

2014年度 卒業論文

フレーミング支援追尾カメラ

2015年2月16日

大阪大学 基礎工学部
システム科学科 生物工学コース
日夏 俊

主査: _____ 日付: _____

フレーミング支援追尾カメラ

日夏 俊

概要

現在カメラは様々な形態で普及しているが、記録手段として写真を撮るだけでなく、個人的な写真を撮りたい、写真を通して個性や感情を表現したいという欲求を持つ人も多い。写真の印象に変化を与える要素の一つとして、構図が挙げられる。構図の調整(フレーミング)を支援する方法には、デジタルカメラやスマートフォンの画面中に補助線を表示するアプリケーションなどが存在する。しかし、撮影初心者が複数の被写体を補助線に従って導入したり、カメラに加えて三脚なども同時に調整することは難しい。

本研究では、カメラ映像の画像処理に基づくカメラ雲台の角度の制御により主被写体を追尾し、さらに全被写体が目標の位置に入るようにカメラの移動を促す指示を画面上でユーザに提示することで、目標構図を達成するように撮影を支援するシステムを構築することを目的とする。カメラ雲台にはサーボモータが二つ装着されており、各々がパン方向・チルト方向に回転する。カメラ映像中における主被写体の座標と目標構図における座標との差に基づき生成される PWM 信号によって同モータの制御を行った。カメラ映像中の被写体を認識する画像処理手法として、特定色の抽出やラベリングを利用して被写体の座標を計算した。さらに、副被写体を含めた全ての被写体が目標とする位置に入るように、副被写体の座標に応じて映像中にカメラ移動の指示を表示させた。

提案システムの有用性を示すため、評価実験を行った。提案システムと他のシステムを用いて写真撮影を行い、主被写体と副被写体が目標構図に合わせて配置されているかどうかを比較した。その結果、提案システムを用いた撮影結果の方が、目標構図を満たす結果が多かった。副被写体に関しては、比較対象の一つである補助線表示システムの方が、提案システムよりも目標の位置に近い配置で撮影を行えたが、主被写体に関しては、他のシステムに比べて提案システムの方がより目標の位置に近い配置で撮影を行えることが示された。

キーワード：構図調整，追尾，ビジュアルサーボ，サーボモータ，PWM 信号，
画像処理，作業支援

Tracking Camera for Framing

Shun Hinatsu

Abstract

These days, many people have cameras in various forms. Some people want to take photographs for not only recording events but also expressing individuality and emotion. The composition can change the impression for photographs. Some cameras or smartphone applications give users additional lines in the display for framing. However, it is difficult for beginners to align the camera and the tripod when taking photographs of plural objects fitting the lines.

In this research, the author proposes the system that helps user to take photographs fulfilling the composition, by tracking objects with image processing and controlling camera platform and displaying the direction to move the camera. The platform has two servomotors. One is rotated in a panning direction, and the other is rotated in a tilt direction. The author controlled the servomotors by calculating the difference between the object's coordinates and target position's and generating PWM signals. In order to recognize the objects in the camera image, the author used image processing such as extracting color of image and connected-component labeling. Moreover, the author instructed the user to move the camera so that all objects including sub objects achieve the composition.

In the experiments, the author compared photographs taken by the proposed system and by other systems. As a result, it turns out that the proposed system helped users take more photographs achieving the composition than other systems. The result has suggested that the additional line displaying system can help user arrange sub object closer to the target position than the proposed system. However, the proposed system can help user arrange main object closer to the target position than other systems.

Keywords : Framing, tracking, visual servo, servomotor, PWM signal,
image processing, operation support

目次

第1章	はじめに	1
第2章	作業支援システム	3
2.1	情報提示システム	3
2.2	半自律的システム	6
2.3	フレーミング支援システム	8
第3章	フレーミング支援システムの構成	10
3.1	フレーミング支援システムの概要	10
3.2	対象認識のための画像処理	12
3.3	カメラ雲台の制御	16
3.4	ユーザへの情報提示	21
第4章	システムの実装と評価	23
4.1	フレーミング支援システムの実装	23
4.2	追尾機能の確認	26
4.3	評価実験	28
4.4	評価実験の結果	31
4.5	考察	34
第5章	おわりに	37
	謝辞	38
	参考文献	39

目次

1.1 ユーザの意思に基づいたフレーミング支援システム	2
2.1 調理支援	3
2.2 組み立て作業支援	4
2.3 ARを用いた絵画支援	5
2.4 ARを用いたギター演奏支援	5
2.5 誘導力を用いた腹腔鏡下手術支援	6
2.6 力覚を用いた絵画支援	6
2.7 安全運転支援	7
2.8 双腕建機操作支援	7
2.9 トリミングによるフレーミング支援	8
2.10 好みを反映させたトリミングによるフレーミング支援	8
2.11 三次元情報を用いたフレーミング支援	9
3.1 提案システムの構成	10
3.2 提案システムによる撮影のフローチャート	11
3.3 ラベリング初期状態の画像	13
3.4 第一回走査前のルックアップテーブル	13
3.5 ラベル1を初めて割り振る際	14
3.6 ラベル1を二回目に割り振る際	14
3.7 第一回走査後の画像	14
3.8 第一回走査後のルックアップテーブル	14
3.9 ラベリングが終了した画像	15
3.10 被写体と矩形	15
3.11 提案システムで取り扱う座標系	16
3.12 PWM信号によるサーボモータ制御	20
3.13 PWM信号の例	20
3.14 目標の位置に矩形を表示した画像	22
3.15 本システムの画面構成	22

4.1	実装したフレーミング支援システム	23
4.2	カメラとカメラ雲台	24
4.3	サーボモータ	24
4.4	サーボモータを取り付けたカメラ雲台	24
4.5	被写体	26
4.6	被写体の初期位置	26
4.7	画像座標系での被写体の軌道	27
4.8	主被写体	28
4.9	副被写体	28
4.10	三分割構図を満たす写真例 1	28
4.11	三分割法を満たす写真例 2	28
4.12	三分割法を満たさない写真例 1	29
4.13	三分割法を満たさない写真例 2	29
4.14	被写体とカメラの位置	30
4.15	実験風景	30
4.16	$ PP' $ と $ QQ' $ の平均値	33
4.17	Δt の平均値	33
4.18	撮影中の $(x'_{P'}, y'_{P'})$ の変化	35
4.19	撮影中の $(x'_{Q'}, y'_{Q'})$ の変化	35
4.20	撮影中の (θ_x, θ_y) の変化	35

表 目 次

4.1	カメラの仕様	24
4.2	サーボモータの仕様	25
4.3	サーボモータの制御に必要なパラメータ	25
4.4	PC の仕様	26
4.5	追尾速度	27
4.6	評価実験に用いたシステムの仕様	29
4.7	撮影成功回数	31
4.8	システム 1 による撮影結果	32
4.9	システム 2 による撮影結果	32
4.10	提案システムによる撮影結果	32

第1章 はじめに

人間は古来より、心象や風景を様々な手段で保存し、後世に伝えてきた。その行為の始まりは人間の主観による絵画であり、最古の記録は旧石器時代に描かれた洞窟の壁画まで遡る。ルネサンス期にはピンホールや鏡により忠実に再現された像を絵画の補助として用いることで、主観的であった絵画に客観性が加わった。19世紀にはカメラが発明され、絵画と比べてより客観的かつ短時間に風景を写真として保存することが可能となった [1]。当初カメラは高価だったため専門家や一部の上流階級のみが所有していたが、20世紀後半に比較的安価なフィルムカメラに加えてインスタントカメラやレンズ付きフィルム、デジタルカメラが発売され、写真撮影は一般家庭に幅広く普及した [2]。現在では、安価なデジタルカメラの普及や携帯端末へのカメラ機能の搭載により、ますます写真撮影は身近なものとなっている。

出来事の記録のみを目的として写真を撮るだけではなく、個性的な写真を撮りたい、写真を通して個性や感情を表現したいという欲求を持つ人も多い。そのために考慮すべき写真撮影の要素として、ピント・シャッタースピード・ISO感度・構図などが挙げられる。ピントの調整により撮影したい対象と背景を明確に区別することができ、シャッタースピードとISO感度の調整により写真の明るさなどを変更することが出来る。構図は、写真全体の印象に躍動感や安定感などの変化を与える [3]。現在販売されているデジタルカメラの大半において、ピント・シャッタースピード・ISO感度は撮影時に全自動で最適な状態・値に設定することができるため、撮影初心者でも理想の写真を撮ることが可能である。さらに最近では、構図の調整(フレーミング)に関する同機能の搭載や研究も行われている。例えば、デジタルカメラやスマートフォンの画面中に、構図を示す補助線を表示させ、様々な構図での撮影を支援するアプリケーション [4] や、撮影した画像を目的の構図に合うように自動的にトリミングを行うシステム [5]、三次元情報の計測に基づいた指示の重畳表示を行うシステム [6] [7] などが挙げられる。しかし、補助線を表示するシステムでは、構図の良し悪しはユーザの判断に委ねられてしまう。複数の被写体を撮影する際は、各被写体を特定の線に合わせる必要があり、ユーザが撮影初心者の場合はカメラと同時に三脚などを調整する場合にも困難が生じる。また、自動トリミングを行うシステムは、撮影結果に対するフレーミングであるために撮影時のユーザの意思は反映されず、さらにトリミングにより得られた画像は元の撮影画像に比べて画質が低下してしまうという欠点がある。三次元情報の計測に基づいた指示の重畳表示を行うシステムは、カメラ以外にも三次元情報計測用のセンサを用意する

必要がある。したがって、図 1.1 に示すように、カメラとは別の計測装置を用いずに、撮影時にカメラが動いてユーザの意思に基づいたフレーミングを支援するシステムが必要であると考えられる。

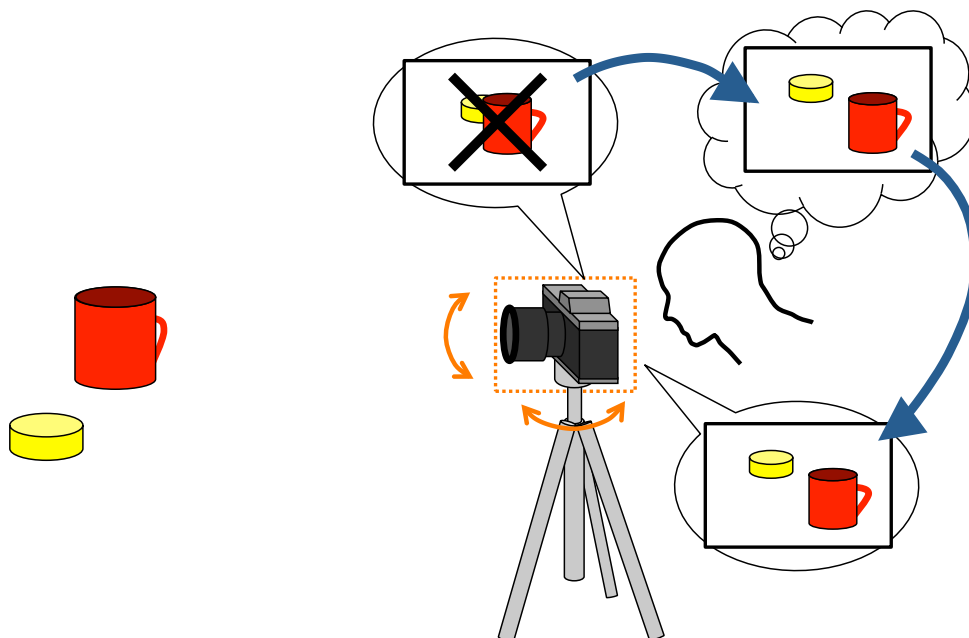


図 1.1: ユーザの意思に基づいたフレーミング支援システム

本研究では、従来から高評価とされる構図での写真撮影を支援するシステムを提案する。映像中の画像処理およびカメラ雲台の角度の制御により被写体を追尾することで、ユーザのカメラ移動や三脚の調整に伴う負担を減らす。さらに、三次元計測を行わずにカメラ映像中における全被写体の位置に基づいてカメラ移動を促す指示を表示することで、画質を低下させることなく目標とする構図での撮影を支援するとともに構図の達成の可否をユーザに示すシステムの構築を行う。

第2章 作業支援システム

本章ではまず、作業支援システムを情報提示システムと半自律的システムに大別したうえで、作業支援を目的とする先行研究について述べる。次にフレーミングに関する先行研究について述べ、最後に先行研究を踏まえた上で本研究の位置づけと方針を述べる。

2.1 情報提示システム

本節では、ユーザに対して作業に必要な情報を提示することでユーザの作業を支援するシステムに関する先行研究について述べる。情報を提示する手法としては電子マニュアルを提示する手法や、AR(Augmented Reality) 技術を用いる手法が挙げられる。

2.1.1 電子マニュアル提示システム

ユーザの作業工程に応じて、液晶ディスプレイを用いて電子マニュアルを提示することでユーザの作業を支援するシステムが研究されている。

環境内にセンサを配置し、ユーザの活動状況に応じて自動的にサービスを提供する研究の一つとして、福田らが提案しているユーザの調理を支援するシステム [8] [9] を図 2.1 に示す。このシステムでは、キッチンに設置した複数のセンサによりユーザの調理状況を把握し、キッチンカウンターに取り付けたタッチパネル上へ調理過程の写真とレシピを表示することにより、ユーザの調理を誘導する。

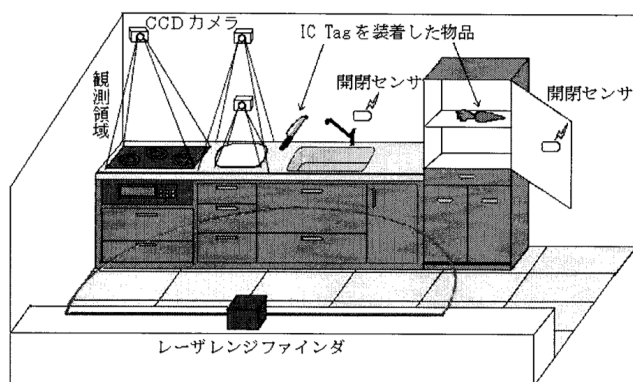


図 2.1: 調理支援 [9]

複数の工程から構成される製品の組み立て作業に対して、電子マニュアルを通して作業支援を行うシステムが研究されている。荒川らが提案するシステムを図 2.2 に示す。このシステムでは、ユーザの作業段階に応じた教示を行うことに加えて、ユーザの実績や作業時間を計測して分析することで、ユーザに対して最適な電子マニュアルを提示する。

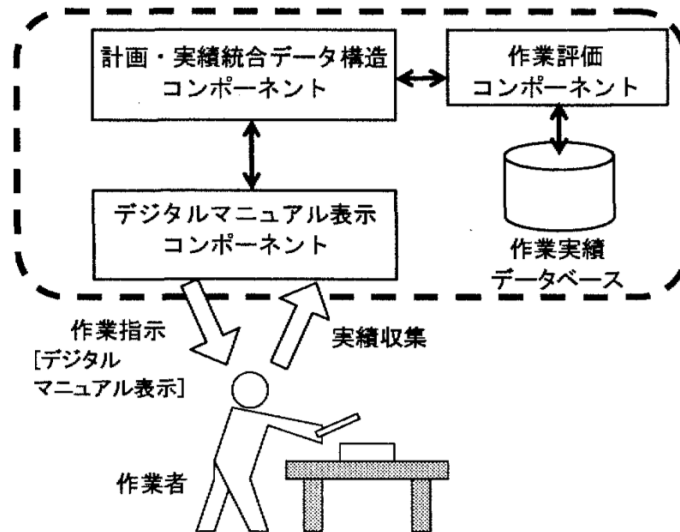


図 2.2: 組み立て作業支援 [10]

2.1.2 AR を用いた情報提示システム

本や説明書の代わりに AR(Augmented Reality) 技術を用いて、作業に必要な情報をユーザが見ている現実の世界に重畳することで、ユーザの作業を支援するシステムが研究されている。AR を用いた情報提示システムでは、液晶ディスプレイに限らずヘッドマウントディスプレイ、プロジェクタなども多く利用される。

井上らが提案している，AR を用いた絵画支援システム [11] を図 2.3 に示す．ユーザがヘッドマウントディスプレイを装着すると，描画する紙に印刷された AR マーカの位置に応じて，同ディスプレイ内に手本となる補助線が表示される．ユーザは補助線に沿ってペンを動かして描画を進めることで，目標とする絵を描くことができる．

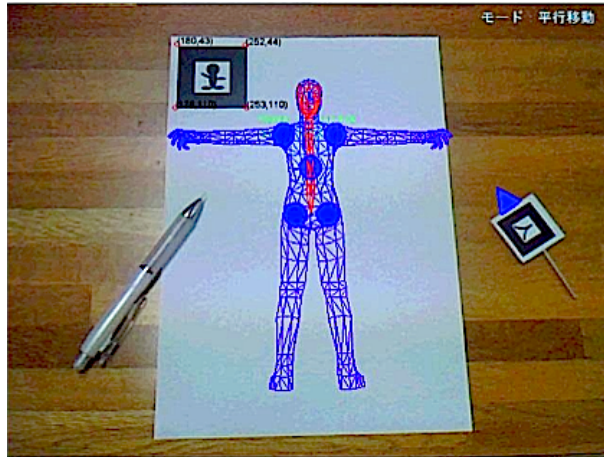


図 2.3: AR を用いた絵画支援 [11]

指導者がいない状況で，教則本や教則ビデオを用いずに楽器の演奏を支援するシステムが研究されている．元川らが提案している，AR を用いたギター演奏支援システム [12] を図 2.4 に示す．ユーザが演奏しているギターの位置と姿勢を検出し，左手指による指板の押さえ方や右手を動かす方向などを PC のディスプレイに表示した現在のギターの映像に重畳することで，ユーザへの教示を行う．

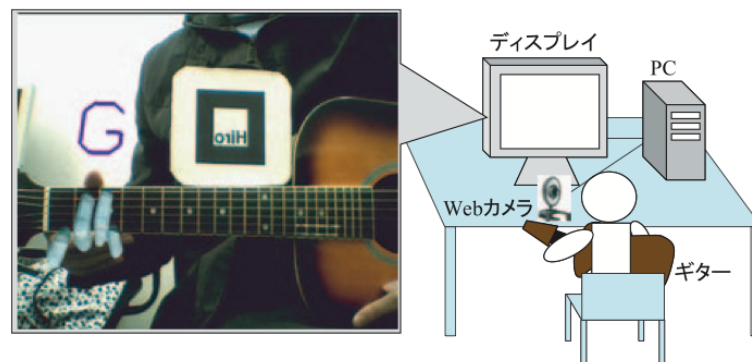


図 2.4: AR を用いたギター演奏支援 [12]

2.2 半自律的システム

本節では、2.1 節で述べたような情報提示を行わずに、ユーザが現在行っている作業を補助する、半自律的システムに関する先行研究について述べる。半自律的システムは、作業誘導システムと作業分担システムの二つに分類することができる。

2.2.1 作業誘導システム

ユーザの現在の作業状況に基づいて、力覚などを用いてユーザの作業を誘導するシステムが研究されている。

田川らが提案している、誘導力を提示する腹腔鏡下手術訓練システムを図 2.5 に示す。指導医と修練医に同じ映像を提示し、手術訓練を行う指導医の手の動作と力の計測を基に修練医の手に対して力覚を提示して、修練医の手の動きを誘導する。

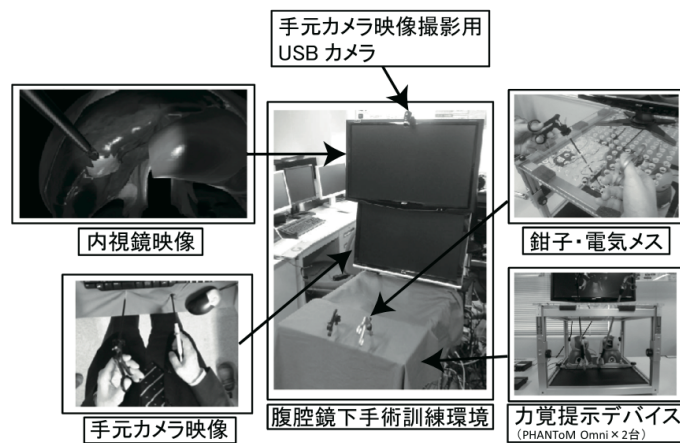


図 2.5: 誘導力を用いた腹腔鏡下手術支援 [13]

和田が提案している力覚を用いた絵画支援システム [14] を図 2.6 に示す。ユーザは対象物の輪郭線を描くことを目的とする。ペン先の位置と対象の輪郭線上にある最も近い点との間にバネがあるとの想定のもとにユーザにペン型デバイスを通して力覚を提示することで、ユーザの運筆を誘導する。

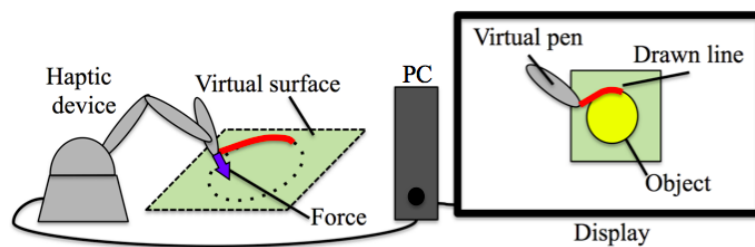


図 2.6: 力覚を用いた絵画支援 [14]

2.2.2 作業分担システム

本来であれば、ユーザが全て行うはずである作業の一部をシステムが分担することで、ユーザの作業を支援するシステムが研究されている。

近年、ドライバの安全運転を支援するシステムが多く提案され、実売にも至っている。堀米らが提案する安全運転支援システム [15] を図 2.7 に示す。このシステムは、ユーザの運転する車の速度と障害物の位置を常に計測し、車が障害物と衝突する危険性が高い場合に、ユーザの意図に関わらずブレーキや操舵を自動的に調整することで衝突の回避を行う。

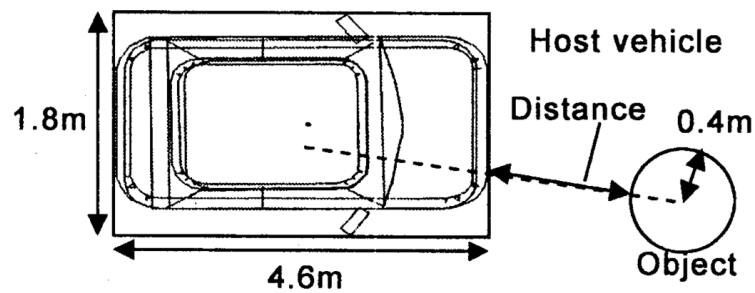


図 2.7: 安全運転支援 [15]

双腕建機は二つのマニピュレータを一人で操作する必要があるため、ユーザに極めて高度な技術が求められるため、機械側が作業状態や危険状態を識別した上でユーザの操作を支援するシステムの開発が求められている。岩田らが提案するシステム [16] を図 2.8 に示す。このシステムでは、ユーザがマニピュレータを用いた精密操作を行う際に、状況に応じて操作ゲインを自動的に切り替える。

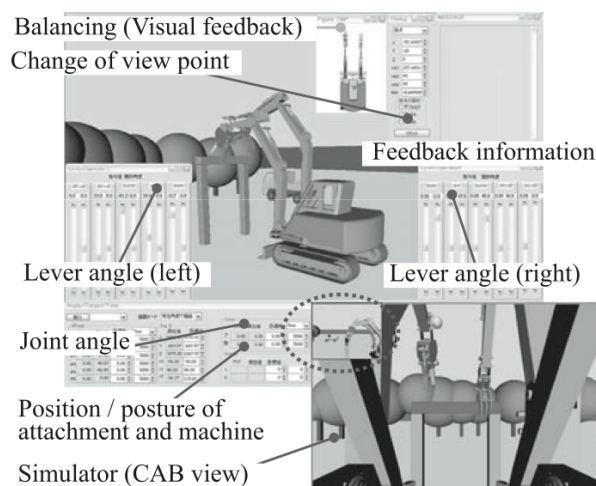


図 2.8: 双腕建機操作支援 [16]

2.3 フレーミング支援システム

本節では、既存のフレーミング支援に関する先行研究について述べてから、本研究の位置づけと方針について述べる。

フレーミングを支援する手法として、既に一般的であるデジタルカメラやスマートフォンの補助線表示アプリケーション [4] に加えて、視覚注目の強度である顕著度の高い部分の抽出や顔認識により画像内の構成要素を読み取り、自動的にトリミングを行うシステム [17] が Suh らにより提案されている。Suh らが提案しているシステムを図 2.9 に示す。しかし、自動的にトリミングを行うシステムは、携帯端末の小さな画面に表示する小さな画像を生成するなどの際には有効であるが [18]、撮影時のユーザの意図が反映されないため、実際にトリミングを行った結果がユーザにとって理想的な写真となる保証はない。



図 2.9: トリミングによるフレーミング支援 [17]

トリミングに際してユーザの好みを反映させるシステムの研究も行われている。Nishiyama らが提案しているシステム [19] を図 2.10 に示す。このシステムでは、あらかじめ多数の写真中の複数の注目領域と背景領域から、ユーザが高評価・低評価と判断する写真を識別するための特徴量を得ておき、写真中の特徴量が高評価の写真に合致するようにトリミングを行う。しかし、トリミングによるフレーミングシステムは、トリミングを行った画像の画素数は元の画像と比べて少なくなるため、画質が低下してしまうという欠点がある。また、撮影結果に対する自動的なトリミングによるフレーミングではユーザの撮影時の意思は反映されないため、ユーザのフレーミング技術の向上に直接的にはつながらない。

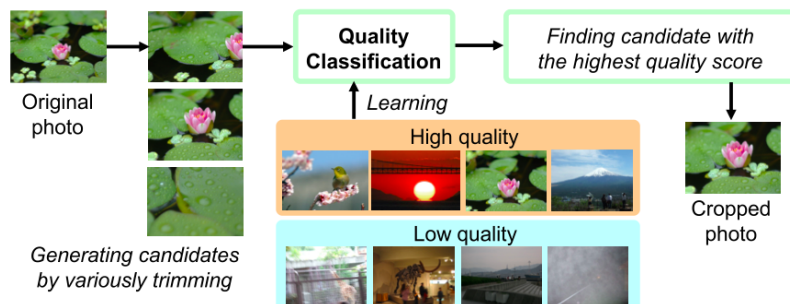


図 2.10: 好みを反映させたトリミングによるフレーミング支援 [19]

一方、トリミングを用いずにユーザのフレーミングを支援するシステムの研究も行われている。濱田らのシステム [6] [7] を図 2.11 に示す。このシステムではユーザが撮影する度に写真に対して学習済みデータベースおよび構図情報による得点付けを行い、より高得点の写真が撮影出来るような位置やカメラ姿勢を推定してユーザに提示する。しかし、被写体の形状や撮影位置などの三次元情報の計測が必要となるため、カメラとは別の計測装置やセンサを必要とする。

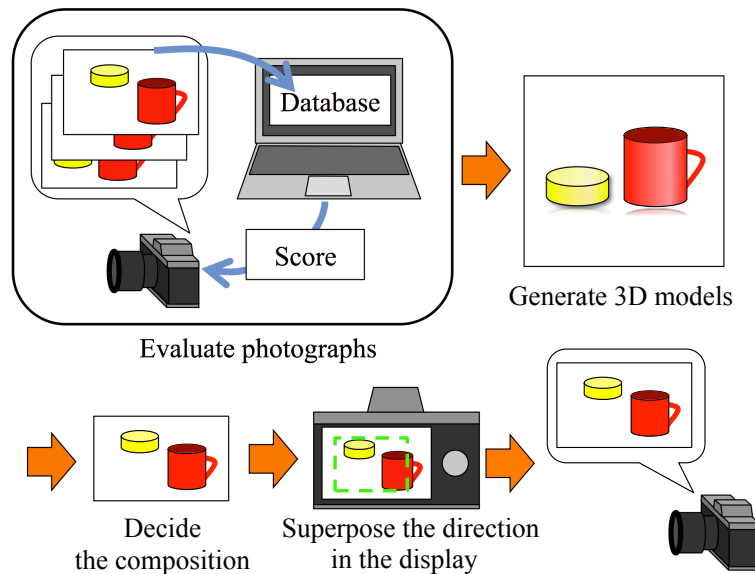


図 2.11: 三次元情報を用いたフレーミング支援 [7]

本研究では、カメラ雲台を用いて一つの被写体の追尾を行うことで、自動的に構図の調整を行い、トリミングによるフレーミング支援では避けられない画質の低下を防ぐ。さらに、全ての被写体の位置が従来から高評価とされる構図に合致するようにカメラ移動の指示を提示することで、ユーザのフレーミング技術の向上を支援する。目標とする構図はシステムにより自動的に提示されるのではなく、撮影を行う前にユーザがあらかじめ選択しておく。提案システムは、カメラ雲台が一つの被写体に対するフレーミングを担い、ユーザがシステムにより提示される指示により他の被写体も含めたフレーミングを担うため、情報提示システムと半自律的システムを組み合わせられていると考えられる。また、カメラ雲台による追尾やカメラ移動指示の提示は、二次元画像のみに基づいて行うことで、三次元情報の測定を必要としないフレーミング支援システムを構築する。

第3章 フレーミング支援システムの構成

本章では、フレーミング支援システムの構成について説明する。まず、提案システムを構成する機器について述べる。次に、提案システムを用いた写真撮影の流れを述べ、システムに実装する画像処理と制御理論、ユーザへの情報提示について述べる。

3.1 フレーミング支援システムの概要

提案システムの構成を図 3.1 に示す。提案システムは PC、マイクロコントローラ、カメラ、カメラ雲台から構成される。また、目標とする構図は主被写体と副被写体の二つから成り立つものとする。ユーザはカメラ及びカメラ雲台を持ち、PC の画面でカメラから取得される映像を見ながら、キーボードとマウスの操作により撮影を行う。PC での画像処理から被写体の位置を求めてマイクロコントローラを経由してカメラ雲台に装着されたサーボモータを動かし、主被写体を追尾する。全被写体が目標構図の通り配置されるように、目標構図中の副被写体の位置を PC の画面上に提示し、その提示の元にユーザがカメラを移動させる。

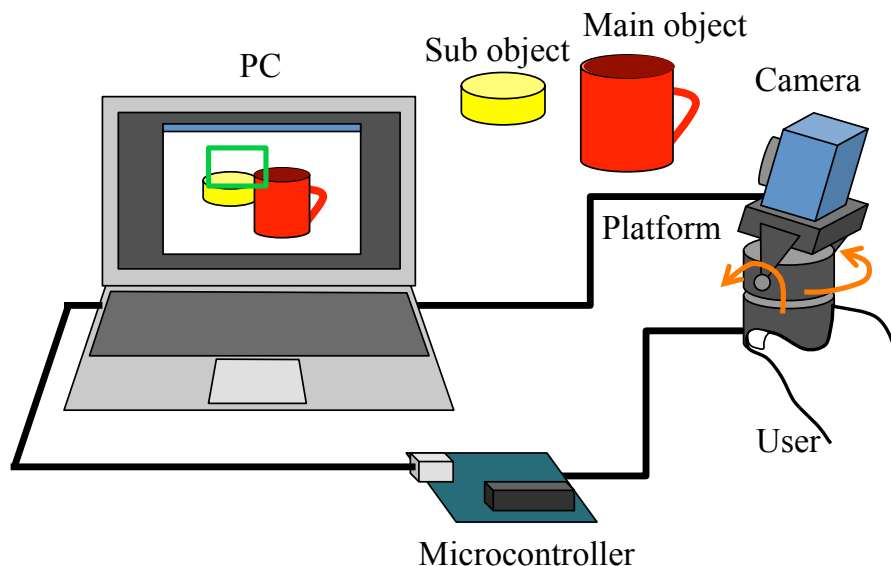


図 3.1: 提案システムの構成

提案システムを用いた撮影のフローチャートを図 3.2 に示す。図 3.2 中の被写体の配置を決定することを想定して本システムの処理手順を説明する。

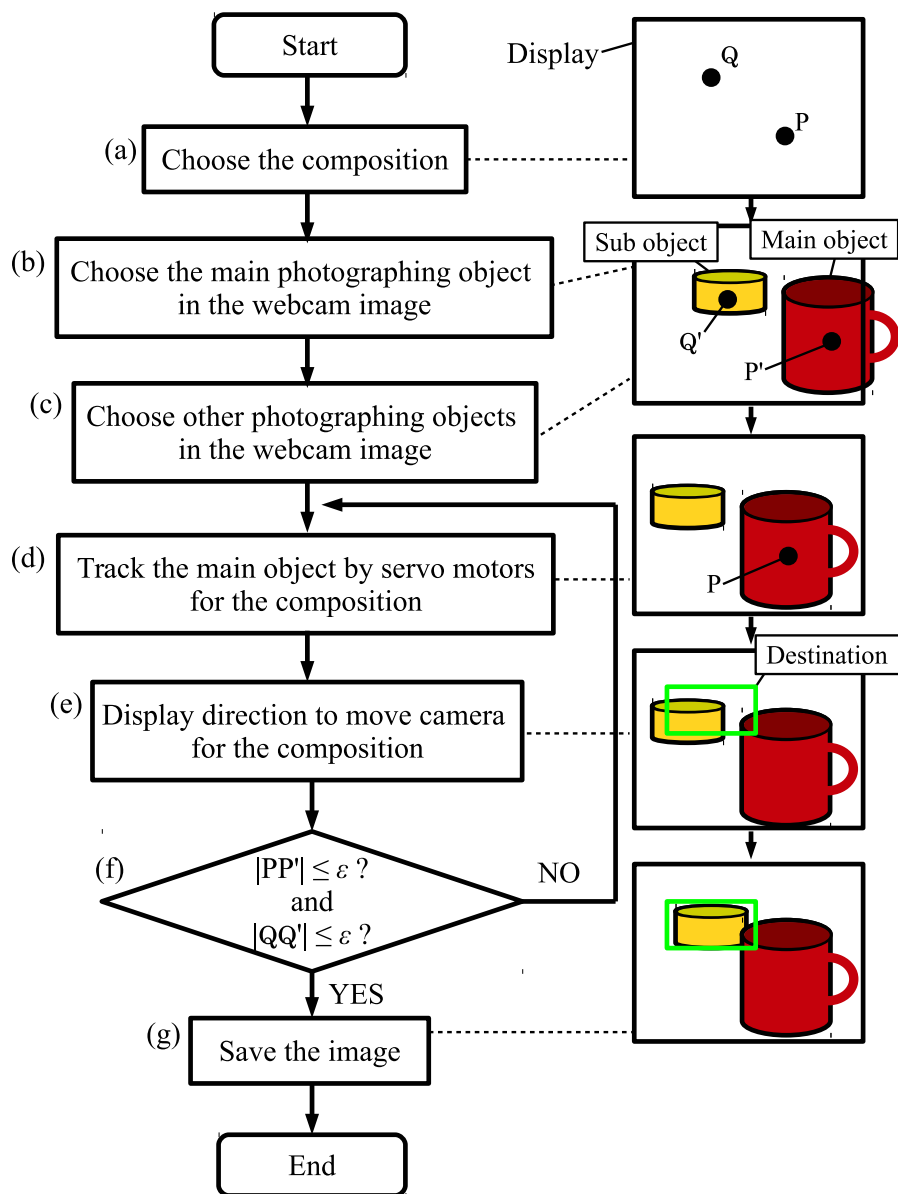


図 3.2: 提案システムによる撮影のフローチャート

初めに、ユーザは撮影の目標とする構図を選択する。目標構図内の主被写体の位置を点 P，副被写体の位置を点 Q とする。ユーザは PC 画面上に表示されたカメラ映像から主被写体と副被写体を選択する。カメラ映像内の主被写体，副被写体の位置をそれぞれ点 P'，Q' とする。カメラ映像中における被写体の認識手法については 3.2 節で説明する。

カメラ映像中で主被写体が点 P に配置されるようにカメラ雲台を制御して追尾を行う。カメラ雲台の角度の制御に関しては、3.3 節で説明する。

次に、副被写体が点 Q に配置されるように、映像中にカメラの移動を促す指示を表示させる。ユーザはその指示を元に、カメラを移動させる。各被写体について目標の構図内の位置との差が閾値 ε 以下であれば ($|PP'| \leq \varepsilon$ かつ $|QQ'| \leq \varepsilon$)、フレーミングが完了したと判断し、撮影を行う。差が大きければ、再度カメラ雲台による追尾やユーザによるカメラ移動を繰り返して目標の構図に近づける。

3.2 対象認識のための画像処理

カメラ雲台の角度を制御し被写体の追尾を行うためには、画像中から被写体を認識する必要がある。本節では、物体の認識に必要な画像処理手法について述べる。

3.2.1 色に基づく物体認識

カメラ映像中の被写体を認識して画像上の座標を求める手法として、色に基づく物体認識が挙げられる [20]。本研究では、PC 上の画像処理によりカメラ映像中の特定色を検出してその重心の座標を求め、その色を持つ特定の被写体の追尾や構図調整に用いる。

以下では、色に基づく物体認識の手順を述べる。ユーザが選択した被写体を構成する画素のうち一点の RGB 値を取得し、HSV 値に変換する。HSV 表色系では、色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value) の三つの値で色を表す。各画素について、RGB 値を (R, G, B) 、RGB 値から HSV 表色系への変換後の値を (H, S, V) とすると、RGB 表色系 (R, G, B) から HSV 表色系 (H, S, V) への変換は式 (3.1), (3.2), (3.3) で表される。ただし、 MAX_{RGB} 、 MIN_{RGB} は (R, G, B) の値のうちそれぞれ最大・最小の値である。

$$H = \begin{cases} \frac{G - B}{MAX_{RGB} - MIN_{RGB}} \times 60 & (MIN_{RGB} = R) \\ \frac{B - R}{MAX_{RGB} - MIN_{RGB}} \times 60 + 120 & (MIN_{RGB} = G) \\ \frac{R - G}{MAX_{RGB} - MIN_{RGB}} \times 60 + 240 & (MIN_{RGB} = B) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$S = \frac{MAX_{RGB} - MIN_{RGB}}{MAX_{RGB}} \quad (3.2)$$

$$V = MAX_{RGB} \quad (3.3)$$

フレーム毎に、選択した画素の HSV 値と画像内の全画素の HSV 値との差を計算し、許容差以内の画素の集合を被写体の候補とする。選択した画素 (x_p, y_p) の HSV 値を (H_p, S_p, V_p) 、画像内の画素 (x_i, y_i) の HSV 値を (H_i, S_i, V_i) とすると、 $|H_i - H_p| < \delta_H$ かつ $|S_i - S_p| < \delta_S$ かつ $|V_i - V_p| < \delta_V$ を満たす画素の集合である。ただし、 δ_H 、 δ_S 、 δ_V は許容差である。

3.2.2 ラベリング

3.2.1 項で示した色に基づく物体認識のみでは、映像内に被写体に類似した色調の物体が存在する場合、正しく被写体の重心を求めることが出来ない。被写体と他の物体を分離して認識するためにラベリング (連結成分抽出) 処理を用いる [21]。

以下では、一般的な静止画像での八近傍ラベリングの手順について述べる。初めに、画像中でラベリングを行いたい色を持つ画素とその他の色を持つ画素を白黒へと二値化する。ラベリングを行う対象の色を白とする。画像中の全画素のラベルを 0 で初期化しておく。初期状態の二値化画像を図 3.3 に示す。また、ラベリング処理の過程で、異なるラベルを持つ画素が同一の連結成分に属していることを記録しておく表であるルックアップテーブルを用意する。ラベリング処理を始める前のルックアップテーブルを図 3.4 に示す。“Src” “Dst” の値はラベルを表しており、ルックアップテーブル内で同じ行に記録されているラベルを持つ画素は同一の連結成分に属していることを示す。“Dst” の値は、以下の処理で書き換えられる。

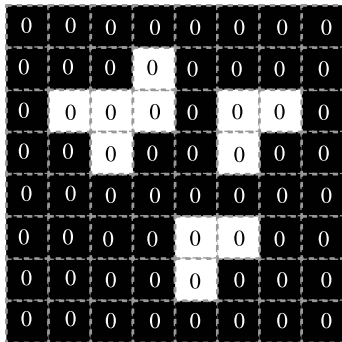


図 3.3: ラベリング初期状態の画像

Src	Dst
1	1
2	2
3	3
4	4
⋮	⋮

図 3.4: 第一回走査前のルックアップテーブル

画像の左上から一回目の走査を行い、画素が白の画素を検出する。検出した画素の左上、上、右上、左の画素を探索範囲と定めてラベルを確認する。探索範囲内の白の画素のラベルが全て0なら最後にラベルとして用いた番号+1を新たなラベルとして割り振る。探索範囲内に0以外のラベルがある場合は、探索範囲内で最小の番号をラベルとして割り振り、ラベルとして用いなかった番号と最小の番号をそれぞれルックアップテーブル中の“Src”，“Dst”に更新することにより、違うラベルを持つ画素が同一の連結成分に属していることを記録する。図 3.5 にラベル 1 を初めて割り振る際の画像、図 3.6 にラベル 1 を二回目に割り振る際の画像を示す。

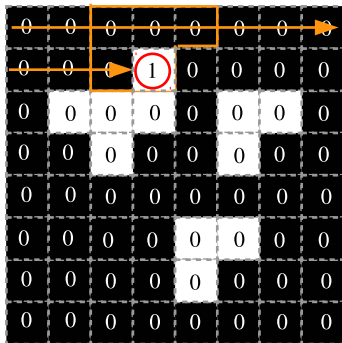


図 3.5: ラベル 1 を初めて割り振る際

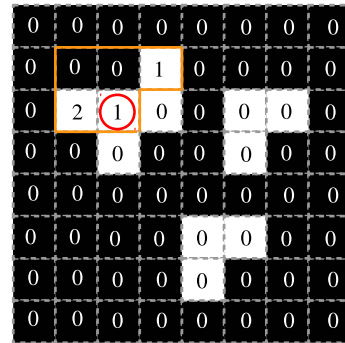


図 3.6: ラベル 1 を二回目に割り振る際

図 3.3 に対する一回目の走査が終了した際の画像とルックアップテーブルを、それぞれ図 3.7, 図 3.8 に示す。

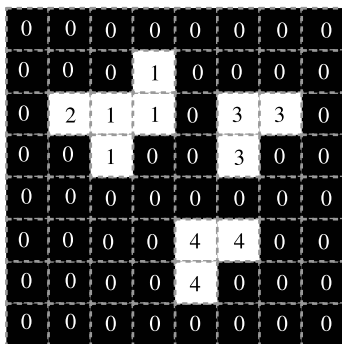


図 3.7: 第一回走査後の画像

Src	Dst
1	1
2	1
3	3
4	4
⋮	⋮

図 3.8: 第一回走査後のルックアップテーブル

画像の左上から再度走査を行い、ルックアップテーブルを参照しながら同一連結成分に属するのラベルの中で最小のラベルを各画素に割り振る。図 3.9 に、図 3.3 に対するラベリングが終了した画像を示す。

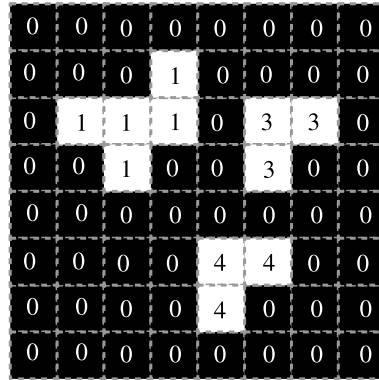


図 3.9: ラベリングが終了した画像

本システムでは静止画像ではなく Web カメラから得られる動画を処理するため、フレーム毎に以上の処理を行い、検出した各領域のうち最大の領域を被写体として扱う。

さらに、被写体を囲む矩形を考える。被写体を構成する画素のうち、 x 座標が最小、最大の画素の x 座標をそれぞれ x_{\min} , x_{\max} , y 座標が最小、最大の画素の y 座標をそれぞれ y_{\min} , y_{\max} とすると、矩形の左上、右上、左下、右下の座標はそれぞれ (x_{\min}, y_{\min}) , (x_{\max}, y_{\min}) , (x_{\min}, y_{\max}) , (x_{\max}, y_{\max}) となる。被写体と矩形を図 3.10 に示す。

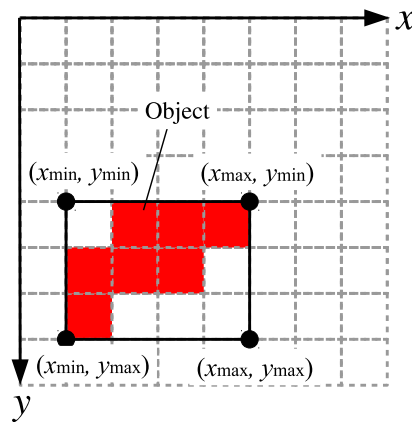


図 3.10: 被写体と矩形

図 3.10 の矩形の重心 (x_g, y_g) は式 (3.4) で表す。

$$(x_g, y_g) = \left(\frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}, \frac{y_{\min} + y_{\max}}{2} \right) \quad (3.4)$$

以下では、 (x_g, y_g) を被写体の重心として扱う。

3.3 カメラ雲台の制御

本節では、まずカメラ雲台による主被写体の追尾に必要な制御理論について述べる。次に、カメラ雲台に取り付けるモータを制御する方法について述べる。

3.3.1 ビジュアルサーボ

提案システムのように、カメラから得た情報(視覚情報)を利用する制御系をビジュアルサーボと呼ぶ。ビジュアルサーボは大きく分けて位置ベースと特徴ベースの二種類が存在する。位置ベースは追尾対象の三次元位置を計測する必要があるが、特徴ベースは二次元画像中の特徴量を元に制御を行う。提案システムでは被写体の三次元位置を計測せず、二次元画像中の情報を元にカメラ雲台を動かすため、以下では特徴ベースのビジュアルサーボを考える。

画像 m から画像内での被写体の現在位置を表す特徴量 x_g を計算し、 x_g が目標の位置である x_g^* に近づくように制御可能な量 C を調整すると考える。カメラの内部パラメータなどの事前情報をまとめて α と表記すると、制御偏差 $e(t)$ は式 (3.5) で表される [22].

$$e(t) = x_g(m(t), C(t), \alpha) - x_g^* \quad (3.5)$$

ビジュアルサーボは、 $e(t)$ の最小化問題である [23].

提案システムで取り扱う座標系は正規化画像座標系とカメラ座標系である。提案システムで取り扱う座標系を図 3.11 に示す。

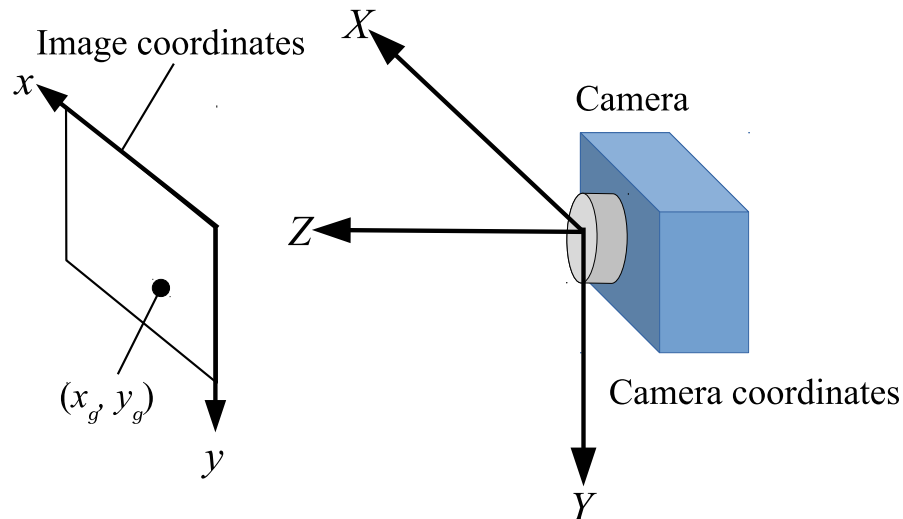


図 3.11: 提案システムで取り扱う座標系

カメラの内部パラメータを考慮する場合，正規化画像座標を表す (x, y) と撮像された画像座標を表す (u, v) 間の座標変換を表す式 (3.6) を利用する必要がある．ただし f はカメラの焦点距離， u 軸と v 軸のなす角度を ϕ ， (u_0, v_0) は画像面をカメラの光軸が横切る点である [24]．

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fk_u & fk_v \cot \phi & u_0 \\ 0 & fk_v \csc \phi & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

以下では撮像画像上の座標は，式 (3.6) により正規化画像座標に変換済みとして特徴点を扱う．

カメラ雲台の位置・姿勢を θ とする．提案システムを用いた撮影の際，画像座標系で被写体が静止している場合は， \mathbf{x}_g は式 (3.7) のように θ の関数 $\mathbf{x}_g(\theta)$ で表すことができる．

$$\mathbf{x}_g = \mathbf{x}_g(\theta) \quad (3.7)$$

式 (3.7) を時間微分すると，式 (3.8) が得られる．

$$\dot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{J}(\theta)\dot{\theta} \quad (3.8)$$

ただし， $\dot{\theta}$ は θ の時間微分であり，カメラ雲台の位置・姿勢に対する画像座標系での被写体の位置の変化の割合を表す画像ヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ を式 (3.9) で定義する．

$$\mathbf{J}(\theta) = \frac{\partial \mathbf{x}_g}{\partial \theta} \quad (3.9)$$

被写体を目標の位置に近づけるためには，式 (3.5) において偏差 $e(t)$ が減少するように θ を調整する必要がある．式 (3.8) において， $\mathbf{J}(\theta)$ の逆行列 $\mathbf{J}^{-1}(\theta)$ が存在するならば，式 (3.10) が得られる [25]．

$$\dot{\theta} = \mathbf{J}^{-1}(\theta)\dot{\mathbf{x}}_g \quad (3.10)$$

したがって，ゲイン λ を設定し， \mathbf{x}_g の変化量を元にして式 (3.11) のように θ を変化させて \mathbf{x}_g を画像座標系における目標の位置 \mathbf{x}_g^* に近づけることが可能となる．

$$\dot{\theta} = -\lambda \mathbf{J}^{-1}(\theta)\dot{\mathbf{x}}_g \quad (\lambda > 0) \quad (3.11)$$

以下では，提案システムにおいて θ を一意に決定できるかどうかを確認する．特徴量として，画像平面上における 3.2 節で求めた重心座標 (x_g, y_g) を用いる． $\mathbf{x}_g = (x_g \ y_g)^T$ とする．ただし， $(x_g \ y_g)^T$ は $(x_g \ y_g)$ の転置行列である．カメラ座標系での特徴点の座標を $\mathbf{X}_g = (X_g \ Y_g \ Z_g)^T$ とすると，画像平面上での特徴点の座標 \mathbf{x}_g は式 (3.12) より式 (3.13) のように表される [24]．

$$k \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \\ 1 \end{pmatrix} \quad (k \neq 0) \quad (3.12)$$

$$\mathbf{x}_g = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{X_g}{Z_g} \\ \frac{Y_g}{Z_g} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

画像平面上における特徴点速度 $\dot{\mathbf{x}}_g = (\dot{x}_g \ \dot{y}_g)^\top$ は

$$\dot{x}_g = \frac{d}{dt} \left(\frac{X_g}{Z_g} \right) = \frac{\dot{X}_g Z_g - X_g \dot{Z}_g}{Z_g^2} \quad (3.14)$$

$$\dot{y}_g = \frac{d}{dt} \left(\frac{Y_g}{Z_g} \right) = \frac{\dot{Y}_g Z_g - Y_g \dot{Z}_g}{Z_g^2} \quad (3.15)$$

となる [26].

提案システムを用いた撮影のように、物体が静止していて、カメラが移動している場合を考える。カメラの並進速度を $\mathbf{W}_{\text{cam}} = (W_x \ W_y \ W_z)^\top$ ，角速度を $\mathbf{w}_{\text{cam}} = (w_x \ w_y \ w_z)^\top$ とすると、カメラ座標系における特徴点速度 $\dot{\mathbf{X}}_g$ は

$$\dot{\mathbf{X}}_g = -\mathbf{W}_{\text{cam}} - \mathbf{w}_{\text{cam}} \times \mathbf{X}_g \quad (3.16)$$

となる [27]. \mathbf{W}_{cam} , \mathbf{w}_{cam} は式 (3.5) の制御可能な量 \mathbf{C} に相当する。式 (3.16) より

$$\dot{X}_g = -W_x - w_y Z_g + w_z Y_g \quad (3.17)$$

$$\dot{Y}_g = -W_y - w_z X_g + w_x Z_g \quad (3.18)$$

$$\dot{Z}_g = -W_z - w_x Y_g + w_y X_g \quad (3.19)$$

が得られる。式 (3.17), (3.18), (3.19) を式 (3.14), (3.15) へ代入すると、カメラの運動による特徴点の画像上での移動速度を表す式 (3.20) が得られる [26] [28].

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_g &= \begin{pmatrix} -\frac{W_x}{Z_g} + \frac{x_g W_z}{Z_g} + x_g y_g w_x - (1 + x_g^2) w_y + y_g w_z \\ -\frac{W_y}{Z_g} + \frac{y_g W_z}{Z_g} + (1 + y_g^2) w_x - x_g y_g w_y - x_g w_z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -\frac{1}{Z_g} & 0 & \frac{x_g}{Z_g} & x_g y_g & -(1 + x_g^2) & y_g \\ 0 & -\frac{1}{Z_g} & \frac{y_g}{Z_g} & 1 + y_g^2 & -x_g y_g & -x_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.20)$$

\mathbf{J} , \mathbf{W} をそれぞれ式 (3.21), (3.22) で定義する.

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{Z_g} & 0 & \frac{x_g}{Z_g} & x_g y_g & -(1+x_g^2) & y_g \\ 0 & -\frac{1}{Z_g} & \frac{y_g}{Z_g} & 1+y_g^2 & -x_g y_g & -x_g \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_{\text{cam}} \\ \mathbf{w}_{\text{cam}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

\mathbf{J} , \mathbf{W} を用いると, 式 (3.20) は式 (3.23) のように表される [26] [29].

$$\dot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{J}\mathbf{W} \quad (3.23)$$

式 (3.23) は現代制御論の状態方程式に相当する.

提案システムのカメラ雲台は X 軸の周りのパン方向と Y 軸の周りのチルト方向に回転するモータを装着したパンチルト雲台である. カメラ座標系中で X 軸の周りを回転する角を θ_x , Y 軸の周りを回転する角を θ_y とすると, $W_x = W_y = W_z = 0$, $w_x = \dot{\theta}_x$, $w_y = \dot{\theta}_y$ すなわち

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \end{pmatrix} = \mathbf{J}_a \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.24)$$

とする. ただし \mathbf{J}_a , $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ をそれぞれ式 (3.25), (3.26) で定義する.

$$\mathbf{J}_a = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

$\mathbf{J}_\theta = \mathbf{J}\mathbf{J}_a$ とすると, 式 (3.20) は式 (3.27) のように表される.

$$\dot{\mathbf{x}}_g = \begin{pmatrix} x_g y_g & -(1+x_g^2) \\ 1+y_g^2 & -x_g y_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \end{pmatrix} = \mathbf{J}_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.27)$$

\mathbf{J}_θ の行列式 $\det(\mathbf{J}_\theta)$ を調べると, x_g, y_g は共に実数であるので, 式 (3.28) が成り立つ.

$$\det(\mathbf{J}_\theta) = 1 + x_g^2 + y_g^2 > 0 \quad (3.28)$$

\mathbf{J}_θ の逆行列 \mathbf{J}_θ^{-1} が常に存在するため可制御性が保たれており, 回転角の速度 $(\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y)$ は一意に決定される. 式 (3.5) を以上の場合に書き換えると, 式 (3.29) が得られる.

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_g(\mathbf{m}(t), \dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y) - \mathbf{x}_g^* \quad (3.29)$$

したがって, 式 (3.11), (3.27) からモータの角度を式 (3.30) のように変化させることで, \mathbf{x}_g を目標の位置 \mathbf{x}_g^* に近づけることが可能となる [26].

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = -\lambda \mathbf{J}_\theta^{-1} \dot{\mathbf{x}}_g \quad (\lambda > 0) \quad (3.30)$$

3.3.2 サーボモータの制御

3.3.1 項で述べた x 軸および y 軸の周りの回転には, サーボモータを用いる. サーボモータは回転軸の角度や回転速度を制御することができるモータである. サーボモータの制御には, 被写体の位置と目標構図の位置に応じてマイクロコントローラから送信する PWM 信号を用いる. PWM 信号とは, デューティ比を変えることができる信号である. 提案システムにおける, PWM 信号によるサーボモータ制御のブロック線図を図 3.12 に示す.

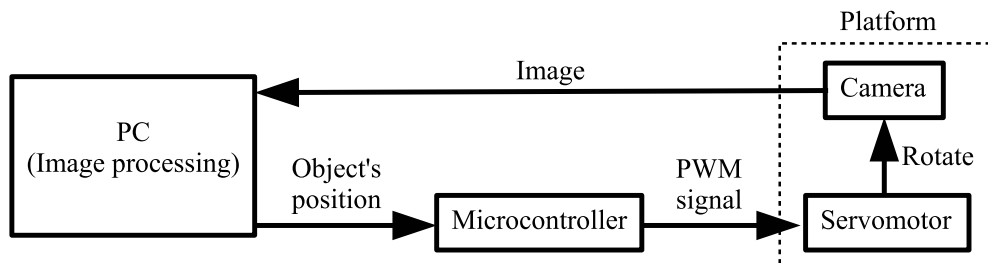


図 3.12: PWM 信号によるサーボモータ制御

PWM 信号の例を図 3.13 に示す.

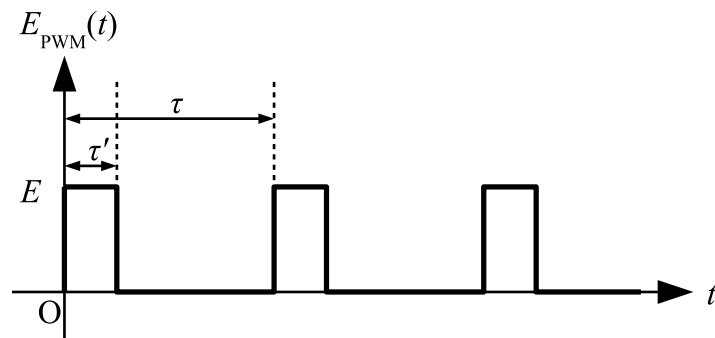


図 3.13: PWM 信号の例

PWM 信号 $E_{\text{PWM}}(t)$ とサーボモータ軸の角度 η の関係は以下の式 (3.31) で表される.

$$E_{\text{PWM}}(t) = \begin{cases} E & (n\tau < t < n\tau + \tau') \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.31)$$

ただし, τ は PWM 信号の周期であり, τ' は式 (3.32) に基づき角度 η より決定される.

$$\tau' = \tau_{\min} + \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}}(\eta - \eta_{\min}) \quad (3.32)$$

η_{\min} , η_{\max} はそれぞれサーボモータの回転範囲の最小角と最大角, τ_{\min} , τ_{\max} はそれぞれ $\eta = \eta_{\min}$, η_{\max} での一周期内で $E_{\text{PWM}}(t) = E$ となる時間であり, あらかじめ全て計測しておく必要がある.

3.4 ユーザへの情報提示

本節では, まず副被写体を目標の位置に入れるためにユーザへ提示するカメラ移動の指示の提示について述べる. 次に, 全被写体の位置に基づいた目標構図達成の可否の判断について述べる.

3.4.1 カメラ移動指示の提示

提案システムでは, 3.3 節に示した通り, 主被写体はカメラ雲台の追尾により目標の位置に配置する. 副被写体は, 画像内に副被写体を配置する目標位置を提示し, その提示をもとにユーザがカメラを動かすことで目標の位置に配置する. 3.2.1 項で述べた, 色に基づく物体認識及びラベリングを行うことで求めた画素の集合を被写体と判断し, 矩形を表示させる. 副被写体の目標の位置を $Q(x_Q, y_Q)$ とする. 目標とする位置に副被写体に対して表示させた矩形と同じ大きさの矩形を同時に表示させると, 矩形の左上, 右上, 左下, 右下の座標はそれぞれ

$$\left(x_Q - \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, y_Q - \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \right), \left(x_Q + \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, y_Q - \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \right), \\ \left(x_Q - \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, y_Q + \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \right), \left(x_Q + \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, y_Q + \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} \right)$$

となる. 目標の位置に矩形を表示した画像を図 3.14 に示す. ユーザは二つの矩形が一致するようにカメラを動かすことで, 副被写体を目標の位置に入れることが可能となる.

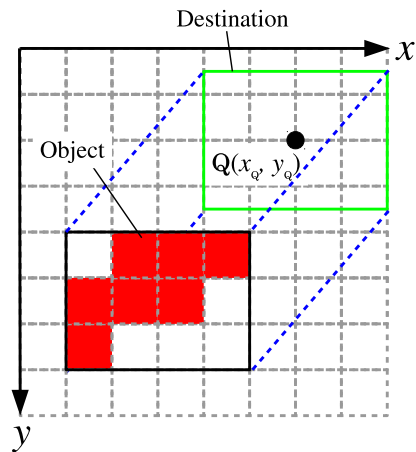


図 3.14: 目標の位置に矩形を表示した画像

3.4.2 構図達成の可否

画面上での主被写体・副被写体の座標と目標位置の座標との差が許容差以内であれば、目標構図に必要な条件を満たしているものとみなし、主被写体・副被写体それぞれについてその旨をカメラ映像中に重畳する。図 3.15 に、本システムの画面構成を示す。

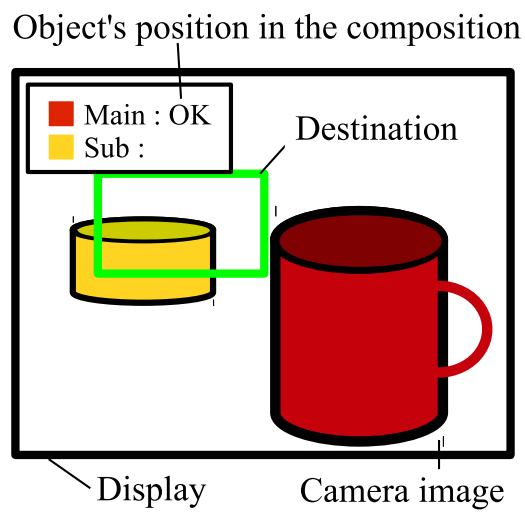


図 3.15: 本システムの画面構成

ユーザは、図 3.15 中の提示を確認してからシャッターを切って撮影を行う。

第4章 システムの実装と評価

本章では、まず、提案したフレーミング支援システムを実装した結果について述べる。次に、提案システムが主被写体を正しく追尾することを確認する。最後に、フレーミング支援システムの評価実験の方法と結果について述べ、実験結果を考察する。

4.1 フレーミング支援システムの実装

実装したフレーミング支援システムを図 4.1 に示す。

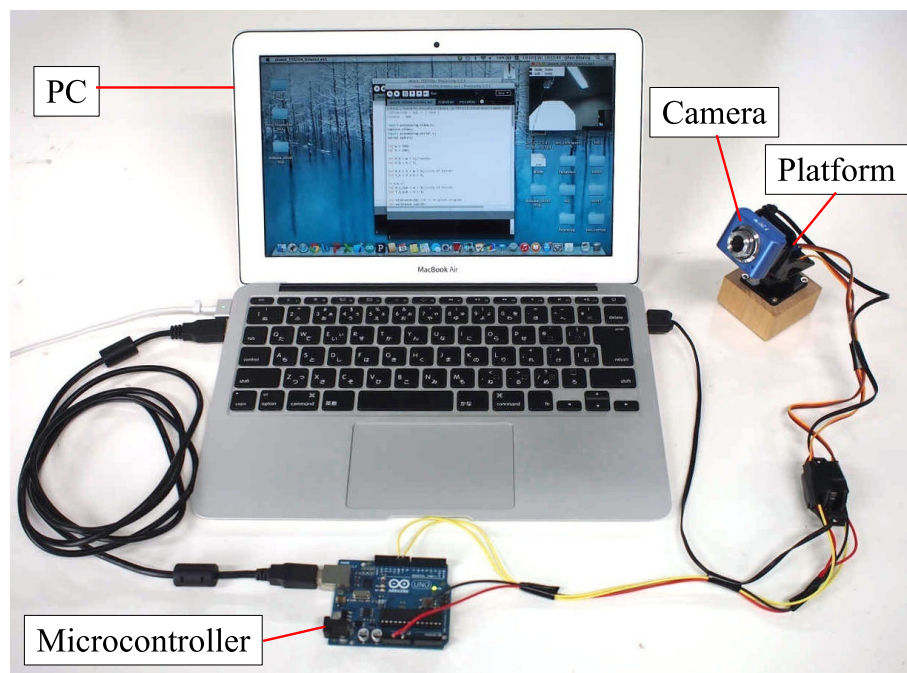


図 4.1: 実装したフレーミング支援システム

提案システムに用いたカメラとカメラ雲台，サーボモータをそれぞれ図 4.2，4.3 に示す．

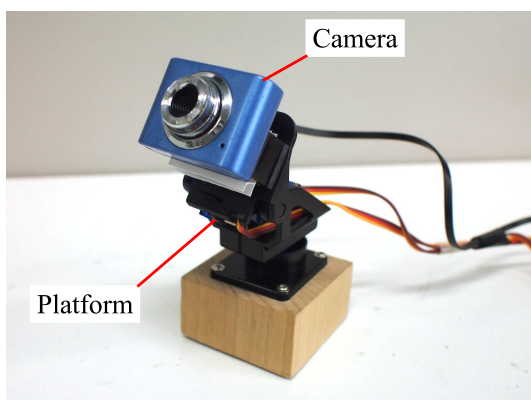


図 4.2: カメラとカメラ雲台

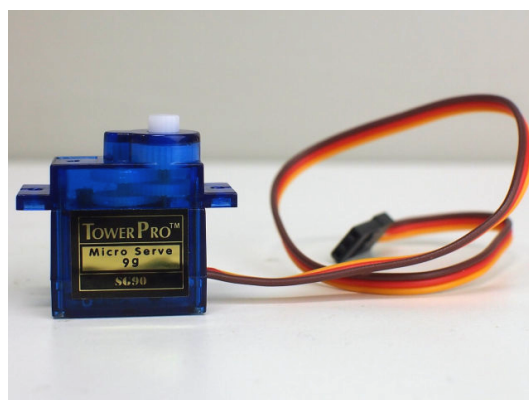


図 4.3: サーボモータ

サーボモータを取り付けたカメラ雲台を図 4.4 に示す．

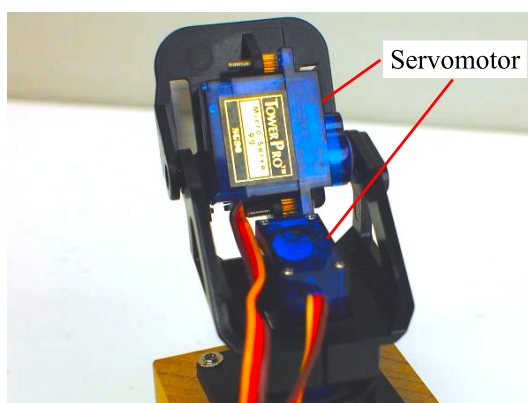


図 4.4: サーボモータを取り付けたカメラ雲台

提案システムに用いたカメラの仕様を表 4.1 に示す．

表 4.1: カメラの仕様 [30]

項目	性能
フレームレート	30 fps
解像度	640 pixel × 480 pixel

提案システムに用いたサーボモータの仕様を表 4.2 に示す.

表 4.2: サーボモータの仕様 [31]

項目	値
重量	9.0×10^{-3} kg
寸法	22.2 mm × 11.8 mm × 31.0 mm
最大トルク	0.177 N · m

サーボモータの制御に必要な式 (3.31), (3.32) 中のパラメータを表 4.3 に示す.

表 4.3: サーボモータの制御に必要なパラメータ

項目	値
τ	20 ms
τ_{\min}	600 μ s
τ_{\max}	2350 μ s
η_{\min}	0 deg
η_{\max}	180 deg

主被写体を追尾する際, フレーム間でカメラが移動せず, システム内の処理による遅延が生じない場合はサーボモータの角度を式 (3.30) で表されるようにゲイン λ を設定して変化させることが望ましい. しかし, 提案システムを用いる状況ではフレーム間でユーザがカメラを移動させることと, システム中の画像処理などにより生じる遅延によりサーボモータの角度が変化した後主被写体の位置が想定した位置に一致するとは限らないため, サーボモータの角速度は一定の微小量に設定することが望ましい. したがって, 式 (3.30) 中のゲイン λ を定めずに, 追尾時のフレーム毎の角度の変化量 $\dot{\theta} = (\dot{\theta}_x \ \dot{\theta}_y)^T$ を式 (4.1), (4.2) で定めて θ を変化させた.

$$\dot{\theta}_x = \pm 1 \text{ deg} \quad (4.1)$$

$$\dot{\theta}_y = \pm 1 \text{ deg} \quad (4.2)$$

提案システムに用いた PC の仕様を表 4.4 に示す。

表 4.4: PC の仕様

項目	性能
OS	OS X 10.9.4
CPU	デュアルコア Intel Core i5-4250U 1.3-2.6 GHz
メモリ	4.0 GB
グラフィクス	Intel HD Graphics 5000

また、マイクロコントローラには Arduino UNO を用いた。

4.2 追尾機能の確認

提案システムにより被写体の追尾を正しく行えるかどうかを検証する実験を行った。実験に用いた被写体を図 4.5 に示す。



図 4.5: 被写体

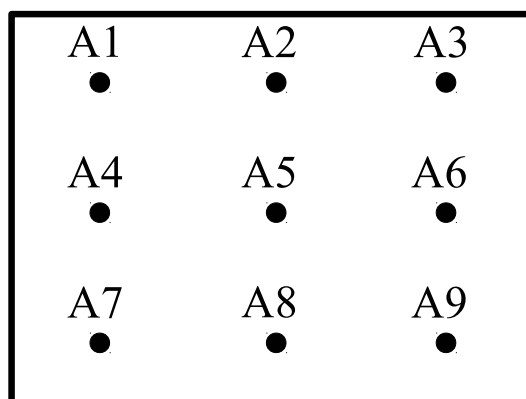


図 4.6: 被写体の初期位置

図 4.6 に示すように、カメラ映像中の点 A1~A9 のうち中央の A5 を除く八点のいずれかに被写体を配置してから、追尾により各領域内の被写体を画面の中心 A5 に配置することが出来るかを検証した。提案システムによる被写体の追尾を行った際の、画像座標系での被写体の軌道を図 4.7 に示す。

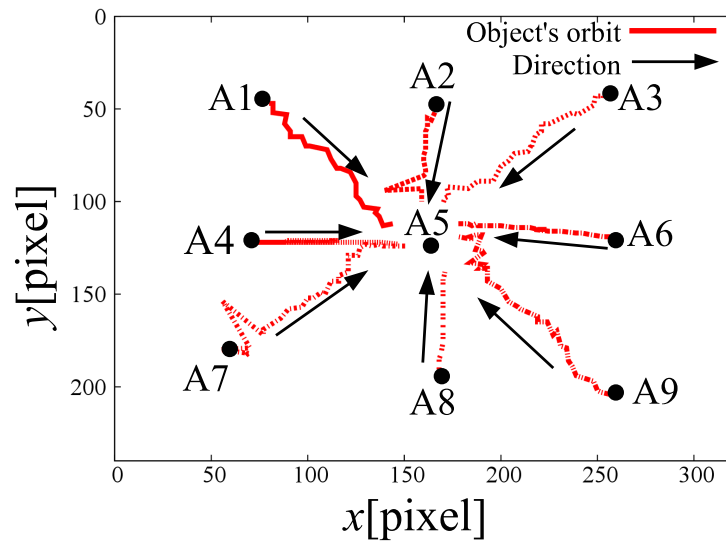


図 4.7: 画像座標系での被写体の軌道

図 4.7 より，提案システムによる追尾は正しく行われており，被写体の初期位置によらず最短経路である直線に近い経路での追尾が行われていることが示された．A1～A4, A6～A9 の各点に位置する被写体を追尾した際の，画像平面上における被写体の重心の速度を表 4.5 に示す．

表 4.5: 追尾速度

被写体の初期位置	速度 [pixel/s]
A1	61.1
A2	58.9
A3	69.9
A4	47.9
A6	54.7
A7	54.7
A8	38.9
A9	57.8
平均	56.8

4.3 評価実験

本研究で構築したシステムを用いて、評価実験を行った。20代の男性6名を被験者とした。評価実験に使用した主被写体、副被写体を図4.8, 4.9に示す。



図 4.8: 主被写体



図 4.9: 副被写体

評価実験では、最も有名な構図である三分割法を目標構図に設定した。三分割法は、画像の縦と横を三分割する四直線(補助線)およびその交点に被写体を配置する手法であり、多くの被写体に対して均整のとれた配置を容易に行うことができることで知られている [32]。画像内に補助線を表示させた場合の、三分割法を満たす写真例を図4.10, 4.11に、三分割法を満たさない写真例を図4.12, 4.13に示す。

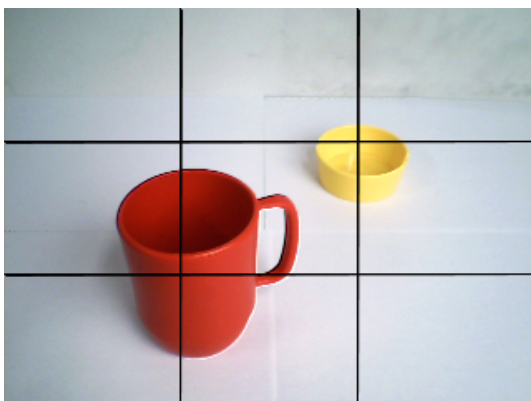


図 4.10: 三分割構図を満たす写真例 1

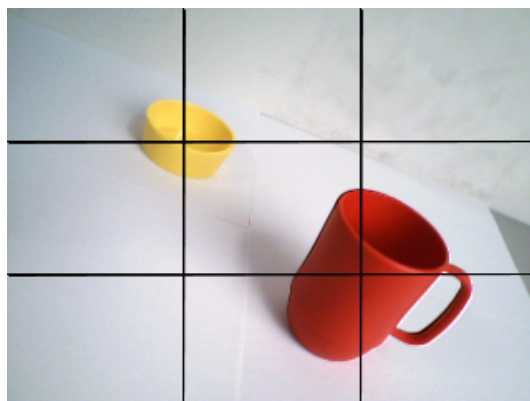


図 4.11: 三分割法を満たす写真例 2

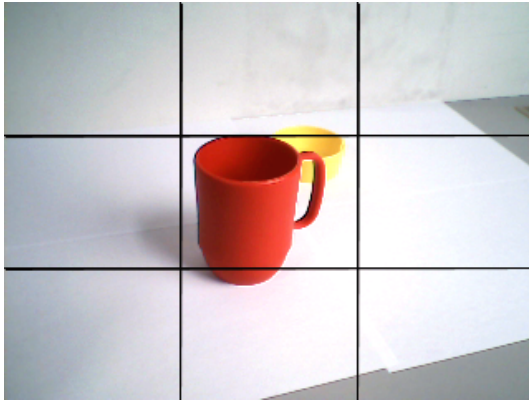


図 4.12: 三分割法を満たさない写真例 1

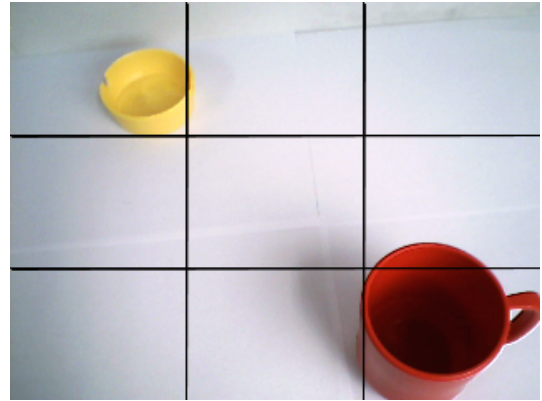


図 4.13: 三分割法を満たさない写真例 2

目標構図は二種類用意し，図 4.10，4.11 と同様に主被写体は三分割法構図の補助線の下側の交点に配置し，副被写体は画像の中心で主被写体と点対称に配置するような構図に設定した。

表 4.6 に示すように，提案システムの他に比較対象として提案システムと同じ装置から構成されるシステム 1，システム 2 を用意した。

表 4.6: 評価実験に用いたシステムの仕様

	補助線	主被写体の追尾	カメラ移動指示
システム 1	なし	なし	なし
システム 2	あり	なし	なし
提案システム	なし	あり	あり

評価実験では，初めに被験者に対して表 4.6 に示した全システムの説明を行い，各システムを用いた撮影の練習を行ってもらった。次に，指示した構図を達成するように主被写体と副被写体のフレーミングを調整し，被験者の判断でキーボードを押して撮影を行うという試行を行ってもらい，主被写体と副被写体の重心の座標および撮影に要した時間を記録した。

各目標構図に対して実際の被写体の配置は二種類を用意したため、被験者には計四種類での撮影を行ってもらった。主被写体の位置を固定し、副被写体の位置を主被写体との距離が近い位置、主被写体との距離が遠い位置の二種類とした。評価実験における主被写体と副被写体の位置、カメラの初期位置を図 4.14 に示す。各配置に対して、表 4.6 に示した三システムでの撮影を行ったため、一人あたりの撮影回数は計十二回となった。また、被写体の配置および撮影に用いるシステムの順番は無作為に指定した。

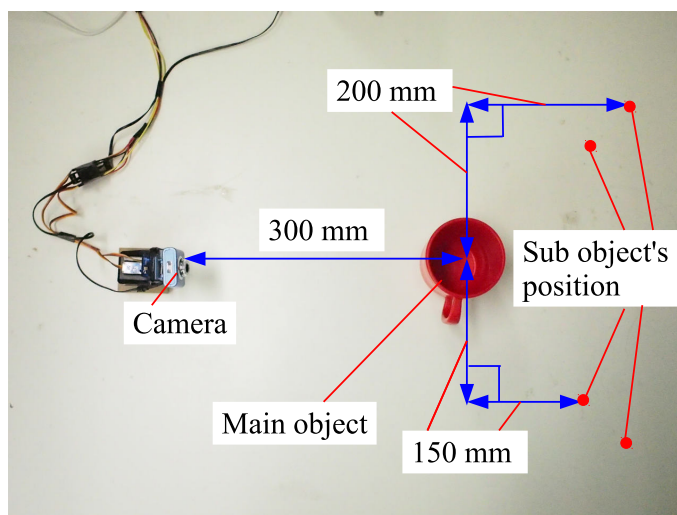


図 4.14: 被写体とカメラの位置

提案システムを用いて撮影を行っている様子を図 4.15 に示す。



図 4.15: 実験風景

4.4 評価実験の結果

主被写体・副被写体の重心と三分割法交点との差を元に、撮影結果が三分割法を達成しているかどうかを判断した。ただし、主被写体と副被写体の重心をそれぞれ点 $P'(x'_P, y'_P)$, $Q'(x'_Q, y'_Q)$, 目標構図中の主被写体と副被写体の位置を点 $P(x_P, y_P)$, $Q(x_Q, y_Q)$, 閾値を ε' と定めるとき, $|x_P - x'_P| \leq \varepsilon'$ かつ $|y_P - y'_P| \leq \varepsilon'$ かつ $|x_Q - x'_Q| \leq \varepsilon'$ かつ $|y_Q - y'_Q| \leq \varepsilon'$ を満たす撮影結果を, 三分割法での撮影に成功していると判断した。本実験で取得したカメラ映像の解像度は $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ であるため, 対角線の長さ 400 pixel の 5% の長さである $\varepsilon' = 20 \text{ pixel}$ と設定したときの撮影成功回数を表 4.7 に示す。

表 4.7: 撮影成功回数

被験者	システム 1	システム 2	提案システム
S1	0	0	3
S2	0	2	4
S3	0	0	1
S4	0	3	2
S5	1	2	4
S6	3	4	4
平均	0.7	1.8	3.0

判断基準を $\varepsilon' = 25, 30$ のように変更しても表 4.7 同様, 評価実験に用いた全システムの中では提案システムでの撮影成功回数が最も多かった。

撮影結果における, 主被写体・副被写体の重心と三分割法交点との距離 $|PP'|$ と $|QQ'|$ および撮影に要した時間 Δt を求め, 被験者毎および被験者全体での平均値を算出した。システム 1, システム 2, 提案システムによる撮影結果をそれぞれ表 4.8, 4.9, 4.10 に示す。

表 4.8: システム 1 による撮影結果

被験者	$ PP' $ [pixel]	$ QQ' $ [pixel]	Δt [s]
S1	58.1	43.3	8.7
S2	56.0	31.6	8.2
S3	40.3	12.9	8.0
S4	71.2	36.7	10.2
S5	34.9	47.7	14.1
S6	18.8	11.8	24.5
平均	43.2	30.7	12.3
標準偏差	± 22.4	± 27.6	± 8.7

表 4.9: システム 2 による撮影結果

被験者	$ PP' $ [pixel]	$ QQ' $ [pixel]	Δt [s]
S1	33.4	10.2	10.3
S2	25.1	3.1	10.2
S3	26.0	3.3	8.6
S4	18.7	6.6	13.9
S5	23.8	6.5	10.3
S6	12.1	2.1	13.8
平均	23.2	5.3	11.2
標準偏差	± 10.1	± 4.2	± 3.7

表 4.10: 提案システムによる撮影結果

被験者	$ PP' $ [pixel]	$ QQ' $ [pixel]	Δt [s]
S1	27.1	11.8	17.5
S2	20.8	19.0	29.3
S3	28.1	17.2	5.8
S4	13.2	34.9	32.5
S5	17.2	14.7	14.1
S6	17.7	17.0	27.0
平均	20.7	19.1	21.0
標準偏差	± 8.6	± 9.8	± 16.2

システム毎の被験者全体の $|PP'|$ と $|QQ'|$ の平均値, Δt の平均値をそれぞれ図 4.16, 4.17に示す.

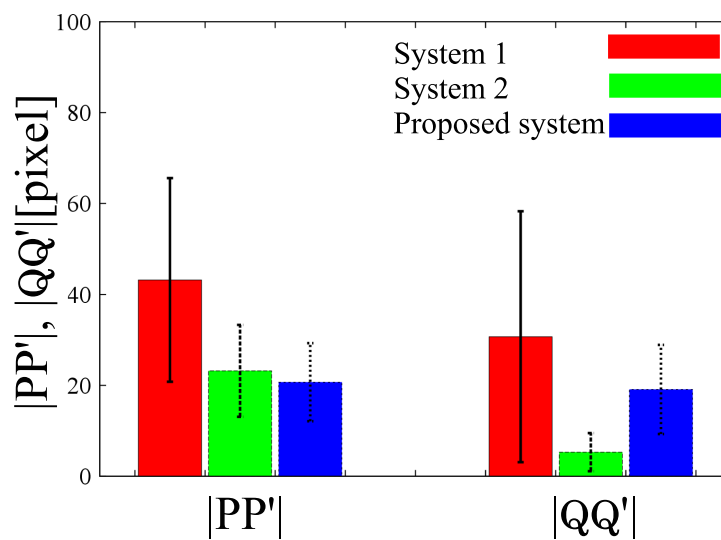


図 4.16: $|PP'|$ と $|QQ'|$ の平均値

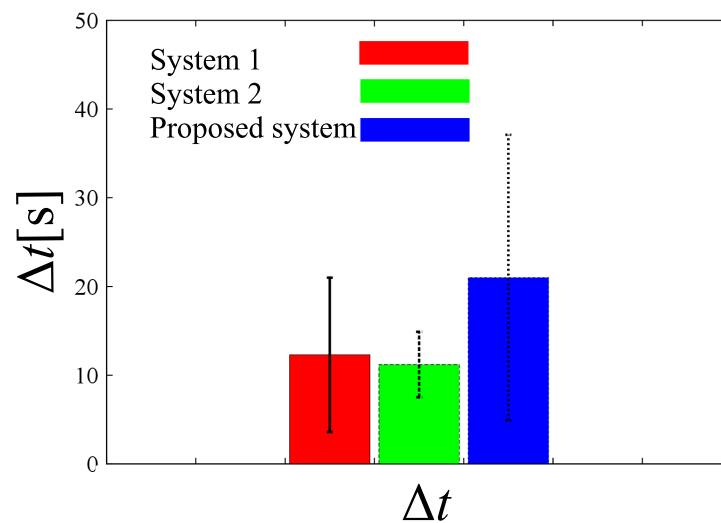


図 4.17: Δt の平均値

4.5 考察

提案システムを用いた撮影結果は、システム1とシステム2を用いた撮影結果よりも目標構図を満たす写真を撮影できた回数が多かった。

主被写体の位置は、システム1やシステム2を用いた撮影に比べ、提案システムで撮影した場合の方が目標の位置に近づけて配置できたことから、主被写体に対する追尾は有効であったと考えられる。副被写体の位置は、通常のカメラを用いた撮影に比べ、提案システムを用いた撮影の方が目標の位置に近づけて配置することができたが、提案システムを用いた撮影よりもシステム2を用いた撮影の方が副被写体の位置を目標の位置に近づけて配置することができた。

また、提案システムを用いた撮影では、他のシステムを用いた場合と比べて撮影に長い時間を要した。

以上の結果が生じた理由について考察するために、評価実験の被験者一名に対し、再度提案システムを用いた撮影を一度行ってもらい、撮影を行っている際の被写体の重心およびサーボモータの角度を記録した。この追加実験から得られた撮影中の (x'_P, y'_P) , (x'_Q, y'_Q) , (θ_x, θ_y) の変化をそれぞれ図 4.18, 4.19, 4.20 に示す。

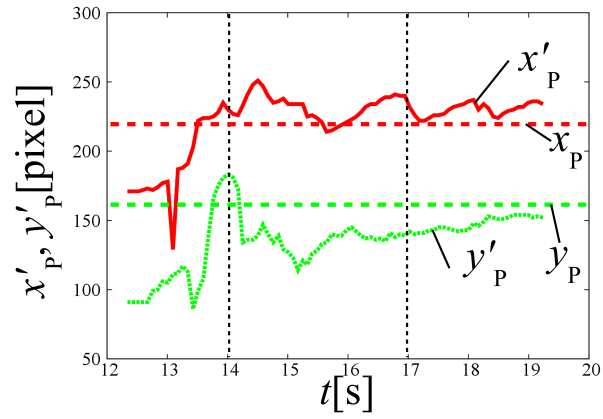


図 4.18: 撮影中の (x'_P, y'_P) の変化

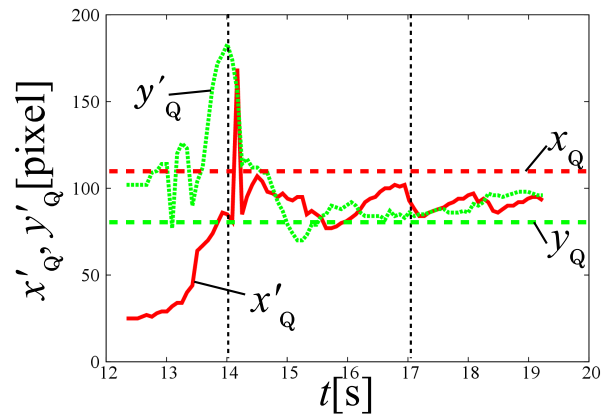


図 4.19: 撮影中の (x'_Q, y'_Q) の変化

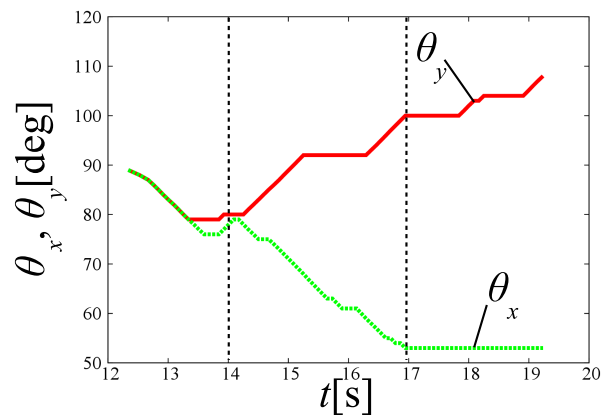


図 4.20: 撮影中の (θ_x, θ_y) の変化

$t = 14.0 \text{ s}$ から $t = 17.0 \text{ s}$ の間では (θ_x, θ_y) の変化が大きくなっており、カメラ雲台による主被写体に対する追尾が行われていることが読み取れるが、同時に (x'_Q, y'_Q) も大きく変化していることがわかる。したがって、カメラ雲台により主被写体の追尾を行っている際は副被写体が目標の位置から大きく離れてしまうため、提案システムを用いた撮影は長い時間を要したと考えられる。被験者からは、提案システムでの撮影では、カメラの動きに対して静止した副被写体の矩形が相対的に動くことに慣れなかったという意見があり、提案システムに不慣れであったことも長い時間を要した原因と考えられる。

また、 $t = 14.0 \text{ s}$, 17.0 s などから確認できるように、 (x'_Q, y'_Q) が変化している際は (x'_P, y'_P) も大きな変化が見られ、カメラ雲台による主被写体の追尾が維持されたまま、同時にユーザが副被写体を目標の位置に配置することが困難であったことが伺える。したがって、提案システムを用いた撮影では副被写体の位置がシステム2を用いた撮影結果よりも目標の位置よりも離れてしまうという結果になったと考えられる。

被験者からは、提案システムのようにカメラとディスプレイが離れている状態での撮影に慣れなかったという意見もあった。提案システムをタブレットやスマートフォンなどの携帯端末に実装することで、カメラとディスプレイの位置が近い状態で撮影を行える場合、より有用性を発揮できる可能性がある。

第5章 おわりに

本研究では、フレーミングを支援するシステムを提案した。提案システムでは、カメラ雲台による主被写体の追尾および副被写体の位置に応じたカメラ移動指示の重畳により、トリミングや三次元情報の計測を行わずにフレーミングを支援するシステムを構築した。

提案システムの有用性を検証するために被験者実験を行った。被験者は主被写体と副被写体を与えられ、指示された構図を達成するように提案システムを用いて写真撮影を行うというタスクを試行した。

被験者実験の結果、提案システムを用いた撮影では、他のシステムを用いた場合と比べて撮影に長い時間を要したが、目標構図を満たす写真を撮影できた回数は多かった。また、提案システムを用いた撮影では、副被写体は補助線を表示するシステムと比べて目標の位置への配置の精度は低かったが、主被写体は他のシステムと比べて高い精度で目標の位置に配置して撮影を行えることが示された。

提案システムのようにフレーミングを行う過程の一部を自動化することで、ユーザのフレーミング技術の向上につながることを期待される。

謝 辞

本研究は、大阪大学基礎工学部で行ったものである。

本年度から大城研究室に配属させて頂き、昨年までの講義中心の学生生活からは一変した研究室での生活が始まり、毎日が新しく学ぶことの連続でした。本研究をはじめとして苦勞が多い一年間ではありましたが、日々お世話になっている方々のご協力のお陰で充実した学生生活を送ることができました。

本研究において、研究環境を提供して頂き、研究テーマや方向性に関して多大なるご指導をして頂くとともに、本論文の添削指導をして頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科 大城理 教授に厚くお礼申し上げます。ゼミに加えて大学院の講義や研究会、工場見学など知見を広げる多くの機会を提供して頂きました。重ねて感謝申し上げます。一年間、研究テーマの決め方から制御理論や画像処理など多岐にわたり何度も丁寧にご指導を頂きました。大阪大学大学院基礎工学研究科 井村誠孝 准教授に厚くお礼申し上げます。ご多忙の中でも、何もわからない私に親身になってお時間を割いて頂きました。重ねて感謝申し上げます。プログラミングや電子回路を基礎から教えて頂き、また本研究に必要な物品の購入依頼に快く応じてくださった、大阪大学大学院基礎工学研究科 吉元俊輔 助教に厚くお礼申し上げます。前期には実験レポートの執筆をご指導頂き、本研究に関する相談にも応じて頂きました。重ねて感謝申し上げます。

本研究の進捗を気にかけてくださり、また本論文の執筆において親切にご指導をしていただきました、スーパーバイザーの古澤大樹氏に深く感謝致します。プログラミングや本研究の方針に関する相談に応じてくださった、井手口裕太氏に深く感謝致します。古澤大樹氏と井手口裕太氏には、本研究において大変重要なマイクロコントローラとモータの扱い方に関してもご指導を頂きました。研究室生活で大変お世話になった大城研究室の先輩方である、三宅正夫氏、加藤雄樹氏、籾岡亮氏、團原佑壮氏、長坂信吾氏、中藤寛己氏、豆野裕信氏、和田章宏氏、加藤高浩氏、上西健太氏、川口純輝氏、Rodrigues MATSUGUMA Victor 氏にお礼申し上げます。先輩方には、私が本研究に限らず輪講などで悩んでいるときも快く相談に乗って頂き、何度も助言や励ましの言葉を頂きました。また、毎日朝早くから夜遅くまで互いに助言を交わし、共に切磋琢磨しながら研究室生活を過ごしてきた同期の加藤弘樹氏、桑谷達之氏、武村浩志氏に感謝します。

最後に、私が実家を離れて大阪大学へ入学することを心から喜んでくれて、いつも私を心配するとともに応援してくれる家族に感謝します。

本研究における被験者実験は、基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認(26-11)を得て行ったものである。

参考文献

- [1] 中川邦昭. カメラ・オブスキュラの時代. 筑摩書房, 東京都, 2001.
- [2] 桑嶋幹. 図解入門 よくわかる最新レンズの基本と仕組み. 秀和システム, 東京都, 2013.
- [3] デジタルカメラマガジン編集部. 写真がうまくなる デジタル一眼レフ 構図 プロの見本帳. インプレスジャパン, 東京都, 2012.
- [4] PowerBEANS. 黄金カメラ-iPhone アプリ-GoldCamera. <http://goldcamera.net/ja/howtouse.php>. 2014年10月4日閲覧.
- [5] 大西正輝, 泉正夫, 福永邦雄. デジタルカメラワークを用いた自動映像生成. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000) 講演論文集, Vol. 1, pp. 331–336, 2000.
- [6] 濱田隆平, 堀磨伊也, 吉村宏紀, 岩井儀雄. フレーミングサポートシステムのための構図特徴を用いた写真の評価. 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 12, No. 3, pp. 137–140, 2013.
- [7] 濱田隆平, 堀磨伊也, 吉村宏紀. フレーミングサポートシステムのための審美性特徴を用いた写真の評価. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 38, No. 16, pp. 75–78, 2014.
- [8] 福田司, 中内靖, 野口勝則, 松原隆. 自律移動ロボットとタッチパネルを利用した調理作業支援システム (機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集. C 編, Vol. 72, No. 716, pp. 1215–1222, 2006.
- [9] 村上奨, 福田司, 中内靖. ユビキタスセンサと機械学習による調理作業認識システムの構築. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2006, pp. 2P1–E08, 2006.
- [10] 荒川雅裕, 田伏顕也, 冬木正彦. 多工程組み立て作業に対する作業分析の研究: 第1報: 実績収集機能を含む On-Job デジタルマニュアル表示システムと作業時間予測法. 日本経営工学会論文誌, Vol. 58, No. 1, pp. 62–70, 2007.
- [11] 井上航, 小林裕介, 安田光, 市村哲. AR を用いた人物画の描画支援. 情報処理学会 インタラクシオン, 2011.

- [12] 元川洋一, 斎藤英雄. 拡張現実表示技術を用いたギターの演奏支援システム. 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア, Vol. 61, No. 6, pp. 789–796, 2007.
- [13] 田川和義, 田中弘美, 小森優, 来見良誠, 森川茂廣. 一人称視点映像と誘導力提示による腹腔鏡下手術手技のVR訓練システム. *The Japanese Journal for Medical Virtual Reality*, Vol. 10, No. 1, pp. 11–18, 2012.
- [14] 和田章宏. 空間超越型描画支援システム. 大阪大学基礎工学部卒業論文, 2012.
- [15] 堀米辰弥, 伊藤誠, 稲垣敏之. 半自律的操舵を行う衝突回避支援システムの評価(自動車の安全運転支援とヒューマンファクター). 電子情報通信学会技術研究報告. SSS, 安全性, Vol. 110, No. 242, pp. 17–20, 2010.
- [16] 岩田浩康, 亀崎允啓, 菅野重樹. 双腕建機のための操作者支援システムの開発設計. 建設の施工企画, No. 706, pp. 60–66, 2008.
- [17] Bongwon Suh, Haibin Ling, Benjamin B Bederson, and David W Jacobs. Automatic thumbnail cropping and its effectiveness. In *Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 95–104. ACM, 2003.
- [18] Gianluigi Ciocca, Claudio Cusano, Francesca Gasparini, and Raimondo Schettini. Self-adaptive image cropping for small displays. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 53, No. 4, pp. 1622–1627, 2007.
- [19] Masashi Nishiyama, Takahiro Okabe, Yoichi Sato, and Imari Sato. Sensation-based photo cropping. In *Proceedings of the 17th ACM international conference on Multimedia*, pp. 669–672. ACM, 2009.
- [20] 藤原一郎, 浅海賢一. 移動物体を追跡するビジュアルトラッキングシステムの構築. 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, No. 10, 2009.
- [21] デジタル画像処理編集委員会. デジタル画像処理. CG-ARTS 協会, 東京都, 2006.
- [22] 橋本浩一. 視覚と制御. 計測自動制御学会制御部門大会ワークショップ制御部門大会ワークショップテキスト, pp. 37–68, 2001.
- [23] 橋本浩一. ビジュアルサーボ-I: ビジュアルサーボとは. システム/制御/情報, Vol. 53, No. 9, pp. 411–416, 2009.
- [24] 橋本浩一. ビジュアルサーボ-II: コンピュータビジョンの基礎. システム/制御/情報, Vol. 53, No. 11, pp. 476–483, 2009.

- [25] 内山勝, 中村仁彦. ロボットモーション. 岩波書店, 東京都, 2008.
- [26] 橋本浩一. ビジュアルサーボ-V:特徴ベースビジュアルサーボ. システム/制御/情報, Vol. 54, No. 5, pp. 206–213, 2010.
- [27] 窪田高弘. 力学入門. 培風館, 東京都, 2010.
- [28] François Chaumette. Visual servoing. https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/1010470/filename/Visual_Servoing.pdf. 2015年1月7日閲覧.
- [29] François Chaumette and Seth Hutchinson. Visual servoing and visual tracking. *Springer Handbook of Robotics*, pp. 563–583, 2008.
- [30] SeeedStudio. 300k pixel USB 2.0 mini webcam datasheet. <http://www.robotshop.com/media/files/pdf/datasheet-sen06053b.pdf>. 2015年1月29日閲覧.
- [31] Spark n' Go. SG90 datasheet. <http://datasheet.sparkgo.com.br/SG90Servo.pdf>. 2015年1月29日閲覧.
- [32] Cambridge in Colour. Composition: Using the rule of thirds:. <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/rule-of-thirds.htm>. 2015年2月5日閲覧.