

画素を単位とした視差補償に基づくステレオ画像圧縮の検討

原 学[†] 内田誠一[‡] 迫江博昭[‡]

[†]九州大学大学院システム情報科学府,
[‡]九州大学大学院システム情報科学研究院

あらまし 本稿では画素を単位とした視差補償を用いたステレオ画像圧縮手法を検討する。画素を単位とすることで、従来のブロックベースでの視差補償を用いた圧縮手法よりも残差の符号量を低減できる。一方、視差の符号量が増加するが、この問題に対して視差に制約条件を加えることで符号量を抑えることを提案する。以上の手法について、視差および残差の符号量を更に低減するための2つの改良を加える。第1は、オクルージョン領域において同一画像上の隣接画素との残差を取得する方法(前値予測)に切り替えるという改良である。第2は、カメラの進行方向に対して垂直方向に長いブロックを単位として視差補償を行うという改良である。実際にステレオ画像を用いて実験を行ったところ、本手法の有効性を確認できた。

A Data Compression Technique for Stereopairs Using Pixel-Based Disparity Compensation

Manabu Hara[†] Seiichi Uchida[‡] Hiroaki Sakoe[‡]

[†]Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University,
[‡]Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

Abstract: In this paper, we describe a data compression technique for stereopairs using pixel based disparity compensation (DC). The bit-rate of prediction residual of the proposed pixel-based DC is lower than that of block-based DC, which is used commonly. Although the bit-rate of disparity is high on the pixel-based DC, we can solve this problem applying several restrictions to DC. It is also shown that the performance of the proposed technique can be improved by the following two modifications. Firstly, the neighboring pixel of the same image is used for the prediction around occlusion. Secondly, instead of pixels, long-sized blocks are employed as the unit of DC. The effectiveness of the proposed technique is observed through experiments.

1 はじめに

本稿ではステレオ画像圧縮の一方式を提案する。ステレオ画像は、同じ物体を異なる角度で撮影したものであるため、左右画像の同一エピポーラ線上に近い値を持つ画素対が多く存在する。既存のステレオ画像圧縮技術 [1]–[8] の多くはこの性質を利用している。具体的には、これらの画素対には撮影された物体の奥行きに応じた視差が存在する

のでこの視差を推定し、それを補償しながら予測に用いる画素を決定することで結果的に予測残差の符号量を大幅に低減できる。

従来のステレオ画像圧縮手法では、ブロックベースで視差補償を行っている。似通った画素群を持つブロック同士を一括に対応付けるため、視差の符号量を小さくできるが、その一方で視差境界付近等で残差の符号量が大きくなってしまいう問題

題がある。

これに対して、本稿では画素レベルで視差補償を行う手法を提案する。画素レベルで視差補償を行うため、ブロックベースでの視差補償より残差の符号量を低減できる。これに伴い増加する視差の符号量については、視差に制約を加えることで視差の符号量の低減を目指す。

本報告では、以上の画素レベル視差補償法の提案に加え、次の2点の改良による視差と残差の符号量の更なる低減についても検討する。

第1は、オクルージョン領域など適切な対応点のない画素について、同一画像上の隣接画素との残差を取得する方法(前値予測)に切り替えるという改良である。例えば、オクルージョン領域の画素には対応する画素が存在しないため、左右のエピポーラ線上で視差補償を行っても残差が大きくなってしまう。そこで、そうした画素については適宜前置予測に切り替えることで残差を最小化する。この手法は、オクルージョン領域だけでなくノイズなどが原因で対応する適切な画素が存在しない場合にも有効と考えられる。

第2は、カメラの進行方向に対して垂直方向に細長いブロックを単位として視差補償を行うという改良である。本手法ではカメラの平行移動によって撮影されたステレオ画像を圧縮対象とするため、垂直方向に同じ位置にある画素群の視差は等しい可能性が高い。従って、視差が等しい可能性の高い画素群を単位として視差補償を行うことで、残差の増加を抑えつつ視差の符号量を低減できる。

本手法は1つの視差補償法であり原理的に可逆圧縮にも非可逆圧縮にも適用できるが、本稿ではこれを可逆圧縮の枠組みで評価する。具体的には、符号量を用いた評価を行う。なお本手法を非可逆圧縮に適用する場合は、SN比 [2][3] および3次元情報復元精度に関する主観評価 [4][5] 等の評価手段が考えられるが、いずれも今後の課題と考えている。

2 画素レベルの視差補償

本手法では、左右同一のエピポーラ線上から最も近い値を持つ画素対を求めるために画素レベルで視差補償を行う。画素レベルで視差補償を行うため、ブロックベースで視差補償を行うよりも原理的に高い精度の視差補償が可能である。従って、残差を小さくできるため、残差の符号量の大幅な低減を期待できる。

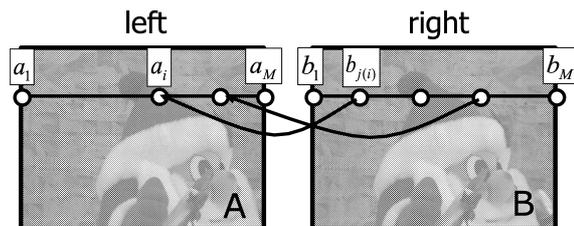


図 1: 視差関数による画素の対応付け

```

/* Initialization */
1  g(1,1) = ||a1 - b1||

/* DP-Recursion */
2  for i = 2 to M do begin
3    for j = 1 to M do begin
4      g(i,j) = ||ai - bj|| + minp=0,1,2 g(i-1,j-p)
5      p(i,j) = arg minp=0,1,2 g(i-1,j-p)
6    end
7  end

/* Backtrack operation */
8  j = M
9  for i = M downto 2 do begin
10   Δai = ai - bj
11   Δj(i) = p(i,j)
12   j = j - Δj(i)
13 end
14 Δa1 = a1 - b1

```

図 2: DP アルゴリズム

2.1 視差関数の定義

左の画像を A 、右の画像を B とする。以下では右画像 B は別途何らかの方法で符号化されるものとし、左画像 A の符号化について考える。画像 A と画像 B の第 l 行 ($1 \leq l \leq L$) の画素値系列をそれぞれ $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_M$, $b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_M$ とそれぞれ表す。ここで a_i および b_j はそれぞれ RGB 成分よりなる 3 次元ベクトルとする。また、いずれも同一エピポーラ線上にあるものとする。左画像 A と右画像 B には、撮影された物体の奥行きに応じた視差がある。そこで、視差関数を用いて視差補償を行う。視差関数とは、エピポーラ線間の最大一致を与えるマッチングである。これを視差関数 $j = j(i)$ として表す。視差関数 $j(i)$ により a_i は $b_{j(i)}$ に対応付けられる (図 1)。

視差関数 $j(i)$ による画素対応の結果を用いて、画素 a_i の予測残差を

$$\Delta a_i = a_i - b_{j(i)} \quad (1)$$

と定義する． エントロピー符号化を行うためにはこの残差を小さく， すなわち Δa_i を 0 付近に集中させる必要がある． 従って， 視差関数 $j(i)$ の最適化の基準を以下のように定める．

$$\sum_{i=1}^M \|a_i - b_{j(i)}\| \rightarrow \text{minimize} \quad (2)$$

この基準により， 視差関数によって対応付けられる画素間の残差が同一エピソード線間で最小化される．

2.2 視差の制約

本手法は各画素について視差情報を伝送する必要があるため， 結果的にブロックベースの視差補償よりも視差の符号量が大きくなる． そこで， 視差の符号量を低減させるため， 視差差分 $\Delta j(i) = j(i) - j(i-1)$ に次の単調連続性制約を課する．

$$0 \leq \Delta j(i) \leq 2 \quad (3)$$

この制約下では， 最悪のケースでも視差差分の符号量は $\log_2 3$ ビット/画素に抑え込める．

視差関数 $j(i)$ を最適化した後， 実際の符号化器ではこうして得られた Δa_i と $\Delta j(i)$ をエントロピー符号化したものを全ての i について送信する． 復号の際は， $\Delta j(i)$ から $j(i)$ を復元し， Δa_i と別途送信されている b_j から a_i を復元すればよい． このように復号の際は DP による視差最適化を行う必要はなく， 非常に高速な処理となる．

2.3 DP による最適視差の決定

同一エピソード線上の画素間の視差関数決定問題， すなわち制約条件 (3) の下での目的関数 (2) の最小化問題は， 動的計画法 (DP) により効率的に解くことができる [9]．

最適な視差関数 $j(i)$ および対応する残差 Δa_i を求めるための DP アルゴリズムを図 2 に示す． ここで， $g(i, j)$ および $p(i, j)$ はワークエリアである． ステップ 4 のいわゆる DP 漸化式を計算していくことで， 最終的に $g(M, M)$ として目的関数 (2) の最小値が得られる． ステップ 8 以降はバックトラック処理と呼ばれるもので， 計算済みのワークエリア $p(i, j)$ を用いて， $i = M$ から 1 まで遡りながら， $j(i)$ ， $\Delta j(i)$ ， Δa_i を求めている．

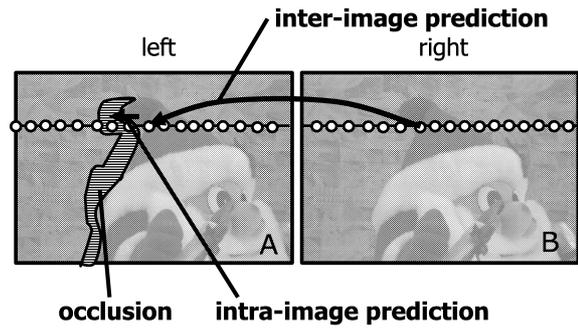


図 3: 予測方式の切替

3 予測方式の自動切替

本節では残差符号量のさらなる低減をねらった， 予測方式の自動切替について述べる． 例えばオクルージョン領域では， 左右画像上に対応する画素対が存在しないため， 前節の手法により左右のエピソード線上で視差補償を行っても残差が大きくなってしまふ． また， ノイズや照明条件によって， 本来対応すべき画素であってもその輝度値は大きく異なる場合もある． そこで， これまで述べてきたもう一方の画像から予測する方法と， 同一画像上の隣接画素との残差を用いて予測する方法 (前値予測) とを自動的に切り替える手法を提案する (図 3)． これにより， オクルージョン領域などで適切な対応画素が右画像 B 上にない場合には同一画像 A から予測画素が選ばれ残差を小さくできる．

以上の予測切替を組み込んだ DP アルゴリズムを図 4 に示す． 各 i において前値予測による残差 $\Delta a_i = a_i - a_{i+1}$ の絶対値が視差関数による対応画素との残差 (1) の絶対値よりも小さければ， そちらを選ぶように漸化式を変更する． すなわち， 図 2 のステップ 1, 4 において， 前値予測による残差とステレオ予測による残差 (1) の大小関係を判断する． そして， ステップ 10, 14 のバックトラック処理において， 計算済みのワークエリア $f(i, j)$ を用いた予測切替を行い， Δa_i を求める． このように DP アルゴリズムによって， 前値予測への切替が残差最小化の枠組みで統一的にかつ自動的に処理できる．

4 縦ブロック化

本節では視差符号量のさらなる低減をねらって， ある程度の精度を保ちながら部分的にブロックマッチングの考えを採用した， 対応付けの縦ブロック化について述べる．

```

/* Initialization */
1 if  $\|a_1 - b_1\| < \|a_1 - a_2\|$  then
     $g(1,1) = \|a_1 - b_1\|$ 
     $f(1,1) = 0$ 
else
     $g(1,1) = \|a_1 - a_2\|$ 
     $f(1,1) = 1$ 

/* DP-Recursion */
2 for  $i = 2$  to  $M$  do begin
3   for  $j = 1$  to  $M$  do begin
4     if  $\|a_i - b_j\| < \|a_i - a_{i+1}\|$  then

        /* Inter-image prediction */
         $g(i,j) = \|a_i - b_j\|$ 
          +  $\min_{p=0,1,2} g(i-1, j-p)$ 
         $f(i,j) = 0$ 
      else

        /* Intra-image prediction */
         $g(i,j) = \|a_i - a_{i+1}\|$ 
          +  $\min_{p=0,1,2} g(i-1, j-p)$ 
         $f(i,j) = 1$ 
5      $p(i,j) = \arg \min_{p=0,1,2} g(i-1, j-p)$ 
6   end
7 end

/* Backtrack operation */
8  $j = M$ 
9 for  $i = M$  downto 2 do begin
10  if  $f(i,j) = 0$  then
     $\Delta a_i = a_i - b_j$ 
    if  $f(i,j) = 1$  then
     $\Delta a_i = a_i - a_{i+1}$ 
11   $\Delta j(i) = p(i,j)$ 
12   $j = j - \Delta j(i)$ 
13 end
14 if  $f(1,1) = 0$  then
     $\Delta a_1 = a_1 - b_1$ 
    if  $f(1,1) = 1$  then
     $\Delta a_1 = a_1 - a_2$ 

```

図 4: 予測切替を組み込んだアルゴリズム

本手法はカメラの平行移動によって撮影されたステレオ画像を圧縮対象とするため、カメラの移動方向と垂直に同じ位置にある画素同士の視差は類似している可能性が高い。そこで、横幅が1の垂直方向に長い縦ブロックを単位として視差補償を行うことを考える(図5)。具体的には、その際、隣接縦ブロック間に式(3)と同様の単調連続性制約を課する。これらによって残差の増加を抑えつつ

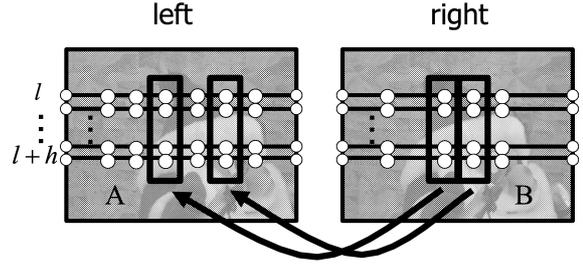


図 5: 縦ブロックベースの視差補償

視差の符号量を小さくできる。画像 A を一定の大きさの縦ブロックに分割し、各ブロックを単位として対応する縦ブロックを画像 B から水平方向にブロック間残差の絶対値の総和が最小となる部分を DP により探索する。

5 実験

本手法の比較評価実験を行った。本手法は可逆圧縮であるため、実験には客観的評価基準である符号量を用いた。

5.1 使用画像

比較実験では、Czech Technical University の Web 上で公開されている画像 (grove)[10]、筑波大学多視点画像データベース (sant)、および実際にカメラを用いて撮影したステレオ画像 (arm, scene, room) を用いた。カメラは Point Grey Research 社 [11] の Bumblebee BB-COL-60 を用いた。図 6 に実験で用いた画像を示す。なお、筑波大のデータベースには他のデータも準備されているが、実験結果はほぼ同一傾向であったので略す。

5.2 比較対象

比較評価の対象として以下に述べるブロックマッチング法 [1] を用いた。

まず画像 A を一定の大きさのブロックに分割し、各ブロックを単位として対応するブロックを画像 B から探索する(図 7)。ブロックの探索は、次式のような二乗誤差が最小となるように行う。

$$\sum_l \sum_m \|a_{l,m} - b_{l+j(k),m}\|^2 \quad (4)$$

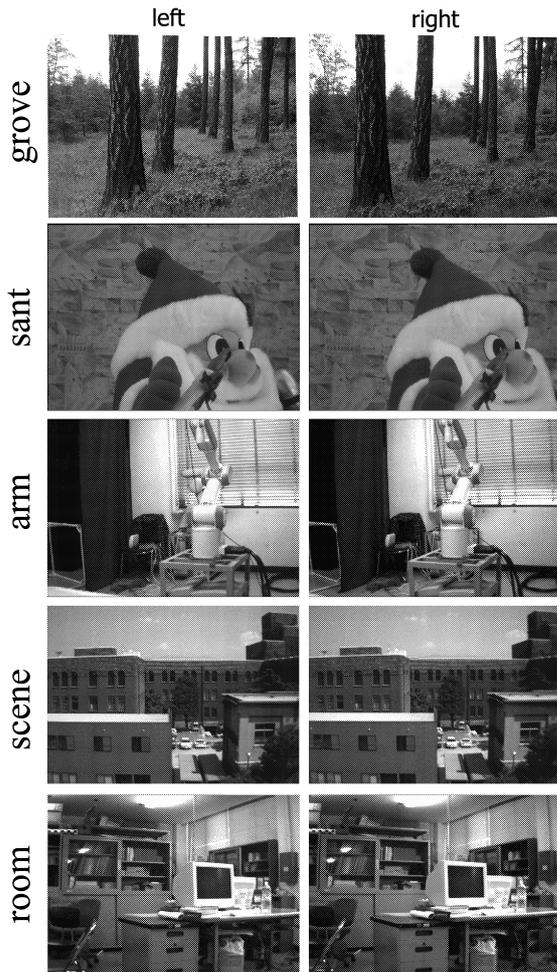


図 6: 実験で用いた画像

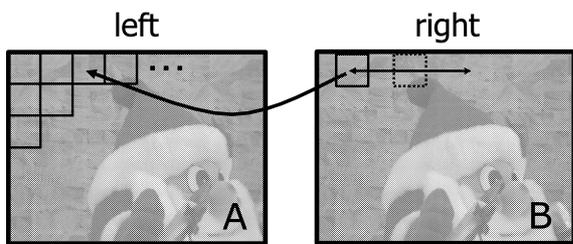


図 7: ブロックマッチング法

ここで、 $a_{l,m}$, $b_{l,m}$ は画像 A, B それぞれのブロック内に位置する第 l 行 m 列目の画素値、 $j(k)$ は第 k 番目のブロックの対応関係を表す視差関数である。探索をブロック単位で行うため、差分の符号量が大きくなる反面、視差の符号量が小さいため全体の符号量を小さくできる。

さらに 3 節および 4 節で述べた改良の効果を見るために、表 1 のように予測切替あるいは縦ブロック化のいずれか一方を、画素単位あるいはブロック

表 1: 実験で用いた比較手法

	pixel based DC (sec 2.1)	constraint (sec 2.2)	prediction Switching (sec 3)	stripping (sec 4)	block based DC (sec 5.2)
block matching					○
method0	○	○	○	○	
method1	○	○			
method2	○	○	○		
method3	○	○		○	
method4	○		○	○	

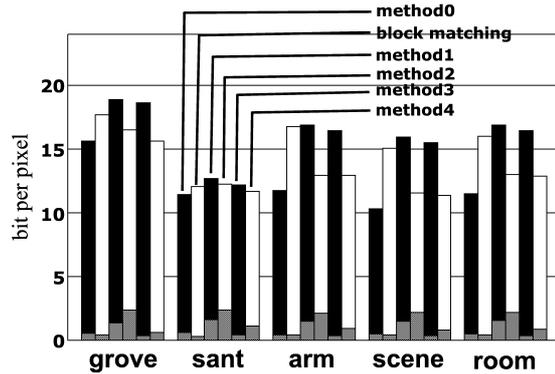


図 8: 各手法による符号量

単位の視差補償にそれぞれ組み込んだ手法についても比較実験を行った。

5.3 評価基準

本実験では、本手法を可逆圧縮の枠組みにおいて利用し、符号量を用いて評価した。評価基準として左画像の 1 画素当りの符号量を用いた。具体的には左画像に対して、残差、視差差分独立にハフマン符号化を行い、全画素分の残差符号量、視差差分符号量を算出した。それにハフマン木のための符号量を加算して、全画素数で除したものを評価基準とした。

5.4 結果と考察

各手法による符号量を図 8 に示す。各棒グラフにおいて上側が残差の符号量、下側が視差の符号量である。また、実験でのブロックサイズは、縦ブロックベースの視差補償では 4×1 、それ以外の場合では 4×4 とした。

実験の結果、画素単位の視差補償を行う基本手法 (method1) ではブロックマッチング法より劣ったものの、これに予測切替と縦ブロック化の 2 つの

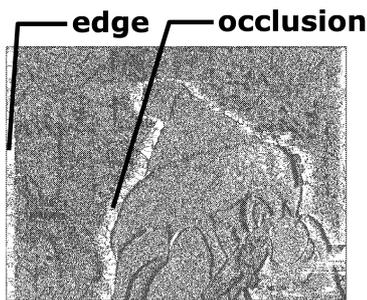


図 9: 前値予測切替が行われた領域

改良を加えた手法 (method0) はブロックマッチング法よりも符号量が平均で 3.19bpp 小さくなった。この理由として以下の 3 つが考えられる。

第 1 に、視差に制約条件を加えたことにより視差の符号量が低減できたことが考えられる。実際、視差に制約条件を加えない method4 と比べて、視差に制約条件を加えた method0 では視差の符号量が平均で 0.29bpp 低減している。

第 2 に、予測切替によって予測残差を極小化できたことが考えられる。実際、予測切替が組み込まれていない method1 と比べて、予測切替が組み込まれている method2 では残差の符号量が平均で 3.63bpp 低減している。図 9 は、sant 画像における予測切替の結果、前値予測 (intra-image prediction) が選択された画素を白色で示したものである。この図を見ると、特にオクルージョン領域や画像の端部といった対応する画素が存在しない領域で前値予測切替が行われていることが分かる。なお、図 8 のグラフには示していないが、ブロックベースの視差補償に予測切替を組み込んで、method0 より性能的に劣ることを確認している。このことは、ブロックベースの視差補償に予測切替を加えるよりも、画素ベースの視差補償に予測切替を加えた方が相性がよいことを示唆していると言える。

第 3 に、縦ブロックベースの視差補償によって、残差の符号量の増加を抑えつつ視差の符号量を低減できたことが考えられる。実際、画素レベルで視差補償を用いた method1 と比べて、ブロックベースの視差補償を用いた method3 では残差の符号量が 0.74bpp 増加しているが、視差の符号量は 1.1bpp 低減している。このことは、視差は縦ブロック内 (同一水平位置) において類似していることを裏づけていると言える。

6 結論

本稿では、画素を単位とした視差補償に基づくステレオ画像可逆圧縮手法を提案し、さらに予測切替と縦ブロックベースの視差補償を組み込むことで圧縮性能の向上を図ることを提案した。そして、本手法の評価実験を行い、従来法であるブロックベースの視差補償に比べて符号量を 1 画素当たり平均で 3.38bpp 低減できたことを確認した。この理由として以下の 3 つが考えられる。第 1 に、視差に制約条件を加えたことにより視差の符号量が低減できたことが考えられる。第 2 に、予測切替によって残差を極小化できたことが考えられる。第 3 に、縦ブロックベースの視差補償によって、残差の符号量の増加を抑えつつ視差の符号量を低減できたことが考えられる。

参考文献

- [1] M. G. Perkins, "Data Compression of Stereopairs," *IEEE Trans. on Communications*, vol.40, no.4, pp.684-696, 1992.
- [2] 新井陽介, 岡本教佳, 南敏, "ブロックマッチングを用いたステレオ動画像の符号化," 電子情報通信学会総合大会, D-11-5, March 2000.
- [3] 田中耕平, 福田光一, 川中彰, "視差補償を用いたステレオ画像符号化," 電子情報通信学会総合大会, D-307, March 1996.
- [4] 浜村倫行, 権田晃平, 小泉博一, 相田仁, 斉藤忠夫, "視差情報を用いた多眼 3 次元画像の効率的符号化法," 情報処理学会研究報告 CVIM, no.110 - 004, pp.25-32, 1997.
- [5] 斉藤義孝, 桐澤潔, 涌井秀治, "左右画像共通領域抽出によるステレオ画像符号化," システムソフトウェア大会, D-11-67, Sep. 1997.
- [6] 浜村倫行, 権田晃平, 小泉博一, 相田仁, 斉藤忠夫, "ステレオ画像の視差検出と符号化への応用," 情報処理学会研究報告 CVIM, no.115 - 009, pp.65-72, 1998.
- [7] 赤松秀樹, 奈倉理一, 森本雅和, "多方向撮像ステレオ画像の高効率データ圧縮方式に関する研究," 信学技報, PRMU99-168, pp.21-26, Dec. 1992.
- [8] 山崎浩一, 森本雅和, 奈倉理一, "衛星ステレオ画像データの可逆符号化方式に関する検討," 信学技報, CS98-124, pp.73-78, Dec. 1998.
- [9] 大田友一, 山田博三, "動的計画法によるパターンマッチング," 信学論, vol.30, no.9, pp.1058-1066, Sep. 1989.
- [10] <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/demos/Stereo/New/Matching/smm.html>
- [11] <http://www.ptgrey.com/>