

高速ステレオ計測のための DP マッチングの近似手法

宇都木修一[†] 鈴木 寿^{††}

[†] 中央大学大学院理工学研究科, 東京都

^{††} 中央大学理工学部情報工学科, 東京都

〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

E-mail: [†]utsugi@suzuki-lab.ise.chuo-u.ac.jp, ^{††}suzuki@ise.chuo-u.ac.jp

あらまし ステレオ視において, 画素に対して DP マッチングを適用し, 左右の画像の対応を詳細に取ることによって高精度な 3 次元計測を実現する手法が開発されている. 本研究の目的はその精度を維持した計測を, 実時間で実現可能とするための高速化アルゴリズムの開発である. 本論文では 2 つの近似手法を提案する. 1 つは, DP マッチングの途中結果を用いてマッチングの探索範囲を絞り込む手法であり, もう 1 つは輝度変化の大きい点を特徴点とし, 特徴点のマッチングを事前におこなうことにより探索範囲を絞り込む手法である. これらの近似手法に対し, 実際に撮影した画像を用い, 精度検証を中心とした性能評価をおこなった.

キーワード ステレオ視, DP マッチング, 近似手法, 精度検証

Approximation Methods of DP Matching for Fast Stereo Measurement

Shuichi UTSUGI[†] and Hisashi SUZUKI^{††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

^{††} Faculty of Science and Engineering, Chuo University

1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551 Japan

E-mail: [†]utsugi@suzuki-lab.ise.chuo-u.ac.jp, ^{††}suzuki@ise.chuo-u.ac.jp

Abstract The purpose of this research is to develop efficient methods of high-precision stereo measurement. We already have such a method based on a traditional DP matching algorithm, and this article proposes two distance approximation algorithms improved in computation time from the original algorithm. One approximation algorithm realizes pruning in a way of reserving local optimization paths. Another approximation algorithm narrows the search area in DP matching in a way of noticing feature points. Experimental results show that these two algorithms can decrease computation time without decreasing precision of distance measurement.

Key words Stereo Vision, DP Matching, Approximate Method, Accuracy Verification

1. はじめに

複数のカメラからの画像を, 利用して距離を計測するステレオ計測は, 様々な分野で応用される. ロボットビジョンやコンピュータビジョンはもとより, ITS や GIS の分野でも利用されている.

ステレオ視は, 視差を利用して対象物体までの距離を計測する方法である. 視差とは, 同一物体に対する複数のカメラ間での見え方 (位置) の違いである. カメラの向きを保持している限り, 遠くにある物体はカメラの位置を多少変更しても, カメラに映る位置を変えることはない. 逆に,

近くにある物体はカメラの位置を変えるとカメラに映る位置を大きく変化させる. このことからわかるように, カメラから物体までの距離が大きいほど, 視差は小さく, カメラから物体までの距離が小さいほど, 視差が大きくなる. 2 台のカメラを同じ高さ, 同一直線上に平行に設置した場合, 視差を v , カメラ間の距離 (基線長) を b , 焦点からスクリーンまでの距離を ρ とし, カメラから物体までの距離と, 視差の関係は,

$$\delta = \frac{b\rho}{v} \quad (1)$$

とあらわされる. したがって, 片方のカメラで捉えた画像

上の1点が別のカメラのどの点に対応するかがわかれば、視差が導き出され、物体までの距離も導き出される。そこで、複数の画像間における対応点探索が必要となる。計算機によってステレオ視による距離計測を自動的におこなう場合は、画像間の対応点も自動的に探らなければならない。

画像間のマッチングを探索する手法は、大きく2つに分類される。DPマッチングなどにより、画像あるいは走査線全体での最適なマッチングを求め、大局的に整合性の取れたマッチングを求める方法[1]と、相関法などにより、左右の局所領域どうしのマッチングを求め、局所的に整合性の取れたマッチングを求める方法[2]である。また、それぞれの方法において、特徴点を用いて計算時間を短縮する方法と、画素単位でマッチングを取ることで詳細な3次元情報を得る方法がある。

画素単位でマッチングをとり、さらに複数の走査線を利用することで高精度な距離計測を実現したものとして[3]がある。この[3]の成果をもとに、精度を維持したまま高速にステレオ計測をおこなうアルゴリズムを開発することが、本研究の目的である。

2. マッチングアルゴリズム

本研究においては[3]で用いた手法を踏襲する。[3]では各画素の輝度を利用し、画素単位でDPマッチングをおこなうことにより、対応点を決定する方法を採用している。本研究においてもこの方法を踏襲する。以下、概要を述べる。

用いるカメラの数は2つとし、カメラを同じ高さ、同じ向きに同一の直線上に平行に設置する。画像の横幅を I 、縦幅を H とする。さらに、左画像上の左下の点を原点とし、横軸を i 、縦軸を h とする。 $0 \leq i \leq I-1$ 、 $0 \leq h \leq H-1$ である。

まず、 i および j に関する拘束条件について述べる。 k 番目のマッチングにおける i を $i(k)$ 、 j を $j(k)$ とすると、DPマッチングでは

$$\begin{cases} i(k) \leq i(k+1) \\ j(k) \leq j(k+1) \end{cases} \quad (2)$$

を成立させる。さらに、通常は左画像上での対象物体の位置は、右画像上での対象物体の位置より常に右側にある。したがって、

$$i(k) > j(k) \quad (3)$$

が成立する。ただし、対象物体の幅が基線長より短い場合、カメラから対象物体の距離および、カメラから対象物体の背後にある物体までの距離によっては、式(3)が成立しないことがある。逆にカメラと対象物体の距離が基線長よりも大きければ、式(3)は常に成立する。この問題を解決する手法[4]も存在するが、ここではこの問題が発生しない

ように対象物体の幅は常に基線長より長いものとする。また仮に、 $i(k) = j(k)$ となる場合が存在するとすれば、それは視差が無いことを示し、対象物体が無限遠点にあることを意味する。

次に、マッチングに使用する距離について述べる。本研究ではRGB24ビットのカラー画像を用いる。左画像上の点 (i, h) におけるRGBの輝度値をそれぞれ、 $L_h^R(i)$ 、 $L_h^G(i)$ 、 $L_h^B(i)$ とする。同様に、右画像上の点 (j, h) におけるRGBの輝度値を $R_h^R(j)$ 、 $R_h^G(j)$ 、 $R_h^B(j)$ とする。また、マッチングの際には対象となる走査線の上下の走査線も利用することによって、妥当性の高いマッチングが得られるようにする。 $L_h^B(i)$ 、 $R_h^B(j)$ はそれぞれ

$$\mathbf{L}_h(i) = \begin{pmatrix} L_{h+\eta}^R(i) \\ L_{h+\eta}^G(i) \\ L_{h+\eta}^B(i) \\ \vdots \\ L_h^R(i) \\ L_h^G(i) \\ L_h^B(i) \\ \vdots \\ L_{h-\eta}^R(i) \\ L_{h-\eta}^G(i) \\ L_{h-\eta}^B(i) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_h(j) = \begin{pmatrix} R_{h+\eta}^R(j) \\ R_{h+\eta}^G(j) \\ R_{h+\eta}^B(j) \\ \vdots \\ R_h^R(j) \\ R_h^G(j) \\ R_h^B(j) \\ \vdots \\ R_{h-\eta}^R(j) \\ R_{h-\eta}^G(j) \\ R_{h-\eta}^B(j) \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。このとき、 $L_h(i)$ と $R_h(j)$ の間の距離を $d(i, j)$ として、

$$d(i, j) = \|\mathbf{L}_h(i) - \mathbf{R}_h(j)\| \quad (5)$$

とする。ここで、 η は上下片側の走査線の本数である。使用する走査線の本数は $2\eta + 1$ となる。

(i, j) における距離の累積値を $D(i, j)$ として、DPマッチングでは式(2)より、

$$\begin{aligned} D(i, j) = \min\{ & D(i-1, j) + d(i, j), \\ & D(i-1, j-1) + \lambda d(i, j), \\ & D(i, j-1) + d(i, j) \} \end{aligned} \quad (6)$$

となるように $D(i, j)$ を求めていく。 $D(0, 0)$ から逐次 $D(i, j)$ を求めていき、 $D(I, J)$ まで求める。こうして求めた $D(I, J)$ は距離の累積値の最小値であり、 $D(I, J)$ を与える i, j の組み合わせがマッチングの解である。また、本研究では端点フリーとする。

3. 近似アルゴリズム

DPマッチングの近似アルゴリズムの代表的なものとして、ビームサーチがある[5]。ビームサーチは探索の各時点において、累積距離の小さいいくつかのパスのみ探索を継

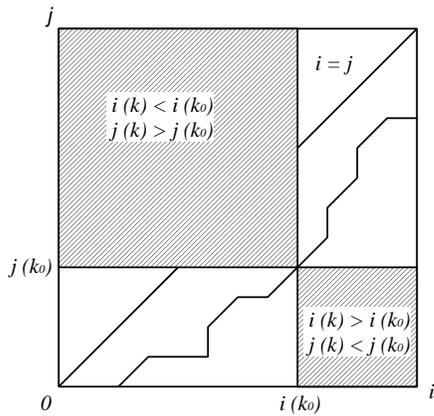


図1 探索不要範囲

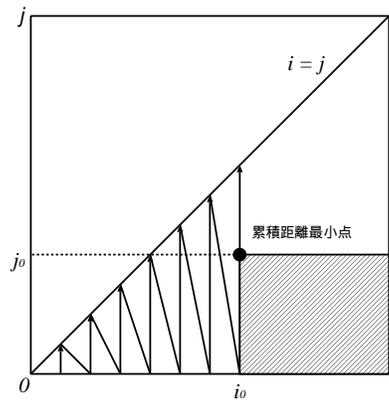


図2 刈り込み法

続させ、それ以外のパスの枝刈りをおこなうことによって高速化を図る手法である。ビームサーチは音声認識において、広く活用されている。しかし、ステレオマッチングにおいて、各画素における輝度値を利用し、画素単位でマッチングを取るような場合には、ビームサーチを適用しても近似解の精度が低くなる。これは、ビームサーチは音声認識、すなわち、時系列にしたがった信号に対するパターンマッチングへの適用を目的としており、とある時刻での入力値が複数の参照値にマッチングすることを想定していないためである。ビームサーチでは $j(k) = j(k+1)$ となるようなパスを考慮しない。

そこで、本研究ではステレオマッチングの高速化を目的として2つの近似アルゴリズムを提案する。1つは、探索の途中で近似的に最適パスを決定することによって、それ以降の探索の範囲を絞りこむ方法である。以降、この方法を刈り込み法と呼ぶ。もう1つは、探索の前に特徴点のマッチングをおこない、事前に探索範囲を絞りこむ方法である。以降、この方法を分割法と呼ぶ。

3.1 刈り込み法

DP マッチングでは式 (3) を満たすように、経路を探索する。したがって、最適経路が $(i(k_0), j(k_0))$ を通過することが保証されていれば、以降の探索において $i(k_0) < i(k)$ かつ $j(k_0) > j(k)$ および、 $i(k_0) > i(k)$ かつ $j(k_0) < j(k)$ (ただし、いずれにおいても $(k_0 < k)$) となる範囲 (図1における斜線部分) を探索する必要が無い。この性質を刈り込み法では利用する。

刈り込み法の手順を以下に示す。 $i = 0, j = 0$ から、 j が増加する方向 (図2の矢印の向き) へマッチング経路の探索を開始し、ある $i = i_0$ において

$$\frac{d(i_0, j_0)}{i_0 + j_0} = \min \left\{ \frac{d(i_0, j)}{i_0 + j} \mid j = 0 \cdots i_0 - 1 \right\} \quad (7)$$

となる点 (i_0, j_0) を求める。求めた (i_0, j_0) は $i = i_0$ において最も DP マッチングの距離の累算値が小さいものであるとみなし、最適経路はこの点を通るものとみなす。最

適経路が (i_0, j_0) を通過するとみなすので、以降の探索では $j(k) < j_0$ となる範囲 (図2の斜線部分) の探索をおこなわない。以上が、刈り込み法による探索範囲の絞りこみである。 $d(i_0, j)$ を $i_0 + j$ で割っているのは、 $d(i_0, i_0 - 1)$ の方が $d(i_0, 0)$ より大きくなりやすいことを考慮し、原点から (i_0, j) までの市街地距離で DP マッチングの累算距離を割ることによって、累積距離を均すためである。また、刈り込みは定期的におこなうものとする。

3.2 分割法

特徴点 (主にエッジ) を利用することによって、計算量を減らす手法がある。この場合、左右の画像において十分に対象物体の特徴点を抽出することが必要である。特徴点を十分に抽出できない場合、細かな3次元情報を抽出できず、精度の高い距離計測は得られない。また、適切にマッチングさせることができない場合、大きな誤差を生むことになる。本研究において提案する分割法も特徴点を適切にマッチングさせることが必要であるが、あくまで DP マッチングの探索範囲の絞りこみのために特徴点を利用するため、特徴点の数は問わない。仮に特徴点を全く抽出しなかった場合は、通常の DP マッチングをおこなうのと同じ結果が得られる。以下、分割法の手順を示す。

まず、左画像における特徴点を抽出する。ピクセル間における輝度の変化に対するしきい値 c を定め

$$\begin{cases} |L_h^R(i) - L_h^R(i-1)| > c \\ |L_h^G(i) - L_h^G(i-1)| > c \\ |L_h^B(i) - L_h^B(i-1)| > c \end{cases} \quad (8)$$

のいずれかを満たす点を複数個求める。求めた点を特徴点とする。ただし、特徴点どうしの間隔は i_{int} 以上になるようにする。すなわち、左画像上の左から n 番目の特徴点を i_n として、

$$i_n - i_{n-1} > i_{int} \quad (9)$$

とする。次に、求めた左画像上の特徴点に対し右画像上の

点をマッチングさせる．マッチングの距離を \hat{d} として，

$$\hat{\mathbf{L}}_h(i) = \begin{pmatrix} L_h^R(i-\xi) \\ L_h^G(i-\xi) \\ L_h^B(i-\xi) \\ \vdots \\ L_h^R(i) \\ L_h^G(i) \\ L_h^B(i) \\ \vdots \\ L_h^R(i+\xi) \\ L_h^G(i+\xi) \\ L_h^B(i+\xi) \end{pmatrix}, \quad \hat{\mathbf{R}}_h(j) = \begin{pmatrix} R_h^R(j-\xi) \\ R_h^G(j-\xi) \\ R_h^B(j-\xi) \\ \vdots \\ R_h^R(j) \\ R_h^G(j) \\ R_h^B(j) \\ \vdots \\ R_h^R(j+\xi) \\ R_h^G(j+\xi) \\ R_h^B(j+\xi) \end{pmatrix} \quad (10)$$

とし，

$$\hat{d}(i, j) = \|\hat{\mathbf{L}}_h(i) - \hat{\mathbf{R}}_{p_h}(j)\| \quad (11)$$

とする． ξ は画像上における画素の幅であり，マッチング距離の算出に使用する画素の幅は $2\xi+1$ となる． $j(k) \leq j(k+1)$ ，であるから，右画像上の左から n 番目の特徴点を j_n とすると $j_{n-1} \leq j(n)$ である．また $j(k) < i(k)$ であるから，特徴点の探索範囲は $j_{n-1} \leq j < i_n$ となる (図 3)．以上から，

$$j_n = \min\{\hat{d}(i_n, j) \mid j_{n-1} \leq j < i_n\} \quad (12)$$

を満たす j_n を特徴点とする．この特徴点を用いて，DP マッチングの探索範囲は n 番目の領域の範囲を

$$\begin{cases} i_{n-1} \leq i < i_n \\ j_{n-1} \leq j < j_n \end{cases} \quad (13)$$

として， $0 < n \leq N$ とする (図 4)．ただし， N は $i_N = I-1$ を満たす．

4. 実験

4.1 近似をおこなわない場合の精度と計算時間

まず，近似をおこなわずにステレオ計測をおこなった場

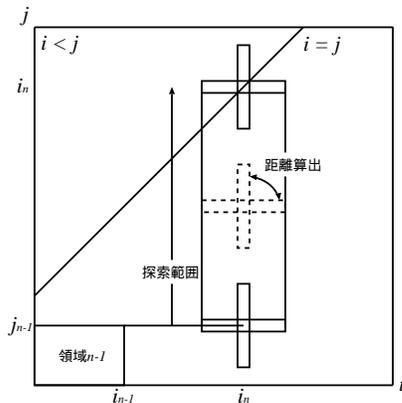


図3 特徴点の探索

合の性能を示す．

実験に使用した画像は図 5 である．画像の高さ H は 480[pixel]，画像の幅 I および J は 640[pixel] である．カメラと対象物体の位置関係は図 6 の通りである．計測をおこない，計測結果の検証をおこなう．計測結果から，対象物体を 3 次元表示したものが図 7 である．精度検証の対象となる部分だけを表示している．また，計測の誤差をグラフにしたものが図 8 である．縦軸を実際の計測に対する相対誤差 [%] とし，横軸を画像左端からの距離 i [pixel] としている．図中のグラフ Error1 は，カメラと対象物体の実際の距離に対する相対誤差であり，グラフ Error2 は，目視によるマッチングにより算出した距離に対する相対誤差である．双方のグラフとも，複数の走査線における相対誤差の平均値を用いている．

対象領域における相対誤差の平均は Error1 の場合は 2.1[%] であり，Error2 の場合は 0.53[%] となっていた．図 8 からわかるように，相対誤差が突出して大きい部分がある．これは対象物体の境界部分，すなわち段差の部分で誤差を出しているためである．境界部分を除いた場合，領域全体での相対誤差の平均は Error1 の場合は 1.8[%] であり，Error2 の場合は 0.37[%] となっている．また，対象物体の左側の部分 ($i = 150$ 付近) でも Error1 では比較的大きな誤差が見られる．ただし，Error2 では誤差がそれほど大きくない．この部分で発生している誤差は，マッチングの失敗によるものではなく，撮影に起因する誤差である．

4.2 刈り込み法の精度と計算時間

同じ画像を用いて刈り込み法の性能の検証をおこなう．刈り込み法において，次回の刈り込み (式 (7) の適用) までの幅を w とおく． w の値が小さい場合，頻繁に刈り込みをおこなうことになり，計算時間は短くなるが頻繁な近似のために精度が落ちることが予想される．逆に w の値が大きい場合，刈り込みの頻度が少ないために，計算時間はさほど短くならないが精度は維持しやすいことが予想できる． $w \geq I$ は刈り込みをおこなわないこと，すなわち

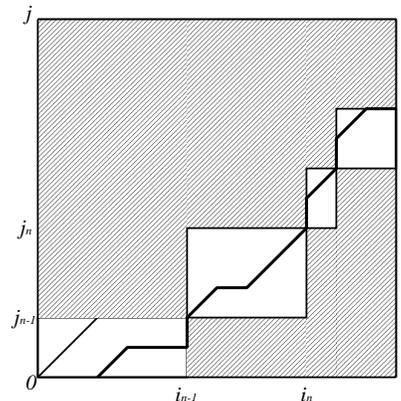


図4 分割法



(a) 左画像



(b) 右画像

図5 実験に用いた画像

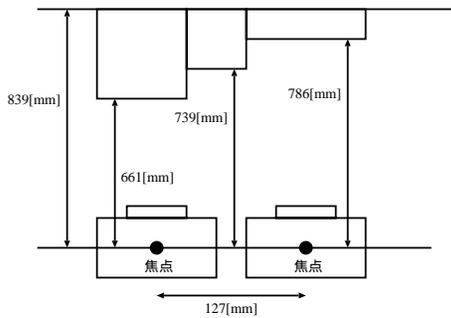


図6 対象物体の位置関係



図7 結果画像

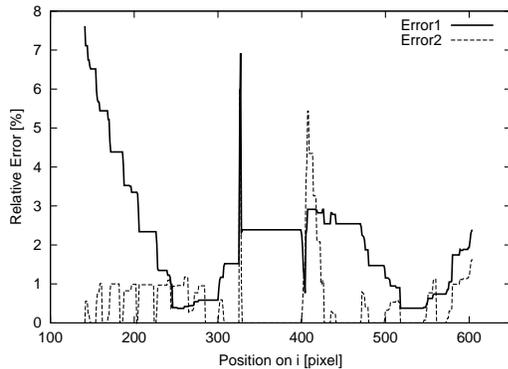


図8 測定の相対誤差

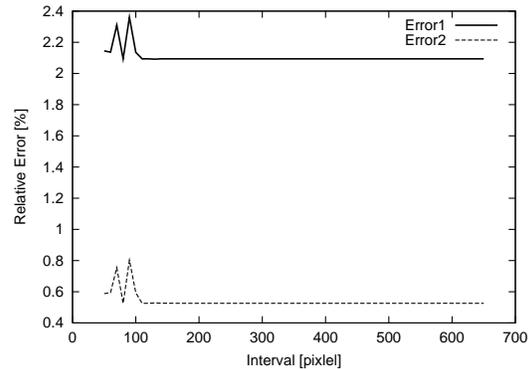


図9 刈り込み法における測定誤差の平均値

近似をおこなわないことを意味する．この刈り込みの幅 w を 50[pixel] から 10[pixel] 刻みに 650[pixel] まで変化させたときの精度と計算時間を実験により確認した．

距離計測の精度がどの程度変化しているかをあらわしたグラフが図9である．相対誤差の平均値の変化のグラフであり、縦軸が相対誤差 [%]、横軸が w [pixel] となっている． $w \geq 110$ のあいだ、精度を維持できていることがわかる．

次に、計算時間の変化をあらわしたグラフが、図 10 である．これは、画像全ての走査線の最適パスを求めるのに要した時間を 1 とした場合の計算時間の変化のグラフである．縦軸が計算時間の割合、横軸が w [pixel] となってい

る．最適解の精度を維持した場合、最大で ($c = 110$ のとき) 1/2 程度の計算時間を削減していることがわかる．

4.3 分割法の精度と計算時間

分割法の精度と計算時間を同じ画像を用いた実験により検証する．特徴点の間隔を制御する i_{int} を 50 から 650 まで 50 刻みで変化させ、特徴点探索のためのしきい値 c を 0 から 250 まで 10 刻みで変化させる．各 i_{int} ごとに誤差の平均値を求め、その推移をあらわしたものが図 11 である．刈り込み法と同様に Error1 および Error2 の平均値の変化である．本実験では、300 としたとき最も精度が良かった． $i_{int} = 300$ として、特徴点抽出のためのしきい値 c を変化

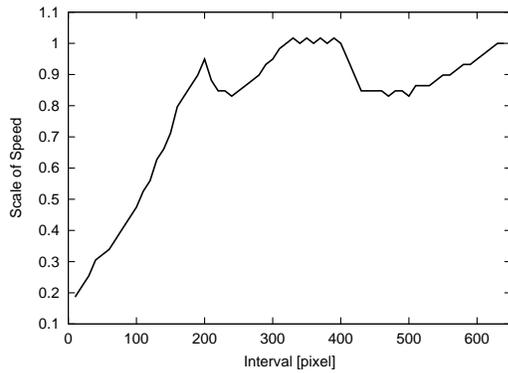


図 10 刈り込み法における計算時間

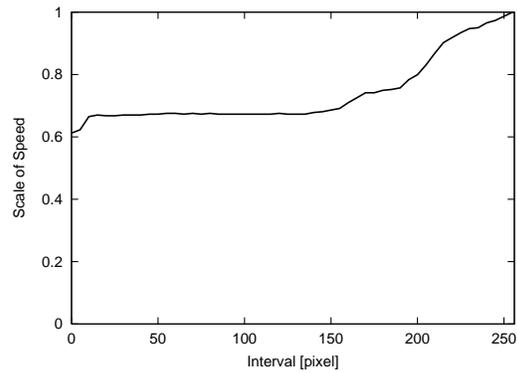


図 13 分割法における計算時間

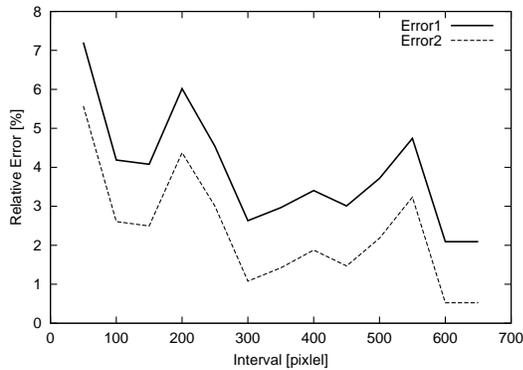


図 11 分割法における測定誤差の平均値

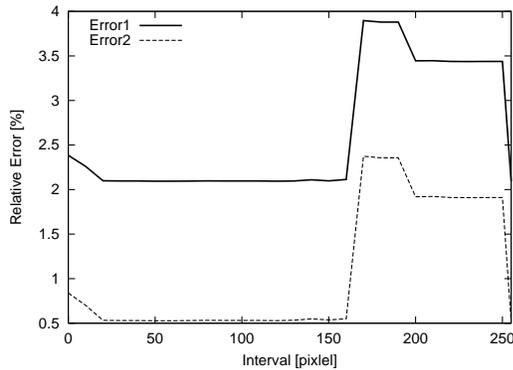


図 12 分割法の $i_{\text{int}} = 300$ における測定誤差の平均値

させたときの、精度の変化をあらわしたものが図 12 である。しきい値 $c = 255$ のときが近似を用いない場合である。 $10 \leq c \leq 160$ において、近似を用いない場合とほぼ同程度の精度を得ることができている。特徴点の数を減らせば、すなわち c の値が大きければ精度を維持しやすいと考えられるが、必ずしも精度を維持できるわけではない。分割法では、精度は特徴点のマッチングの結果に大きく依存するためである。そのため、特徴点抽出の際には最適なパラメータを設定する必要がある。

計算時間の変化のグラフが図 13 である。特徴点の数が少ないため、探索範囲は計算時間はさほど短縮されていない。

い。ただし、逆に特徴点を 1 つでも確実に抽出し、マッチングさせることができれば、高精度を維持したまま計算時間を短縮できることがわかる。

5. ま と め

本論文では、DP マッチングを用いた高精度の 3 次元情報抽出手法に対する近似手法を提案した。さらに、実験によってその性能評価をおこなった。

近似手法としては、マッチングの途中で最適パスを推定し、探索範囲を絞り込む刈り込み法と、輝度変化の大きい点を特徴点とし、特徴点のマッチングを事前におこなうことで探索範囲を絞り込む分割法の 2 つの手法を提案した。

性能については、まず近似手法を全く用いない場合、今回の実験画像からは相対誤差 2.1[%] の結果が得られた。この精度を維持したまま、刈り込み法では最大で計算時間を 1/2 近くまで短縮することができた。また、分割法では特徴点のマッチングの結果に精度が大きく左右されるが、精度を維持できた場合、最大で計算時間を 2/3 近くまで短縮することができた。

文 献

- [1] 大田友一, 正井康之, 池田克夫, “動的計画法によるステレオ画像の区間対応法,” 信学論 (D), Vol. J68-D, No. 4, pp. 554–561, Apr. 1986.
- [2] O.Faugeras, B.Hotz, H.Mathieu, T.Viéville, Z.Zhang, P.Fua, E.Théron, L.Moll, G.Berry, J.Vuillemin, P.Bertin, C.Proy, “Real time correlation-based stereo: algorithm, implementations, and applications,” Rapport de recherche N° 2013, INRIA, 1993.
- [3] 鈴木高彦, 鈴木寿, “重み付き複数走査線を用いたステレオマッチング,” 第 26 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp. 237–240, Dec. 2003.
- [4] 藤井実, 松山泰男, “動的計画法を用いたステレオマッチングにおける順序逆転問題の一解法,” 信学論 (D-II), Vol. J79-D-II, No. 5 pp. 775–784, May. 1996.
- [5] 迫江博昭, 藤井浩美, 吉田和永, 亘理誠夫, “フレーム同期化, ビームサーチ, ベクトル量子化の統合による DP マッチングの高速化,” 信学論 (D), Vol. J71-D, No. 9, pp. 1650–1659, Sep. 1988.