ズーム計測法と視差による不確定な領域の評価*

尾崎 功一** 星野 智史*** 山本 純雄†

Zooming Measurement and Evaluation of Uncertain Region by Disparity

Koichi OZAKI, Satoshi HOSHINO and Sumio YAMAMOTO

Image measurement is required for mobile robots with vision. Stereo vision is widely used for this purpose. An image measurement using stereo vision can have a correspondence problem when there are similar objects in the environment. In order to avoid such a problem, a zooming measurement using monocular vision is applied. From this technique, it is possible to obtain the 3D position of an object by referring to two 2D images of it at distinct focus (view) points on the optical axis. The objects on the 2D images dynamically change with zooming. Image measurements on the digital images have uncertain regions depending on the disparity and the image resolution. The disparity is dynamically changed in the zooming measurement. Therefore, it is necessary to evaluate uncertain regions with every disparity.

This paper proposes an evaluation method for uncertain regions of the zooming measurement. In the proposed method, the relationship between the disparity and the uncertain regions is shown in the experiments by using the actual zooming camera. The zooming measurement based on the evaluation is achieved.

Key words: robot, zooming view, image measurement, uncertain region, robot vision

1. 緒 言

移動ロボットの自律行動には周囲の環境を計測できることが不可欠である。近年では、計算機の処理能力の飛躍的な向上にともない、計算処理が重いとされてきた画像処理および画像計測が適用されるようになってきた。移動ロボットに適用されている画像計測法としては、2台のカメラから構成されるステレオ視が有力である。これには三角測量が適用されるが、計測対象として注目している左右画像中のあるパターンを互いに対応付けられることが前提となる。しかし、類似のパターンにより構成された人工物が多く存在する環境では、パターンの対応付けが困難な場合が生じる。

移動ロボットの自律行動には、障害物や作業対象などのなんらかの対象物を注視し追跡すること（トラッキング）が必要であり、トラッキング技術に関しては比較的に耐え得るレベルにまで至っていると考えられる。このことから著者らは、パターンの対応づけ問題を回避するためにロボットの視覚を単眼とし、単眼による対象物の計測法に注目した。この方法では、一台のカメラによって一点を注視しながら視差が得られるように移動して計測する「移動視¹⁾」あるいはロボット自身が移動して計測する「移動視¹⁾」が有力である。しかしながら、これらの方法では内界センサによって視差となる画像間の相対位置を求める必要があり、その位置精度が計測精度に影響を与える。

単眼による画像計測法としては、焦点深度（被写界深度）を利用したレンズ焦点法が挙げられる²⁾。これは、被写体のピントと焦点合わせ（焦点距離）の関係から、被写体までの距離を求める方法である。ロボットに適用した場合を考えると、ピント合わせの判断が課題となる。この計測法の精度は焦点深度の深さに依存するため、一般的なロボットが動作する環境では実用的ではない。実際には、顕微鏡のように焦点深度がきわめて浅くできるような計測環境において適用されている。

これらの方法の他には、レンズ中心軸上にある焦点距離の違いによって生じる見え方の違い（視差）から、対象物の三次元位置を計測する方法が挙げられる³⁾。視差はカメラのズーム機能によって作りだされることから、本研究では、これを「ズーム計測法 (zooming measurement)」と呼ぶことにする。ズーム計測によって得られる視差は、カメラ内部のズーム機能すなわち焦点の移動範囲に制限されるため、ステレオ視よりも視差が小さくなってしまう。さらに、画像分解能は有限であるため、計測上の不確定な領域が大きくなる。また、レンズの歪みによる影響も大きい。Lavestらは、ズーム計測法を適用した三次元的な形状モデルの獲得を行った。ここでは、ズームレンズの光学系を詳細に解析することによって、モデル生成に十分な計測精度を得た⁴⁾。しかし、ズーム計測法では、光学系そのものの詳細パラメータを知るだけでは不十分である。なぜなら、画像上の計測点の位置と焦点の位置によって得られる視差の量が動的に変動し、視差が計測精度に大きく影響を与えるためである。

本研究では、ズーム倍率（焦点距離）と画像分解能の関係から、三次元位置計測の不確定な領域を把握するための方法を提案する。本研究の提案は、今後のカメラの高解像度化およびズーム機能の向上を想定し、ズーム計測法の適用をねらったものである。本論文では、ズーム計測法の不確定な領域の評価法を述べるだけでなく、ロボットの視覚として広く使われているズームカメラを適用した基礎的な実験結果を示し、本提案の可能性および有用性を示す。

2. トラッキングにおけるズーム計測法

2.1 ズーム計測法の適用

複数の視点から三次元計測を行うには三角測量が基本となるが、これをロボットの視覚に適用するには、(1) パターンの対応付けを行えること、(2) 視差を大きく取ること、の2つが要求される。2台以上の固定カメラによるステレオ視では、視差を大きく取れるようにカメラを並列に設置することによって十分な計測精度を得ることが可能であるが、類似のパターンが多く存在するような環境では、左右画像中のパターンの対応付けを

* 原稿受付 平成 15 年 5 月 19 日

** 正 会 員 宇都宮大学大学院工学研究科（宇都宮市陽東 7-1-2）

*** 宇都宮大学大学院工学研究科（現、東京大学大学院工学系研究科；文京区本郷 7-3-1）

† 宇都宮大学大学院工学研究科（宇都宮市陽東 7-1-2）

Fig.1 Tracking for zooming measurement

行うことが困難な場合が生じる。一方、移動視の場合では、注視を行うことによって、比較的低コストにパターンの対応付けを行うことが可能であるが、視点間の位置を正確に求められることが要求される。

本研究では、類似パターンが多く存在する環境において、移動ロボットが環境情報を獲得する際に三次元計測を行うことを前提とする。このような環境ではパターンの対応付け問題を重視し、単眼による移動視が適切であると考えた。しかし、移動ロボットが移動視により位置を求めるには、視点間の位置を正確に求められることが要求される。さらには、移動ロボットは進行方向にカメラを向けるのが一般的であり、計測対象の位置によっては視差を大きく取ることが困難な場合が生じる。そこで我々は、ズーム計測法を採用することにした。ズーム計測法には、(1)トラッキング（注視）手法を適用することによって比較的低コストな対応付けを行うことができること、(2)カメラ内部のズーム機能を利用することによって、視点（焦点）間の位置を正確に求めることができること、(3)ズームによる画像の拡大を利用することによって計測点の分解能を向上させられること、の3つの効果が挙げられる。

ズーム計測法では、画像の中心からはなれたところに位置する計測点に対しては十分な視差が得られにくいいため、高い精度で計測することは困難である。しかし、パン・チルト機能が装備されているカメラであれば、画像の端に撮像される計測点でも、カメラの向きを制御して、計測点を画像の中心付近に向けることができる。図1にその一例を示す。画像の端に撮像された対象物をパン・チルト機能を制御することによって画像中心に移動させ、ズーム計測法を適用することができる。

2.2 計測原理

ズーム計測法では、まず、焦点（視点）を移動させながら任意の計測点 M のトラッキングを行うとき、焦点距離の異なる複数の画像を得る。これらの画像から焦点距離の異なる2枚の画像が選ばれたとすると、各々の画像の幾何的な位置関係は図2のように表される。焦点距離とは、レンズ光軸（Z軸）上でカメラの感光面（photosensitive screen）から焦点までの距離である。この図において、計測点 M は焦点距離 f_1 および f_2 の各撮像面（画像）上では異なる位置に見える。視差（disparity）とは、このように視点が変わることによって生じる見え方の違いであり、幾何的には視点間の距離の差（ $d = |f_2 - f_1|$ ）を意味する。また、

Fig.2 Zooming measurement

Fig.3 Uncertain region on distinct focal length

光学系が既知であれば、計測点の存在する方位（ ϕ, θ ）が求められる。計測点 m の三次元位置（ x, y, z ）は、視差である焦点距離 f_1 および f_2 （ただし、 $f_1 \neq f_2$ とする）、計測点の存在する方位（ ϕ, θ ）より、式(1)より求められる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{(f_2 - f_1) \cdot q_1 \cdot q_2}{q_2 - q_1} \\ y &= \frac{(f_2 - f_1) \cdot p_1 \cdot p_2}{p_2 - p_1} \\ z &= \frac{f_1 \cdot p_1 - f_2 \cdot p_2}{p_1 - p_2} = \frac{f_1 \cdot q_1 - f_2 \cdot q_2}{q_1 - q_2} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $q_1 = \tan \phi_1$, $q_2 = \tan \phi_2$, $p_1 = \tan \theta_1$, $p_2 = \tan \theta_2$ であり、ピンホールモデルで考えると、 $q_1 = v_1/f_1$, $q_2 = v_2/f_2$, $p_1 = u_1/f_1$, $p_2 = u_2/f_2$ として求めることができる。ここで、 u_1, v_1 および u_2, v_2 はそれぞれに感光面上の計測点 m_1, m_2 の位置である。

2.3 画像分解能と不確定な領域による評価法

デジタル画像における計測では、1ピクセルの寸法 $\Delta u \times \Delta v$ が占める実環境での空間を把握する必要がある。ズーム計測法では、視点の移動によって図3のような構成で不確定な空間が生じる。このような不確定な空間を求めるには、図4のようにデジタル画像上で注目している1ピクセルの4点の位置（ u, v ）、（ $u + \Delta u, v$ ）、（ $u, v + \Delta v$ ）、（ $u + \Delta u, v + \Delta v$ ）から、式(1)より、そのピクセルが占める不確定な空間を求めることができる。本研究では、不確定な空間の把握が容易なように、x-z平面およびy-z平面にわけて考えることとし、以下、不確定な領域（Uncertain Region）と呼ぶことにする。ステレオ視では、カメラ間の位置を調整することによって、構造的に不確定な領域を小さくすることができる。しかし、ズーム計測法では、計

Fig.4 One pixel region on digital image

Fig.5 Experimental system

CCD size	mm	approx. 6.00 × 4.96
CCD unit cell size	μm	6.35 × 7.40
Image resolution	pixel	811 × 508 (768 × 494)
Focal length	mm	5.4~64.8
Pan-Tilt	deg	± 100, ± 25
Output format		NTSC

測点の位置、画像上の分解能および焦点距離から、不確定な領域を把握することが必要である。

3. 計測実験

3.1 実験装置

本研究では、ズーム計測法の効果を検証するために、実際にカメラを用いて計測実験を行った。本実験では、画像キャプチャボードを実装したパソコン（Personal Computer 以下 PC）を用意し、ズーム機構を制御することができる CCD カメラ（Sony 製 EVI-D30）を PC に接続した。本カメラは、RS-232C 準拠のシリアル・インタフェースを装備しており、PC からのコマンドによって視点の向きおよびズーム機構を制御することができる。ズームによる焦点距離 f は 5.4~64.8mm である。このシステム構成を図 5 に示す。そして、カメラの仕様を表 1 に示す。

本カメラからの映像は NTSC ビデオ信号として出力され、この映像を PC によって有効画素数内の 320 × 240 pixel または 640 × 480 pixel の解像度で画像を取得することができる。

3.2 計測点の抽出とトラッキング

本研究では、PC 上に画像上のある特徴的なパターンを探索し、これを注視しながら画像上の計測点を求めるプログラムを作成した。また本プログラムは、ズーム機能を制御することも可能であるので、ズームによって視点を変更させながら、視点の異なった画像上の計測点の位置から、三次元上の計測点の位置を計測することにした。

図 6 のような計測対象を用意した。図 6 は、高さ 8.0 mm、

Fig.6 Measurement Objects (Markers)

Fig.7 Experimental environment

幅 8.0 mm の矩形が 60 mm 間隔で 6 個横一列に並んだ画像である。本研究では、この画像中の矩形をマーカと呼び、これを計測対象とした。マーカをカメラの前方 (z 方向) に 0.43 m、カメラの高さ (x 方向) に 0.0 m の位置に設置した (図 7)。このとき、パターンは、 y 方向に -0.16, -0.10, -0.04, 0.02, 0.08 m の位置となる。

図 6 のような類似パターンが規則的に配列された画像では、ステレオ視は左右画像の計測点の対応付けが困難な場合が生じる。ズーム計測法では、一般的なトラッキング手法（注視点の追跡手法）を適用することによって、計測点の対応付けをロバストに行うことが可能となる。

まず、マーカの抽出方法について述べる。前処理として、「二値化 (binarization)」および「微粒子除去 (remove noise)」を行い、「ラベリング (labeling)」によって計測対象の抽出を行った。

次にトラッキングについて述べる。以上のように抽出されたマーカを参照パターンとした相関演算によるトラッキングを行った。本実験装置では、抽出からトラッキングまでの画像処理を約 10Hz で行うことが可能である。

そして、焦点距離が $f=5.4$ mm から $f=8.0$ および 20.0 mm までズームしながら、マーカのトラッキングを行った。この様子を図 8 に示す。本図において、黒い部分が抽出されたマーカである。本実験によって、簡単なトラッキング手法を適用するだけで、画像上の計測点を容易に求められることを確認した。

3.3 サブピクセル・オーダにおける計測点の抽出

本実験では実時間での注視を考慮し、320 × 240 pixel で画像の取込みを行うこととした。ズーム計測法では、微小な視差から計測点の位置を算出するため、可能な限り高い解像度を得

Fig.8 Original and processed images with zooming

る必要がある。このため、抽出された領域を縦横 6 倍まで拡大し、その領域で重心演算を行い、計測点の中心を求めることとした。これはサブピクセル⁵⁾まで画像上の計測点を求めることに相当する。図 9 に一例として抽出した領域を縦横 6 倍まで拡大した画像の一部を示す。画像の拡大に関しては一次補間法を適用した。

3.4 マーカの三次元位置の計測結果

本研究で用いた CCD カメラの素子寸法、焦点距離等の値はすべて理論値であり、本実験で画像計測に用いるためにはそれらの値を補正しなければならない。しかしながら、ズームレンズは複雑な光学系を有すること、さらに、レンズの内部構成が未知であることから、実験的補正値を求めることにした。式 (1) は画像上の計測点の方位から三次元位置を求めるものであるが、画像上の計測点から求められる方位と、実際に計測点が存在する方位とを実験によって求め、これを三次多項式と最小二乗法によって補正値を求めた。ただし、焦点距離 f を 5.4, 8.0, 20.0 としたときの補正値を求めた。各焦点距離の場合において、補正用の試料を設置し、画像上の 3 点の任意の計測点から補正値を算出した。補正値を α としたとき、対象物の方位は $p = \alpha \cdot u/f$ または $q = \alpha \cdot v/f$ として補正することができ、各焦点距離毎の補正値は、 $\alpha_{5.4} = 0.9297$, $\alpha_{8.0} = 0.9410$, $\alpha_{20.0} = 0.9985$ であった。

計測結果を図 10 に示す。本実験での前方 6 点の内、中心に近い 4 点が十分な精度で計測することができた。図 10 において、破線上の「+」は真の計測点の位置 (true positions), 「○」は計測値 (measured positions) を意味する。また、○上に描かれている線分は本実験で用いた CCD カメラおよび画像の解像度から算出される不確定な領域を示している。線分で表された不確定な領域は、 z 方向に比べ、 y 方向の方が極めて狭いことを確認した。

Fig.9 Extracted markers(Measured points)

Fig.10 Measurement result of position of markers

計測点 A, B および D は誤差がわずかであり、不確定な領域も真値を含めるように位置したことから、十分な計測精度が得られたことがわかった。特に、 y 軸方向で数ミリ程度の誤差で計測することができた。これに対して計測点 C はやや真値から離れており、不確定な領域で判断しても明らかに誤差であることがわかった。この理由は、画像処理上のノイズ等の影響で計測点がずれたためだと考えられる。

3.5 ズームによる計測点の高分解能化

ズーム計測法の特徴として、ズームによる画像拡大 (計測点の高分解能化) が挙げられる。ズーム計測法では、微小な視差から計測を行うため、不確定な領域が z 方向に広がる。しかし、計測点の高分解能化によって領域がある程度小さくなるので、図 10 の結果のように 4 点全てに対して菱形ではなく、焦点と計測結果を結んだ線分のような狭い領域になる。

4. ズーム計測法における視差と不確定な領域による評価

4.1 視差と不確定な領域との関係

ズーム計測法では、視差が大きくとれることが計測精度の向

Fig.11 Relationship between disparity and uncertain region(Y-axis)

Fig.12 Relationship between disparity and uncertain region(Z-axis)

上につながる。しかし、計測点の位置によっては、視差が一定して得られるとは限らず、そのために、視差によって計測精度が大きく変動する。したがって、ロボットなどの自律機械にズーム計測法を適用することを考えると、視差と不確定な領域との関係を把握することが必要となる。すなわち、計測精度としての不確定な領域を見積もりながら、計測を行うことが要求される。そこで本研究では、視差と不確定な領域の関係から十分な計測がなされているかを評価することを提案する。本研究では、図 11 および図 12 のように、横軸に視差、縦軸に不確定な領域を取って評価することにした。これらの図において、白のプロットは真値より式 (1) に基づいて理論値から算出した。黒のプロットは計測結果における計測精度を表しており、図 10 で示した不確定な領域を意味する。図 11 および図 12 において、視差が大きいくほど不確定な領域が縮小し、精度の高い計測が可能となることを確認した。

4.2 ズーム計測法における不確定な領域

図 11 および図 12 において、各計測点における計測値と真値はともに近い値となった。このことから、十分な計測結果が得られたことが確認できた。さらに、すべての計測結果が、真値から求めた理論的な視差と不確定な領域の関係を表す曲線上に位置した。このことは、近似的な補正が正しく行えたことと、サブピクセルまで計測点を求められたことを意味する。よって、

計測点 C の誤差の原因は、レンズ等の歪みなどカメラ・パラメータの不十分な校正によるもの、あるいはノイズやゆらぎによる画像処理上の問題であると考えられる。

4.3 ズーム計測法の実用化の課題

本実験結果より、微小な視差であってもサブピクセル・オーダーまで計測点を求めることによって、一定の計測が可能であることがわかった。しかし、より実用的な計測結果を得るためには、

- (1) 高解像度で画像を取得すること。
- (2) レンズの歪みなどのカメラ内部パラメータを補正できること。

の 2 つが要求される。(1) に関しては、DV カメラなどのデバイスがデジタル化されるだけでなく高解像度化しており、将来的にはズーム計測法にとって十分な解像度が得られるようになると思われる。また、近年のコンピュータの処理速度の向上を考慮すると、画像の取込みおよび処理も高速に行われるようになることが期待される。(2) に関しては、さまざまな歪み補正法が提案されている。しかし、ズーム機能を有するカメラは複数のレンズを組み合わせしており、これを理論的に補正するのは手間のかかる作業である。より簡便な補正方法の開発が望まれる。

5. 結 言

本論文では、ステレオ視のような計測点の対応付け問題を回避するために、単眼によるトラッキングに着目し、トラッキングを行いながら焦点の移動(ズーム)によって位置を計測する「ズーム計測法」について述べた。そして、ズーム計測法における視差と不確定な領域との関係から計測精度を見積もる方法を提案した。また本論文では、一般的に用いられているズーム機能付きカメラを用いて、計測実験を行い、ズーム計測法が適用可能であることを示した。さらに、この実験において、視差と不確定な領域について評価し、考察した。

ズーム計測法は、実用的にはステレオ視と比較して十分な精度を得ることはできないが、計測点の存在する領域(不確定な領域)を特定できることから、ステレオ視の補助的な計測法として利用可能であると考えられる。また、画像の高解像度化によって、不確定な領域は相対的に縮小し、将来的には実用に耐え得る計測法になると期待できる。

今後は、ズーム計測法および視差と不確定な領域との評価を指標とする移動ロボットのナビゲーションに着手する。

参 考 文 献

- 1) 岩崎貴文, 尾崎功一, 宇賀神和久, 横田和隆, 山本純雄: 実環境における視覚に基づくロボットの走行(その 1), 精密工学会春季大会講演論文集, (2000)500.
- 2) K. Ohba and J. C. Pedraza Ortega: Micro-observation technique for tele-micro-operation, *Advanced Robotics*, **15**, 8(2000)779.
- 3) Jun Ma and S. I. Olsen: Depth from zooming, *Optical Society of America*, **7**, 10(1990)1883.
- 4) Jean-Marc Lavest, Gerard Rives and Michel Dhome: Three-Dimensional Reconstruction by Zooming, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9**, 2(1993)196.
- 5) Kazunori UMEDA and Takatoshi TAKAHASHI: Subpixel Stereo Method: a New Methodology of Stereo Vision, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2000)3215.