ適切なご指導を頂きました三重大学大学院工学研究科教授 駒田 諭 先生、同大学教授 弓場井 一裕 先生に深く感謝致します。そして、適切な御指導と御助言を頂きました同大学准教授工学博士 山村 直樹 先生、同大学助教授工学博士 矢代 大祐 先生、同大学助教授工学博士 小山 昌人 先生、日頃から研究に関する日常業務において御助力頂きました、同大学技術職員 中村 勝 氏に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、同グループとして議論を重ねあった岡田 達弥君に心より感謝いたします。今後のご活躍を心より期待しております。

研究室の同期として共に切磋琢磨し、討論を交わした有賀 光紀君、富山 礁太君に深く感謝いたします。

さらに、日頃から公私共にお世話になり、楽しい研究生活を共に過ごした電機システム研究室の皆様にも心より感謝いたします。

電機システム研究室の更なる発展を心より願っております。

最後に、私の学生生活を援助し、ここまで育ててくれた両親と、人生の中で欠かすことのできない経験をさせていただき、大学生活でお世話になったすべての方に感謝いたします。

目録

- [1] Hideya Yamaguchi, Satoshi Komada, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai,” Evaluation of Approximate Equations for Visual Servoing Using Simple Coordinate Transformations.” Proceedings of International Symposium for Sustainability by Engineering at MIU, Dec. 2nd, 2021.