

近視領域作業のための立体視システムの設計と実装

Design and Implementation of Stereoscopic System for Near Field Operation

坂本尚志^{1*} 矢向高弘¹
Takashi Sakamoto¹ Takahiro Yakoh¹

¹ 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
¹ Department of System Design Engineering,
Faculty of Science and Technology, Keio University

Abstract: For the near field operation, we developed a stereoscopic display system consisting of PTV (Pan-Tilt-Vergence) control stereo camera and 3D display. PTV angles are controlled to track a target object in the center of both image planes of left and right. As the result, its operator can percept the target object as if it is located at the same depth with a screen. Since this mechanism can hold the consistency of convergence angle and focal length, the system relaxes the eye fatigues and discomfort of its operator.

1 はじめに

一般的な遠隔操作による近視領域作業では、単一カメラにより撮像し、それをモニタ表示している。その場合、操作者には奥行き感が伝わらないため、操作性は必ずしも良くない [1]。このことから、遠隔操作による近視領域作業の操作性向上のために、ステレオカメラと 3D ディスプレイを用いたステレオ立体視表示による奥行き感覚の提示に着目した [2, 3]。

ここで、人間は眼球レンズの焦点距離調節を、注目対象までの距離に応じて行っている。また、人間は、錐体細胞が視野中心に高密度に分布することから、注視対象を常に網膜中心で捉えるように眼球を回転させる輻輳運動を行っている。

焦点距離の調整、両眼が捉える画像の差（視差）、輻輳角、過去の経験などを総合的に活用することで、人間は自然で鮮明な立体像を認知している。それに対して、一般的なステレオ立体視表示では、輻輳角が固定（多くの場合、カメラの光軸は並行）のステレオカメラが利用される。この場合、焦点距離と輻輳角、視差による立体復元結果に不一致が生じ、ステレオ立体視表示における一つの問題となっている。このことからステレオカメラの輻輳角を制御することで、この影響を低減することに着目した。

そこで本論文では遠隔地での近視領域作業を快適性の面からも支援するために、操作者に注目対象に対す

る疲労感の少ない立体視を実現することを目的として、パン角・チルト角・輻輳角を調節可能な PTV (Pan-Tilt-Vergence) ステレオカメラと表示装置からなる立体視システムを開発した。また、輻輳と調節の不一致による影響を低減するために、パン角・チルト角・輻輳角を連動させて注目対象に関する視差を減少させる輻輳角調節手法を考案した。本論文ではこの手法により、PTV ステレオカメラがパン角・チルト角・輻輳角を調節しながら注目対象に関する視差を画面上で低減しつつ、追従することを示す。

ここで、輻輳角制御の関連研究としてはファジー制御を用いた輻輳角制御手法 [4] や、ステレオカメラをそれぞれ回転させる手法ではなく、左右のカメラを対称的に水平移動させることで輻輳角を調節する手法 [5, 6] がある。また、画像中心ほど解像度が高くなる Log-Polar 画像を用いた手法 [1, 7, 8, 9]、相関法 [10, 11, 12] を用いた手法 [13]、階層的画像を用いた手法 [14] などもある。しかし、これらの手法は輻輳角の制御のみに言及しており、本研究のようなパン角・チルト角・輻輳角を連動させることには焦点を当てていない。

本文は次のように構成されている。2 章では、本研究の背景となるステレオ立体視に伴う問題について述べる。3 章では、提案立体視システムと提案輻輳制御手法について述べる。4 章では、提案した立体視システムの中でも PTV ステレオカメラ制御に関する評価を行い、考察を行う。5 章では、結論と今後の課題について述べる。

*連絡先：慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
E-mail: {sakamoto@comp., yakoh@}sd.keio.ac.jp

2 ステレオ立体視における問題

2.1 立体視

人間は普段、両眼を通して物を見ている。その際、両眼位置(瞳孔間距離は平均 65mm)から対象物体を見る方向が変化することで、左右眼の網膜上にできる物体像に微妙な差、つまり両眼視差が生じる。人間はその視差を手がかりとして、脳内の視覚情報処理により、観察される左右の像が1つの物体として認識される。この処理は両眼融像と呼ばれ、対象物体は立体像として認識される。このようにして、人間は外界の奥行き情報を得ている。

2.2 ステレオ立体視の原理

立体視表現を実現するためには様々なものがあるが、その中の一つとして観察者の左右の目に対応するステレオ画像を用意するステレオ立体視手法がある。このステレオ画像の対象への視差のずれから観察者の脳で両眼融像が起こり、2次元画像から奥行きを感じ、立体視を行うことができる。

ステレオ立体視を実現するための最も簡単な方法は、ステレオ画像を画面上に重ねて表示し、特殊なフィルタ機能を持つメガネをかけて見る方式であり、現在3Dディスプレイとして使用されている大部分はこの方式を採用している。しかし、この方式には2つの短所が挙げられる。一つは後述する輻輳角調節と焦点距離調節の不一致の発生、もう一つは立体像を見るために立体視メガネをかける必要があることである。

ここで、メガネをかけずに立体像を観察できる方式は、一般的に裸眼立体視方式と呼ばれている。この裸眼立体視方式には必ず視域が存在する。視域とは、眼をどこに置けば立体像全体が見えるかを示す眼の位置の範囲のことである。立体視メガネを用いた場合、左右像それぞれをそのメガネで分離できるため、視域を広くすることができる。しかし、裸眼立体視方式では、位置的に左右それぞれの眼で見える像を分離しなければならない。つまり、裸眼立体視方式では視域が固定され、そこに左右の眼を置かなければ正しい立体像は得られない。

2.3 輻輳と調節の不一致

2.2節で述べたように、一般的にステレオ立体視に伴う問題として、図1のような輻輳角調節と焦点距離調節の不一致がある。自然視による立体視の場合、対象物体に関する輻輳距離と調節距離は常に注目対象に一致する。ここで輻輳距離とは両眼の視軸の交点までの距離であり、調節距離とは注視点までの距離のことで

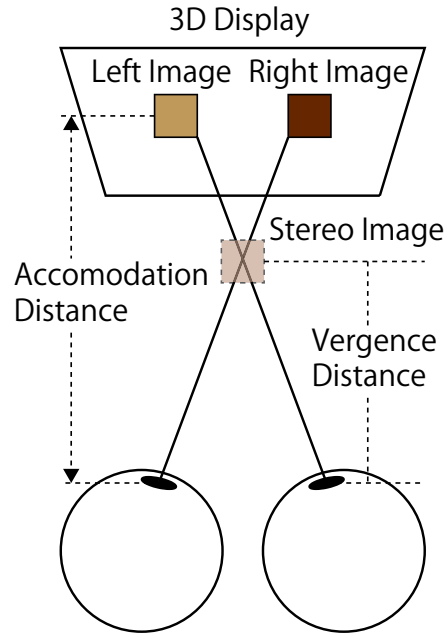


図 1: 輻輳角調節と焦点距離調節の不一致

ある。一方、ステレオ立体視の場合では輻輳距離は注目対象の立体像に、調節距離は3Dディスプレイ上の注目対象に合う。これが輻輳角調節と焦点距離調節の不一致である。

ここで、目のピント調節は観察距離が平均2m以下の時に働く。そのため、観察距離が2m以下の近視領域で行う遠隔操作では、輻輳角調節と焦点距離調節の不一致が顕著に現れる。この不一致は現実では発生しない不自然な目の制御を強いることになるため、このような状況で長時間作業を行うと、観察者に不快感と疲労感をもたらしてしまう。

そこで、本研究ではステレオカメラの輻輳角を調節し、注目対象に関する輻輳距離と調節距離を3Dディスプレイ上で一致させることで、輻輳角調節と焦点距離調節の不一致の影響を低減する輻輳角制御手法を考案した。

3 近視領域作業のための立体視システム

本論文では、2.3節で述べたことから図2、図3に示すパン角・チルト角・輻輳角を調節可能なPTVステレオカメラと表示装置からなる近視領域作業のための立体視システムを開発し、パン角・チルト角・輻輳角を連動させて視差を無くしながら注目対象を追従する輻輳角制御手法を考案した。ここで、集中力が必要な遠隔操作に対する立体視表現においては2.3節で述べた

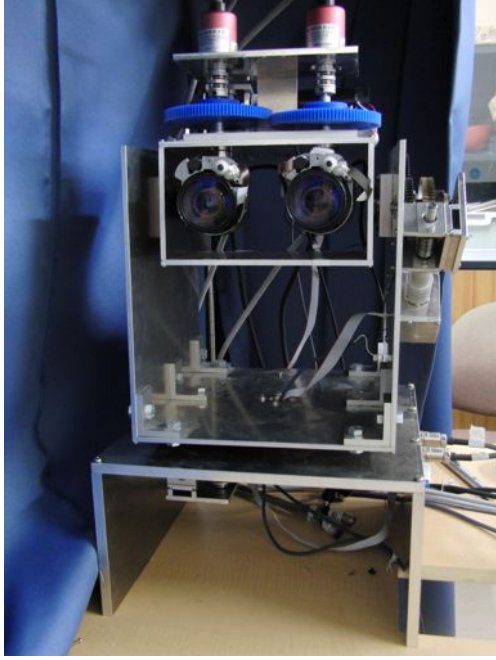


図 2: PTV ステレオカメラ

視域の狭い裸眼立体視方式よりも、視域の広いメガネを用いたステレオ方式の方が適していると考え、本研究の立体視システムには後者を採用した。

この立体視システムでは提案輻輳角調節手法により、PTV ステレオカメラのパン角・チルト角を制御することで注目対象を常に追従すると同時に、その注目対象に関する視差を無くす方向に輻輳角を調節する。このシステムは遠隔地での近視領域作業において、注目対象に対する輻輳と調節の不一致を解消し、操作者に疲労感の少ない立体視を実現することで、その操作性を向上させることを目的としている。

3章では、開発した近視領域作業のための立体視システムと輻輳角制御手法の概要についてまず述べる。その後、提案輻輳角制御手法について具体的に述べる。

3.1 近視領域作業のための立体視システムの概要

図4が示す通り、開発した立体視システムはPTVステレオカメラと画像処理PC、制御PCから構成されている。

このシステムでは輻輳角制御のために、まず初めに画像処理PCによりPTVステレオカメラで撮影された左右それぞれの画像から注目点を検出する。その後、左画像の注目点に関する画像中心からの水平・垂直方向の画角 θ_l と右画像での水平・垂直方向の画角 θ_r を計算し、それらを制御PCに渡す。ここで、 θ_l 、 θ_r は

以下のように表すことができる。

$$\theta_l = (\theta_{lx}, \theta_{ly})^T \quad (1)$$

$$\theta_r = (\theta_{rx}, \theta_{ry})^T \quad (2)$$

θ_{lx}, θ_{rx} は左右画像それぞれにおける画像中心から注目点に対する水平方向の画角、 θ_{ly}, θ_{ry} は左右画像それぞれにおける画像中心から注目点に対する垂直方向の画角である。ここで、画像上において画角の水平方向は右側を正、垂直方向は下側を正と定義している。

制御PCでは(1)、(2)式を利用してPTVステレオカメラのパン機構・チルト機構・輻輳機構の目標角 θ^{ref} を導く。 θ^{ref} は以下のように表すことができる。

$$\theta^{ref} = (\theta_{tilt}^{ref}, \theta_{pan}^{ref}, \theta_{ver}^{ref})^T \quad (3)$$

ここで、 θ_{tilt}^{ref} はチルト機構の目標角、 θ_{pan}^{ref} はパン機構の目標角、 θ_{ver}^{ref} は輻輳機構の目標角である。

その後、各機構の動きを滑らかにする軌跡制御を行い、補正された目標角 $\theta^{ref'}$ を求める。 $\theta^{ref'}$ は以下のように表すことができる。

$$\theta^{ref'} = (\theta_{tilt}^{ref'}, \theta_{pan}^{ref'}, \theta_{ver}^{ref'})^T \quad (4)$$

ここで、 $\theta_{tilt}^{ref'}$ 、 $\theta_{pan}^{ref'}$ 、 $\theta_{ver}^{ref'}$ はチルト機構、パン機構、輻輳機構それぞれでの軌跡制御により補正された目標角である。この軌跡制御はPTVステレオカメラの各機構の急激な変化を防止し、観察者への視覚的な負担を軽減する役割がある。

その後、各機構へのトルクがPD制御と外乱オブザーバー[15]により獲得される。

ここで、図4に示す通り、各機構の制御サンプリング時間は1msに対して、左右画像からの特徴点抽出はカメラのフレームレートが1/30sであるため33ms毎に行われる。

3.2 提案輻輳角制御

3.2.1 注目点検出と画角計算

次に注目点に関する画角計算の手法について述べる。注目点に関する画像中心からの画角 θ は、図5から次のように表せる。

$$\theta = \arctan \frac{1}{f} \left(S_x - \frac{S_{flame}}{2} \right) \quad (5)$$

ここで、 f は焦点距離、 S_x は注目点の撮像面における位置、 S_{flame} は撮像面の長さである。

また、 R を解像度、 S_{pixel} を画素ピッチ、 x を注目点の撮像面におけるピクセル位置とすると、以下のような関係が成り立つ。

$$S_{flame} = R S_{pixel} \quad (6)$$

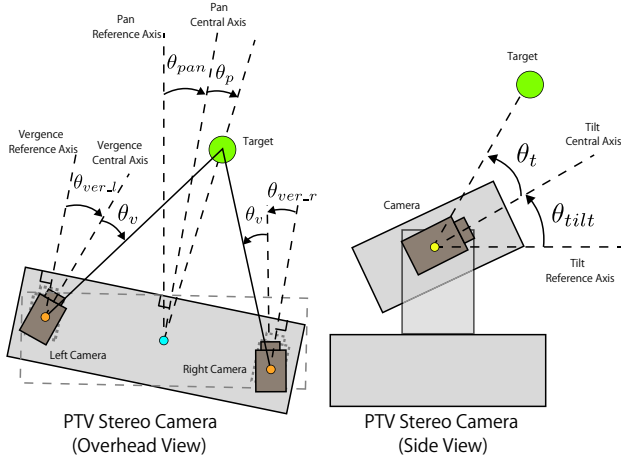


図 3: 各機構の制御角

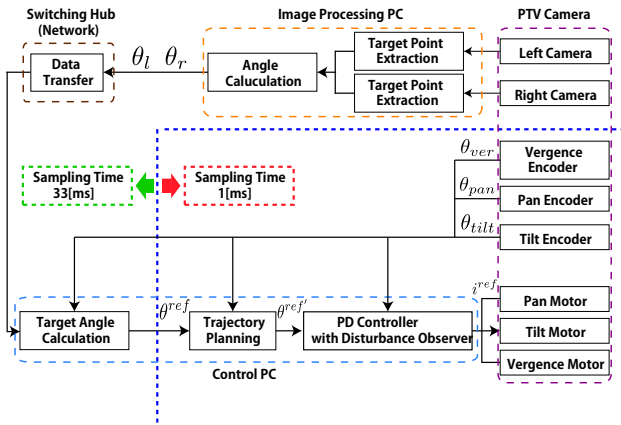


図 4: PTV 制御システムの概要

$$S_x = x S_{pixel} \quad (7)$$

これらより, (5) 式は以下のように表せる.

$$\theta = \arctan \frac{S_{pixel}}{f} \left(x - \frac{R}{2} \right) \quad (8)$$

3.2.2 チルト機構の目標角

チルト機構の目標角 θ_{tilt}^{ref} を求める. 図 3 より, 注目対象までのチルト機構の回転角 θ_t は次式のように表せる.

$$\theta_t = \frac{\theta_{ly} + \theta_{ry}}{2} \quad (9)$$

ここで, θ_{ly}, θ_{ry} は左右画像それぞれの注目点の垂直方向の画角であり, (8) 式により計算される. (9) 式では, θ_{ly}, θ_{ry} の平均を取ることで, 左右画像での特徴点に関する垂直方向の角度誤差を平滑化している.

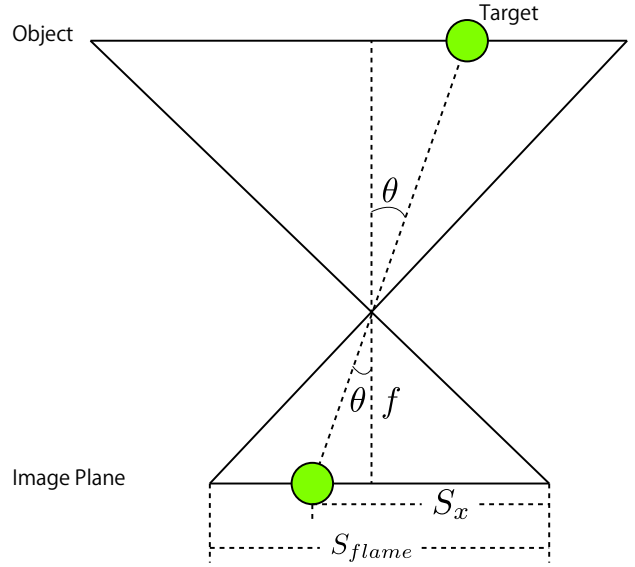


図 5: 画角計算における幾何関係

(9) 式より, チルト機構の目標角 θ_{tilt}^{ref} は次式のように表せる.

$$\theta_{tilt}^{ref} = \theta_t + \theta_{tilt} \quad (10)$$

ここで, θ_{tilt} はチルト機構の現在角である.

3.2.3 パン機構の目標角

パン機構の目標角 θ_{pan}^{ref} を求める. 図 6 にパン機構が回転する前の PTV ステレオカメラの幾何関係を示す. 図 6 より, 次式のように α, β を定義する.

$$\alpha = \theta_{ver-l} + \theta_{lx} \quad (11)$$

$$\beta = \theta_{ver-r} + \theta_{rx} \quad (12)$$

ここで, $\theta_{ver-l}, \theta_{ver-r}$ は左右それぞれのカメラにおける輻輳方向の現在角, θ_{lx}, θ_{rx} は (8) 式から得られる左右画像それぞれにおける注目点の水平方向の画角である.

図 6 より, 注目対象とベースラインとの距離 D' と, パン機構の中心軸と注目対象間の距離 L_x は以下のように表せる.

$$D' = \frac{B}{\tan \alpha - \tan \beta} \quad (13)$$

$$L_x = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{2(\tan \alpha - \tan \beta)} B \quad (14)$$

ここで, B はステレオカメラのベースラインの長さである.

これらより, 注目対象までのパン機構の回転角 θ_p' は次式のように表せる.

$$\theta_p' = \frac{L_x}{D'}$$

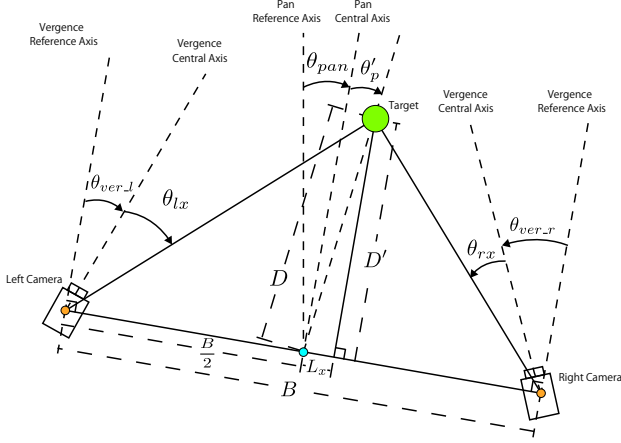


図 6: PTV ステレオカメラの幾何関係 (パン機構回転前)

$$= \arctan \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{2} \quad (15)$$

(15) 式より, パン機構の目標角 θ_{pan}^{ref} は次式のように表せる.

$$\theta_{pan}^{ref} = \theta'_p + \theta_{pan} \quad (16)$$

ここで, θ_{pan} はパン機構の現在角である.

3.2.4 輻輳機構の目標角

輻輳機構の目標角 θ_{ver}^{ref} を求める. 図 7 にパン機構が回転した状態の PTV ステレオカメラの幾何関係を示す. ここで, この時の注目対象とベースライン間の距離 D は図 6 より, 以下のように導かれる.

$$D = \frac{D'}{\cos \theta'_p} \quad (17)$$

また, 使用している PTV ステレオカメラでは, 左右のカメラそれぞれにおける輻輳機構の現在角 $\theta_{ver-l}, \theta_{ver-r}$ と注目対象までの輻輳機構の回転角 $\theta'_{lv}, \theta'_{rv}$ の間に以下の関係が常に成り立つ.

$$\theta_{ver} = \theta_{ver-l} = -\theta_{ver-r} \quad (18)$$

$$\theta'_v = \theta'_{lv} = -\theta'_{rv} \quad (19)$$

図 7 から, (17), (18), (19) 式を用いて注目対象までの輻輳機構の視差角 θ'_v は以下のように導く事ができる.

$$\theta'_v = \frac{B}{2D} - \theta_{ver} \quad (20)$$

(20) 式より, 輻輳機構の目標角 θ_{ver}^{ref} は次式のように表せる.

$$\theta_{ver}^{ref} = \theta'_v + \theta_{ver} \quad (21)$$

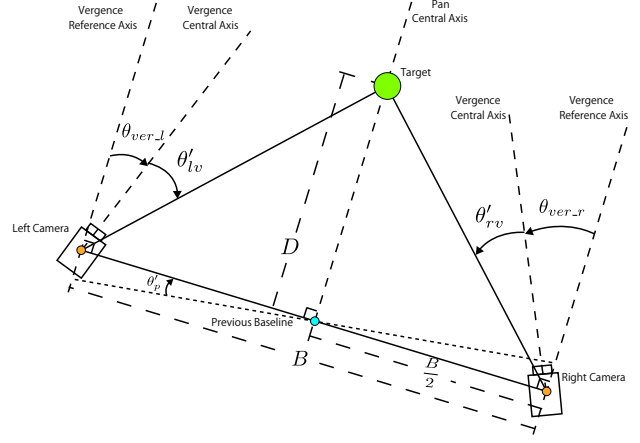


図 7: PTV ステレオカメラの幾何関係 (パン機構回転後)

3.2.5 パン機構と輻輳機構における測定誤差を考慮した目標角補正

図 8 のように, PTV ステレオカメラでのパン機構の回転軸がベースライン上に位置していない場合や, 左右カメラの光学中心が輻輳機構の回転軸位置と一致しない場合の測定誤差について述べる.

図 8 から, 注目対象までのパン機構の補正された回転角 θ_p は, 次式のように表すことができる.

$$\theta_p = \arctan \frac{D'}{D' + d'} \tan \theta'_p \quad (22)$$

ここで, D' は (13) 式より導くことができる対象とベースライン間の距離, d' はパン機構の回転軸とベースライン間の距離である.

(22) 式から, d' が十分小さいとき測定誤差の影響は無視できることがわかる. 開発した PTV ステレオカメラでは, パン回転軸とベースラインとの距離は 82mm であり, 十分小さいとは言えない. そのため, (16) 式で表されるパン機構の目標角を (22) 式を用いて以下のように補正している.

$$\theta_{pan}^{ref} = \theta_p + \theta_{pan} \quad (23)$$

輻輳機構に関しても同様の式を導くことができる. しかし, 開発した PTV ステレオカメラでは, 輻輳回転軸とカメラの光学中心はほぼ一致している. そのため, 輻輳機構に関しては測定誤差の影響は無視できる. このことから, 図 8 と (19) 式より, 補正された視差角 θ_v は以下のように求めることができる.

$$\theta_v = \theta'_v \quad (24)$$

(24) 式から, (21) 式で表される輻輳機構の目標角は以下のように補正される.

$$\theta_{ver}^{ref} = \theta_v + \theta_{ver} \quad (25)$$

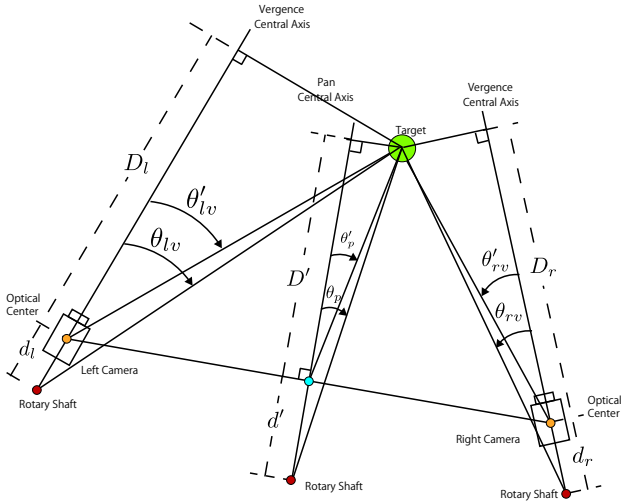


図 8: パン機構と輻輳機構の測定誤差 (ベースライン上にパン回転軸が位置しておらず, 左右カメラの光学中心と輻輳回転軸の位置が一致しない場合)

4 実験と考察

本章では, 3章で設計した輻輳角制御手法について制御系のステップ応答特性, 軌跡制御のステップ応答特性, 各機構の追従性能の3種類の面から評価を行った. これらのことから, 提案輻輳角制御手法がパン角・チルト角・輻輳角を連動させて制御することにより注目対象を追従しつつ, 注目対象に関する視差を画面上で常に低減できることを検証した.

ここで各機構の減速ギア比とエンコーダの分解能と取り付け位置について説明する. パン機構とチルト機構のエンコーダはモータに直接取り付けられ, 減速ギア比は共に 100:1, エンコーダ分解はパン機構が 256[counts/turn], チルト機構が 512[counts/turn]である. 輻輳機構のエンコーダも直接モータに取り付けられており, 減速ギア比は 167:1, エンコーダ分解能は 1024[counts/turn]である.

4.1 制御系のステップ応答特性

図 4 における PD 制御, 外乱オブザーバーから構成される制御系に対し, 各軸の外乱オブザーバーの最適なカットオフ周波数を設計した. 設計は制御系に目標角をステップ入力し, カットオフ周波数ごとに目標角と現在角の偏差の推移を調査することにより行った. ここで PD 制御のゲインについて述べる. チルト機構とパン機構は共に比例ゲインが 3600, 微分ゲインは 120 である. 輻輳機構に関しては比例ゲインが 900, 微分ゲインが 60 である.

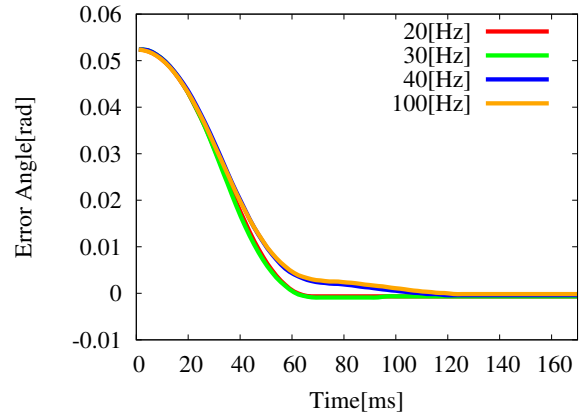


図 9: 制御系のステップ応答 (パン機構)

パン機構に関する制御系のステップ応答の結果を図 9, 図 10 に示す. ここで, 図 9, 図 10 において, x 軸は時間, y 軸は目標角と現在角の誤差を示している. 図 10 から, パン機構ではカットオフ周波数が 30Hz の時に最も偏差の収束が速いことがわかった. チルト機構に関する制御系のステップ応答結果を図 11, 図 12 で示す. これらを見ると, 目標値までの収束が安定して比較的速く行われるカットオフ周波数は 30Hz であることがわかった. 輻輳機構に関する制御系のステップ応答結果は図 13, 図 14 のようになった. 図 14 を見ると, 設計した輻輳機構ではカットオフ周波数が 170Hz 以上になると振動が起きることがわかる. また, 図 14 では, カットオフ周波数が 160Hz 以下の場合ではどの値でも特に変化は見られない. そのため, 輻輳機構では振動が起きる限界値である 170Hz から比較的差がある 140Hz を最適なカットオフ周波数と決定した.

これらのことより, 制御系での最適なカットオフ周波数は, パン機構に対しては 30Hz, チルト機構の場合は 30Hz, 輻輳機構では 140Hz と決定した.

4.2 軌跡制御のステップ応答特性

図 4 に示している軌跡制御によりサンプリング周波数の違いを吸収するために, 軌跡制御に対して各機構における最適なカットオフ周波数を評価した. 実験方法は PTV ステレオカメラで特徴点検出を行うことで, スクリーンに映ったレーザーポイントの点光源をステップ入力として与え, 軌跡制御のカットオフ周波数毎に目標角と現在角の偏差の推移を評価した.

パン機構に関する軌跡制御のステップ応答の結果を図 15 に示す. ここで, 図 15 において x 軸は時間, y 軸は目標角と現在角の誤差を示す. 図 15 から, パン機構では振動が少なく, 誤差の収束までの速度が優れて

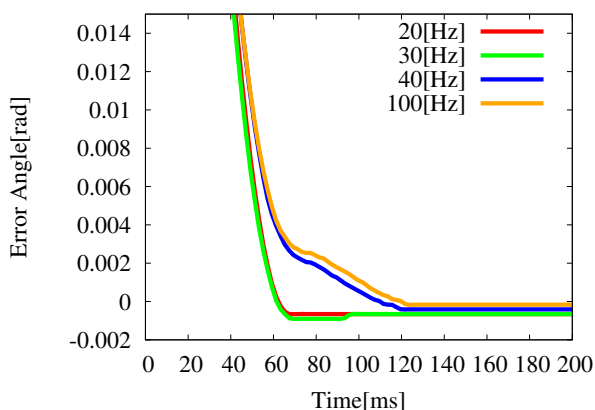


図 10: 制御系のステップ応答の拡大図 (パン機構)

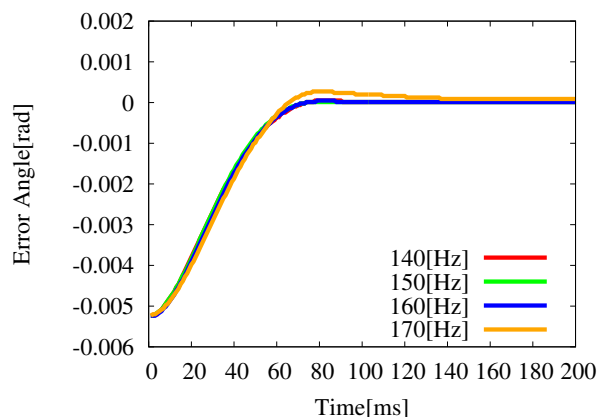


図 13: 制御系のステップ応答 (回転機構)

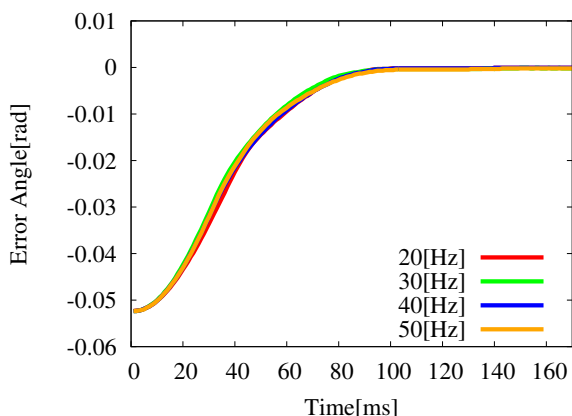


図 11: 制御系のステップ応答 (チルト機構)

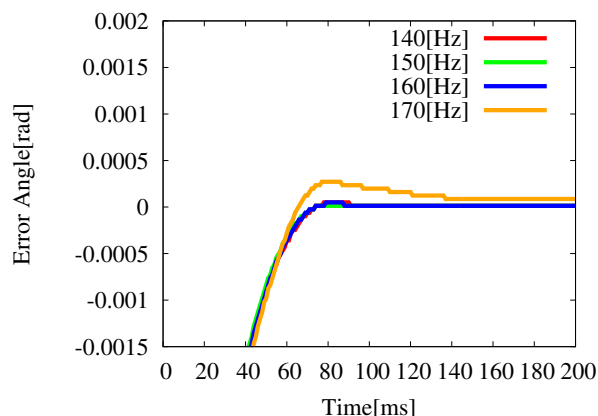


図 14: 制御系のステップ応答の拡大図 (回転機構)

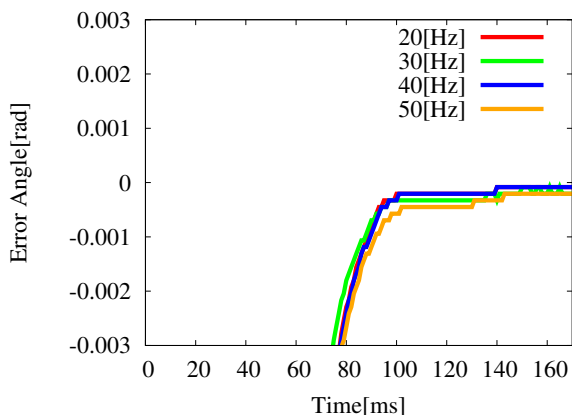


図 12: 制御系のステップ応答の拡大図 (チルト機構)

いる軌跡制御のカットオフ周波数は 0.4Hz であることがわかる。チルト機構に関する軌跡制御のステップ応

答結果を図 16 示す。図 16 から、目標値までの収束が比較的早く、振動も少ないように見える 0.7Hz をチルト機構におけるカットオフ周波数の最適値と決定した。回転機構に関する軌跡制御系のステップ応答結果は図 17 のようになった。図 17 を見てみると、0.24Hz 以外のカットオフ周波数では偏差の振動は起こっていない。また、その中でも 0.23Hz の場合が最も偏差の収束が速いことがわかるので、回転機構における最適なカットオフ周波数は 0.23Hz と言える。

これらのことより、軌跡制御での最適なカットオフ周波数は、パン機構に対しては 0.4Hz、チルト機構の場合は 0.7Hz、回転機構では 0.23Hz と評価できた。

4.3 各機構の追従性能

4.1 節と 4.2 節で評価された制御系と軌跡制御の最適なカットオフ周波数を設定した状態で、PTV ステレオカメラの各機構の追従性能を評価した。実験は、レー

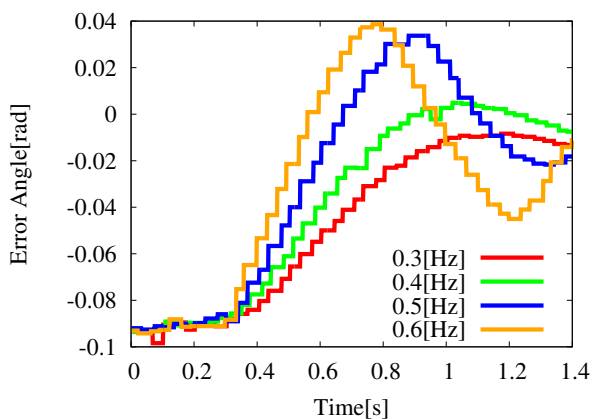


図 15: 軌跡制御のステップ応答 (パン機構)

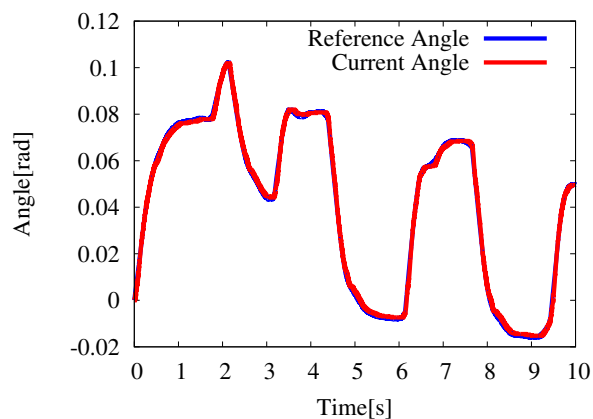


図 18: パン機構の追従性能

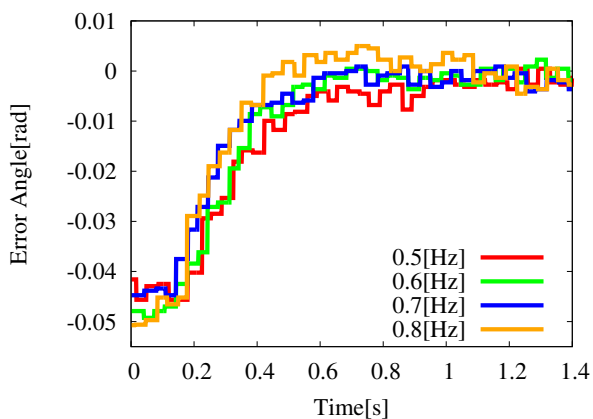


図 16: 軌跡制御のステップ応答 (チルト機構)

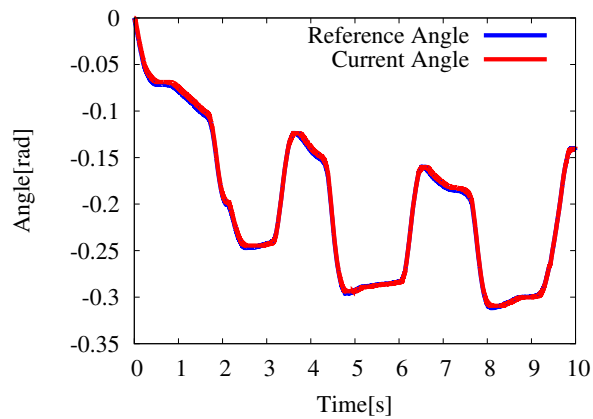


図 19: チルト機構の追従性能

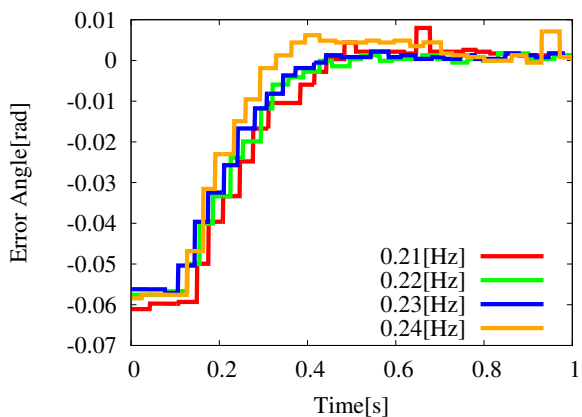


図 17: 軌跡制御のステップ応答 (輻輳機構)

従することにより行った。

各機構の追従性能の評価結果を図 18, 図 19, 図 20 に示す。図 18, 図 19, 図 20 において, x 軸は時間, y 軸は角度であり, 現在角と目標角の推移をそれぞれ示している。これらの結果を見てみると, 各機構は目標角の変化に従ってほぼずれが無く対象を追従できていることがわかる。また, 各機構の平均偏差はパン機構が 1.7×10^{-3} , チルト機構が 8.2×10^{-4} , 輻輳機構が 3.8×10^{-4} であり, 各機構の平均偏差は非常に小さい。このことから, 提案した立体視システムでは, 提案輻輳角制御手法によりパン角・チルト角・輻輳角の連動した制御を行うことで注目対象を追従しつつ, 注目対象を常に画面中心に捉えるというトラッキング制御が達成できた。

ザーポイントによる点光源をカメラから特徴点として取り込み, その点光源を提案輻輳角制御手法により追

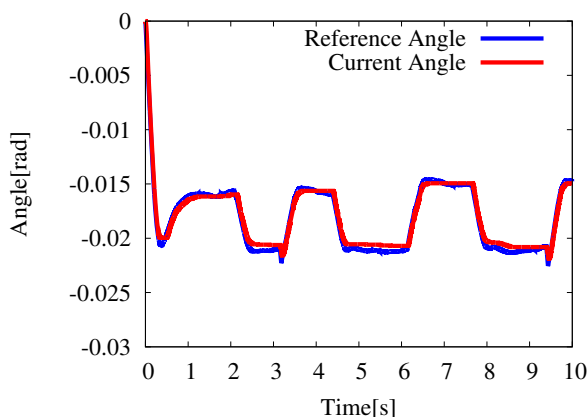


図 20: 輻輳機構の追従性能

5 結論

本論文ではパン角・チルト角・輻輳角を調節可能な PTV ステレオカメラと表示装置からなる近視領域作業のための立体視システムの提案を行った。また、ステレオ立体視における輻輳と調節の不一致を解消するために、パン角・チルト角・輻輳角を連動させて注目対象に関する画面上での視差を低減しつつ、注目対象を追従できる輻輳角制御手法を提案した。実験では、立体視システムの制御系・軌跡制御処理に対して各機構における最適なカットオフ周波数をそれぞれ求めた。また最適なカットオフ周波数を適用することで、提案立体視システムでは提案輻輳角制御手法によりパン角・チルト角・輻輳角の連動した制御を行うことで注目対象を追従し、注目対象を常に画面中心に捉えるというトラッキング制御が達成できた。今後の課題としては、提案立体視システムを実際の遠隔操作に適用して、操作者への快適性や提案手法の有効性を評価したい。

6 謝辞

本研究は JSPS 科研費 24300086 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Alexandre Bernardino, Jose Santos-Victor, Manuel Ferre, Miguel A. Sanchez-Uran.: Stereoscopic Image Visualization for Telerobotics: Experiments with Active Binocular Cameras, *Telerobotics, Springer Tracts in Advanced Robotics*, Vol. 31, pp. 77–90 (2007)
- [2] Jonathan Fishman, Stephen Ellis, Christopher Hasser, John Stern: Effect of reduced stereoscopic camera separation on ring placement with a surgical telerobot, *Surgical Endoscopy*, Vol. 22, No. 11., pp. 2396–2400 (2008)
- [3] Ferre Perez, Manuel and Aracil Santonja, Rafael and Sanchez-Uran Gonzalez, Miguel Angel: Stereoscopic human interfaces, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 15, No. 4, pp 50–57(2008)
- [4] Kyriakoulis, N.; Gasteratos, A.; Mouroutsos, S.G.: Fuzzy Vergence Control for an Active Binocular Vision System, *Cybernetic Intelligent Systems*, pp. 1–5 (2008)
- [5] Ki-Chul Kwon, Young-Tae Lim, Nam Kim, Young-Jun Song, and Young-Soo Choi: Vergence Control of Binocular Stereoscopic Camera Using Disparity Information, *the Optical Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 379–385 (2009)
- [6] Soon-Yong Park, Yong-Bum Lee, Sung-Il Chien: Linear relation for vergence control of parallel stereo camera: *Image Analysis and Interpretation*, Vol. 34, No. 3, pp. 255–256 (1998)
- [7] Capurro, C., Panerai, F., Sandini, G.: Dynamic Vergence, *Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1241–1248 (1996)
- [8] C. Capurro, F. Panerai and G. Sandini: Dynamic Vergence Using Log-Polar Images, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 24, No. 1, pp. 79–94 (1997)
- [9] Alexandre Bernardino and Jos Santos-Victor: Vergence Control for Robotic Heads using Log-polar Images, *Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1264–1271 (1996)
- [10] Dr. Velappa Ganapathy, Ng Oon-Ee: Stereo Vision Based Robot Controller, *Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1849–1854 (2008)
- [11] Beau J. Tippetts, Dah-Jye Lee, James K. Archibald, Kirt D. Lillywhite: Dense Disparity Real-Time Stereo Vision Algorithm for Resource-Limited Systems, *Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1547–1555 (2011)
- [12] Gang Yao, Yong Liu, Bangjun Lei and Dong Ren: A Rapid Stereo Matching Algorithm Based

on Disparity Interpolation, *World Automation Congress*, pp. 5 -10 (2012)

- [13] John Taylor, Thomas Olson, W. N. Martin: Accurate Vergence Control in Complex Scenes, *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 540-545 (1994)
- [14] Changhoon Yim, Alan C. Bovik: Vergence Control Using a Hierarchical Image Structure, *Image Analysis and Interpretation*, pp. 118-123 (1994)
- [15] Kato, A. Muis, A. Ohnishi, K.: Robust Network Motion Control System Based on Disturbance Observer, *AUTOMATIKA -ZAGREB-*, Vol. 47, pp. 5-10 (2006)