

首振りカメラを用いた効率的な3次元形状計測

稗田 洋也 日浦 慎作 井口 征士

大阪大学大学院基礎工学研究科

E-mail: hieda@inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp

昨今の3次元形状計測分野では、より高速かつ高精度な計測手法が求められている。そこで本研究では、能動的な計測により両者を両立するシステムの構築を目標としている。形状計測の基本原理は、コード化パターン光投影法に基づくが、詳細な計測が必要とされる部分についてはカメラのズームを行うことによって高精度な計測を行い、またカメラの首振りを行うことによってより広い範囲の計測を行う。ここで、複数の画像を合成するため、二次元空間コードを利用した位置合わせ手法を開発した。現在までに、画像が位置ずれなく合成できることを確認している。現在、これらを統合し、効率的に物体の形状計測を行うシステムを構築中である。

Efficient range imaging using Pan-Tilt-Zoom Camera

Hiroya Hieda Shinsaku Hiura Seiji Inokuchi

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

E-mail: hieda@inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp

In the 3-D shape measurement field, fast and accurate measurement technique is demanded. In this paper, we propose a efficient method using actively planned measurement strategy. Basic principle of shape measurement is based on spatial-code projection method, but the pan-tilt-zoom parameter of the camera can be controlled from computer. The zoom feature realizes more precise resolution and the pan-tilt expands the angle of view. The most essential issue of our technique is the calibration of the camera parameter because the accuracy of the measurement is much influenced by this factor. To solve this problem, we used a projected 2-D spatial code pattern to find a matched point pair from two input images. The result of our image mosaicing method is well aligned, and the shape measurement result also accurate enough.

1. はじめに

近年のマルチメディア技術の発展により 3 次元 CG で実物体を仮想空間上に表現する需要がさまざまな分野で高まってきている。実世界におけるシーンをモデル化して扱い CG 化することによって質感や立体感などが再現でき、映画などでは CG で作られた画像を実際の映像に合成することで実写以上のリアルさを再現する技術がある。

そのほかにもゲームや各種 3D アプリケーションなどにおいてもその有用性は高いと思われる。また、博物展示など、現実性のあるモデルが要求される分野においては、3 次元形状計測の高精度化が必要とされている。

本研究では、液晶プロジェクタとズーム・首振りカメラを使用したレンジファインダを構成し、非接触で高精度な形状計測が可能な 3 次元形状計測システムを提案する。イメージモザイクや距離画像の合成を空間コードの利用による正確な位置合わせを行い、高精度化を実現した。また、アクティブビジョンや Coarse to Fine の考え方を適用して、荒い計測から始め詳細な計測が必要な部分についてはズームして計測を行うことで効率的な計測が可能なシステムを提案する。

2. システム構成

図 1.1 に示すように視点固定型パン・チルト・ズームカメラとプロジェクタからなるレンジファインダの配置を行い、プロジェクタから対象物体へグレイコードパターン光を投影し、その像をカメラにより取り込むことで三角測量法に基づく距離計測を行う。

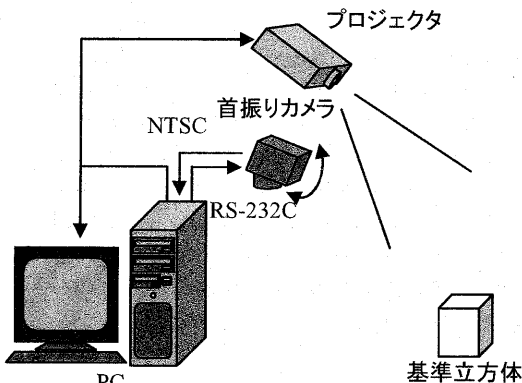


図 1.1 システム構成図

グレイコードパターン光投影法では空間に任意の座標系を設定できるが、カメラやプロジェクタのレンズによる結像光学系を、位置、姿勢、画角などのパラメータによってモデル化して統一的に扱う必要があり、そのつど計測系によってキャリブレーションしなければならない。本研究では、図 1.2 のような基準物体を用いてキャリブレーションを行うことで、カメラパラメータとプロジェクタパラメータをそれぞれ算出することができる。

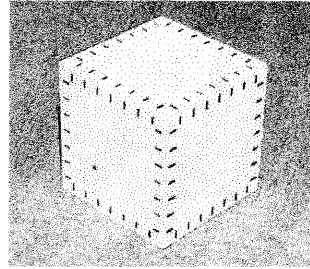


図 1.2 基準立方体

パン・チルト・ズーム可能なカメラを適切に制御することで、粗い計測から詳細な計測へと適応的な計測を行うことが可能である。これにより、対象物体の存在しない範囲や変化のない部位、細部形状が不要な部位の詳細な計測を省略し効率的な計測を行うことが出来る。

多くの場合、カメラによる撮像、すなわち 3 次元シーンから 2 次元画像平面への幾何光学的変換は中心投影によって近似され、パン、チルト運動を行う首振りカメラでは、中心投影が行なわれる座標系と画像平面が回転することになる。しかし、通常の首振りカメラでは、カメラの回転中心と投影中心とがずれており、カメラの回転によって投影中心が平行移動され、撮影された画像の間には運動視差が現れる。

しかし、本システムで使用しているカメラは視点固定型パン・チルト・ズームカメラ[1]であるため、カメラの制御に伴って運動視差が生じない。そのため、カメラの制御ごとに完全なカメラパラメータを求める必要はなく、カメラ制御前後に取り込まれた画像において各画素の二次元的な対応関係のみがわかればよい。

つまり、基準とする座標系を持つ画像の点 (x_1, y_1) に、ズームまたは首振りを行った画像の点 (x_2, y_2) が対応することがわかったとす

ると、変換行列 T を用いて

$$h \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

と表せる。ここで基準とする画像の方において、すでにキャリブレーションが行われており、カメラパラメータ C が求まっているとすると、逆変換行列 T^{-1} を用いて

$$h' \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot C \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

とできる。ここで $T^{-1} \cdot C$ は首振りを行ったカメラ座標系から世界座標系へ座標変換を行う透視変換行列である。したがって $T^{-1} \cdot C$ はズームまたは首振りを行った時のカメラパラメータである。このことから、キャリブレーションを行った画像とズームまたは首振りを行った画像との対応を求めて変換行列を算出することができれば、ズームまたは首振りを行った画像で対象物体の世界座標が不明でキャリ

ブレーションが行うことができなくともカメラパラメータを求めることができる。また、プロジェクタと物体の位置関係は不変であるからプロジェクタパラメータも変化しない。したがってシステムパラメータが決定するので、物体の世界座標を求めることができる。このようにして得た画像の対応関係を用いれば、複数回の計測により得た濃淡画像や距離画像を高解像度な1枚の画像に統合することも容易である。

3. 対応点探索

ここで、カメラ制御前後で撮影した画像の各画素の対応関係を正確に求める必要があるが、本研究ではプロジェクタより投影した2次元グレイコードパターンを利用した(図3.1)。本研究の前提条件として、カメラがズームや首振りを行ったとしても、対象物体とプロジェクタの位置関係は変化しないので、物体に投影されるパターン光も変化することはない。このことからズームや首振りを行って得られた複数の画像において、水平方向・垂直方向ともに同一の空間コードを持つ点を対応点とすることができる。この方法の利点として、対象物体上に画素の対応関係を示す手がかりが乏しい場合でも、常に安定に画像間の変換行列を得ることができる、ということが挙げられる。

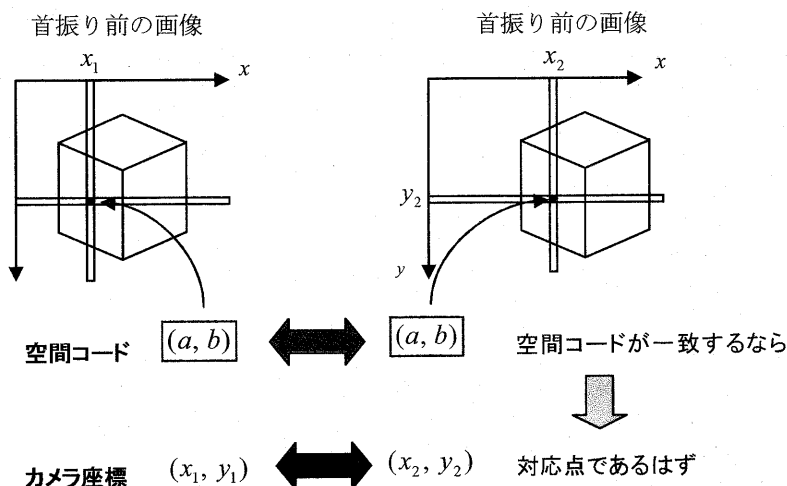


図 3.1 2次元グレイコードパターンによる対応点決定

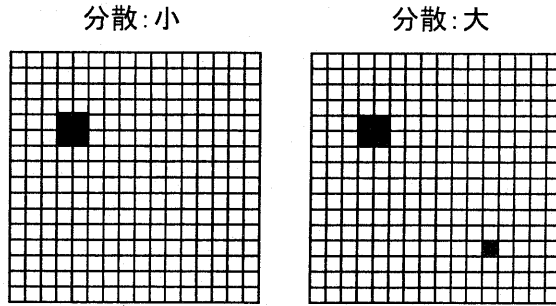


図 3.2 分散を利用した信頼性判別

3.1. 重心による対応点決定

本研究で用いているグレイコードパターン投影法は、プロジェクタからパターン光を投影することによって複数のスリット光を時系列に物体に投影できる方法である。その投影されるスリット光はもともと幅があり、さらにプロジェクタからの距離や角度によってその幅が変化する。そういった理由から、同一の空間コードを持つ点の数は一定とは言えない。したがって厳密には対応点ではない点を対応点としてしまったり、空間コードごとに対応点の個数が違うことにより、意図しない重み付けがなされてしまう可能性がある。そこで同じ空間コードを持つ点の集合の重心を求め、同一空間コードをもつ点の重心どうしを対応点とすることで誤差を減少させた。また、ある一つの空間コードを持つ点の重心は唯一であることから、空間コードによる対応点の個数にも差がなくなり、画像中でより均一な対応が取れる。

3.2 分散を利用した対応点の選別

対応点の信頼性は統計量である分散によって判別することができる。前述のように、同一空間コードを持つ点は複数存在することが多いので、その点の集合の分散を求めることができる。これにより、ノイズ等の影響によってある空間コードが特異な位置の点で検出された場合、その空間コードを持つ点の集合における分散は、ノイズの入っていない集団の分散より大きな値をとるはずである(図 3.2)。そこで、ある一定の閾値より分散の大きな点の集合の重心は対応点になり得ないとすれば、信頼性の高い点のみを対応点とすることができる。しかし、ある空間コードを持つ点が一点しか存在しない場合、その分散は必ず 0 となるので対応点

となり得ることになってしまう。そこで、ある空間コードを持つ点が一点しか存在しない場合は、その点は信頼性が低いとして対応点としては扱わないこととした。

3.3 対応点探索速度の向上

ズームや首振りを行って得られた複数の画像間の変換行列を得るためには、対応点、つまり同一空間コードを持つ点を探索する必要があるが、問題となるのがその探索速度である。高い精度が要求される箇所をカメラのズームを行って部分的に高精度に計測するのは、より効率的な計測を行おうとするためであり、この対応点探索に時間が必要とされるならばその意義も薄れてくる。そこで本研究では全探索の回数を最小限に減らし、速度の向上を図った。具体的には、比較する両画像をそれぞれ一度ずつ走査し、画素全てについて空間コードに対応したパッファに x 座標や y 座標の値、またその空間コードを持つ点の数といった、重心や分散を求めるための統計量を格納する。これにより、各画素に対し一度の走査で画像中の画素が持つあらゆる空間コードにおける統計量を取得できる。次に空間コードを順に調べてゆき、どちらの画像においても存在する空間コードについて、それぞれの画像における重心どうしを対応点の対とすればよい(図 3.3)。

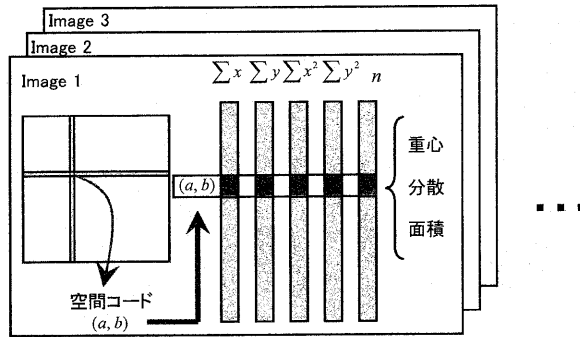


図 3.3 対応点探索の高速・高精度化

4.実験

4.1 カラー画像の合成

ズーム・首振りを行って得られた画像を合成して座標の変換ができていることの確認を行った。ズーム倍率が小さい状態からズーム倍率が高い状態、さらにカメラの首振りを右上・左上・左下・右下の順に4回行い、それぞれの状態で順次パターン光を投影して、合成する時に基準となる画像（ここではズーム倍率が高い画像とした）での空間コードと対応を取り、画像をホームポジションでの座標系に合成した。カメラのズーム倍率が高い座標系にズーム倍率が小さい画像を合成した場合、ズーム倍率が小さい画像はもとの画像のサイズに比べ拡大されて合成されるため、ズーム倍率が高い画像の部分が周りに比べて解像度が高い画像を得ることができる。ズーム倍率を小さくすることで対象物体全体を撮像し、さらにズームすることで注目する部分が高解像度な画像を得ることを確認した。

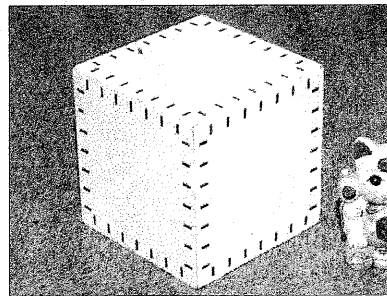


図 4.2 ズーム倍率大

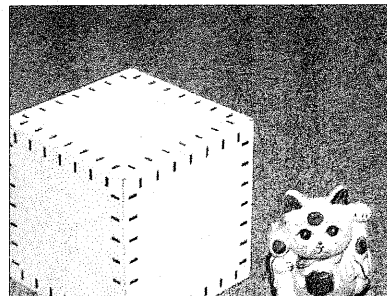


図 4.3 右上

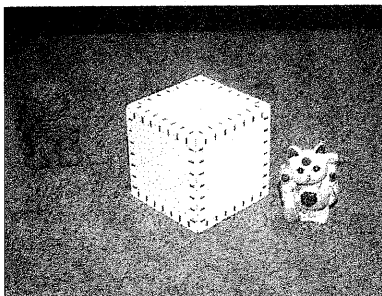


図 4.1 ズーム倍率小

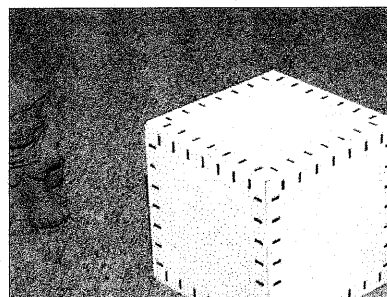


図 4.4 左上

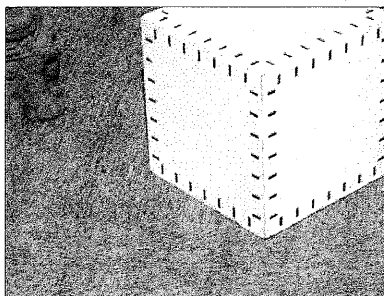


図 4.5 左下

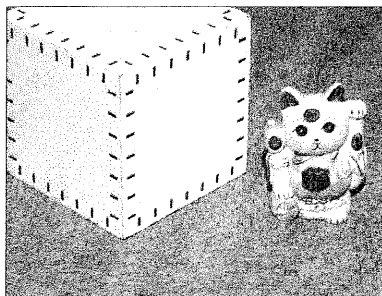


図 4.6 右下

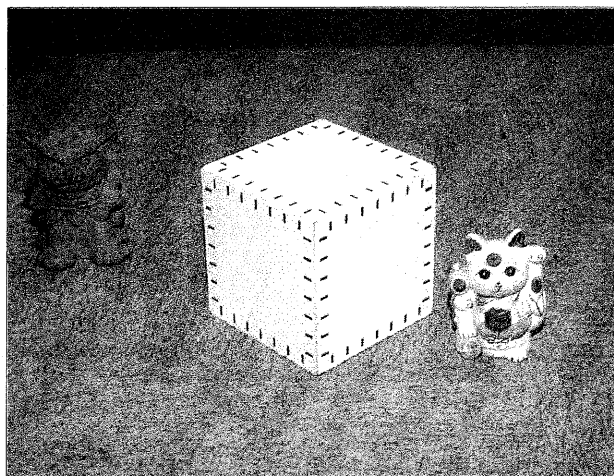


図 4.7 合成結果

カメラの首振りを行っていない状態の画像のほうが首振りを行った状態の画像より座標変換時の画像の劣化が小さいので、画像合成時に首振りを行っていない画像を優先した。図 4.7 に合成画像を示す。

図 4.8 に画像接合部の画像を示す。ズーム倍率によって解像度が変化していることが確認できる。



図 4.8 画像接合部

4.2 距離画像の合成

カメラのズームの変化させた状態について、キャリブレーションを行った画像との対応をとることで各画像のそれぞれの点における世界座標を計算した。ズームの倍率が小さい状態と大きい状態の2枚の画像について処理し、それを同時に表示した。ズームの倍率が大きい状態では点をグレー表示した。各画像を図 4.9・図 4.10 と図 4.11・図 4.12 に示し、同時に表示した様子を図 4.13 に示す。ズームが大きい状態の画像ではズームが小さい状態の画像より点の密度が高く、より高精度な形状計測ができるのが確認できる。

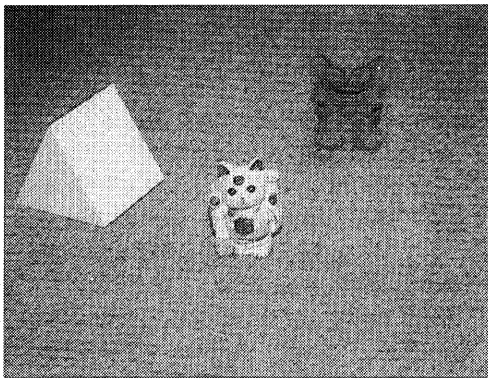


図 4.9 低倍率ズームのカラー画像

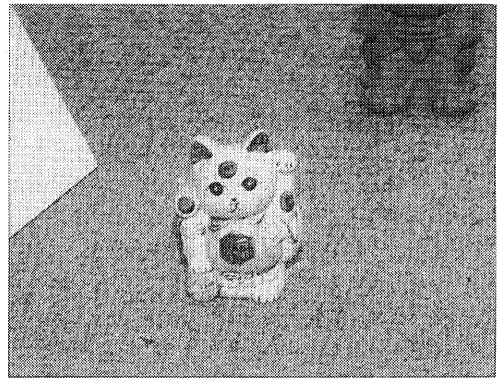


図 4.11 高倍率ズームのカラー画像

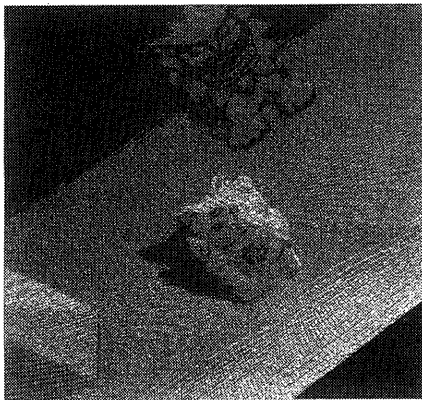


図 4.10 低倍率ズームの距離画像

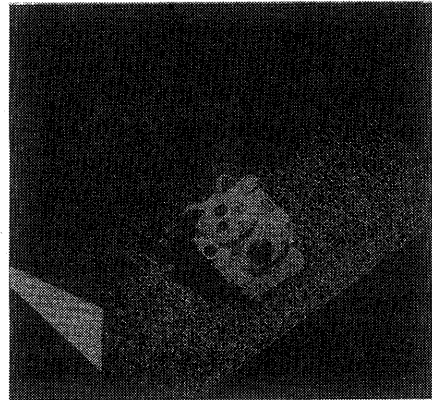


図 4.12 高倍率ズームの距離画像

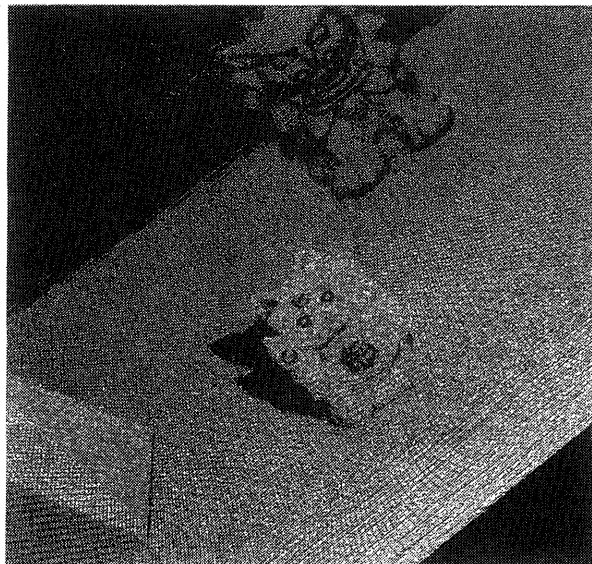


図 4.13 二つを合成した結果

5 まとめ

本研究では、プロジェクタと首振り・ズームカメラからなるレンジファインダを用いたグレイコードパターン投影法によって高精度・効率的な3次元形状計測システムを構築し、カラー画像の合成と距離画像の合成を行い、アクティブビジョンの考え方に基づいた能動的な3次元形状計測を実現した。結果として、部分的に高精度な計測を行えることが確認できた。

本研究では画像間の対応点探索に空間コードを利用していることから、対応をとる両画像には重なり合う部分が存在しなければならない。また、重なり合う部分の面積が小さければ対応点の数が減少し、画像間の変換行列を正確に求めることが困難になってくる。この問題を解決するためには、対応をとるために調べる空間コードをより多くすることや、首振り角度を小さくし、同一方向に複数回の首振りを行って対応をとることが考えられる。前者の方法についてはすでに実装しており、より多くの対応点を得られることが確認された。後者については、同一方向に複数回の首振りを行った際に前回の位置の画像と対応をとることによって常に多くの対応点を確保できる。そして基準とする画像の座標系への合成の段階では中間の首振り状態の座標系を介することで同一座標系への合成が可能であると考えられる。例えば同一方向に2回の首振りを行ってそれぞれ前回の画像と対応をとれば、元の位置の座標系に2回目の首振りを行った画像を合成するとき、一旦1回目の首振りを行ったときの座標系に変換してからさらに元の位置の座標系に変換することで合成が可能となる。実際にはそれぞれの変換行列の積を求めることで実現できる。

また、ズーム倍率の差が大きい画像間の対応を取る場合にはカメラの解像度の問題から対応が取りにくくなると考えられる。この問題を解決する方法としては先ほどと同様に段階的にズームをすることや、空間コードの対応をとる際にビット数を減らして対応をとることなどが考えられるが、実際の問題として物体の計測において部分的に極端に精度が異なる計測をすることも考えにくいことから大きな問題ではないと考えられる。

カラー画像の合成において、画像の接合部分で濃淡の不連続が見られる部分がある。画像の

統合は複数の異なる視点からの画像をつなぎ合わせることであり、画像間の幾何学的な統合が主な焦点となっている。しかしながら、実際に画像をシームレスに接続するためには幾何学的な統合のほかに、接合部における急激な明度変化を抑えるための濃度補正が必要となる。一般的には、画像周辺部の明度が低下するといったシェーディング歪みの補正や画像間の明度差の補正（濃度変換）、画像間の接合部の平滑化などの処理を行うことが多い。

距離画像の合成については、現段階では複数の距離画像を同時に表示しているという段階にとどまっており、ズームして詳細に形状計測を行った部分では点が重なって表示されている。これはOpenGLを使用して表示させているが、表示する点の数が多ければ多いほど処理が重くなってしまう。これは重複した表示は行わない方法を用いることで今後解決してゆきたい。

また、シーンを荒く計測して物体の大まかな位置を把握してからその位置周辺を詳細に計測することにより、シーンに新たな物体が加わった場合などにも対応できるアクティブレンジファインダを構築することを目標とする。

参考文献

- [1] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司: 視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用, 信学論 Vol. J81-D-II, No. 6, pp. 1182-1193, 1998
- [2] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂(1990)