ネットワーク算法による両眼立体視 の対応点決定方法

西谷卓史*・船橋誠壽*

Stereo Matching Method Based on Network Algorithm

Takushi NISHIYA* and Motohisa FUNABASHI*

In this paper we present a stereo matching method based on a network algorithm. The network to transport the characteristic features from one image to another is constructed as an electrical network connected by variable resistors. By this analogy the characteristic features can be considered as electrical current. Using this network, matching problem can be transformed as a computation of current distribution satisfying the constraints for the physical surface. In the step to find the distribution, we utilize the lateral inhibition theory and change iteratively the values of resistors.

Several algorithms were devised for stereo matching, such as a method using correlation coefficient, dynamic programming or the relaxation method. But these methods were not satisfactory because they need vast amount of calculation or they were not capable to obtain enough resolution.

In this paper, the method for detection of corresponding points by means of the network algorithm resolves the deficits of conventional methods. The method is able to use the images or those differences directly, furthermore, by the method a pixel of one image can be matched to any point between the pixels of the other image. Because of these facts, fine resolution can be obtained.

Experimental results are shown to confirm effectiveness of this method to navigate the locomotive vehicle. Although this method is defined on one dimensional, extension to two dimensional is easily performed by use of three dimensional network.

Key Words: stereo matching, network algorithm, lateral inhibition

1. ま え が き

近年、各産業分野において、人間に代わり保守・点検作業を行う自律移動ロボットの要望が高まっている¹⁾。このような自律機能をロボットに持たせるためには、ロボットの移動環境におかれた物体の位置や形状を効率よく認識できるセンサシステムが必須となってくる。このような移動ロボットの外界センサに要求される特性としては、適用できる環境や測定できる距離の範囲が広いこと、さらに、機構的に簡素であってセンシング時間が移動速度に適合していること、などが挙げられる。

しかし、従来開発されている移動ロボットの外界センサは、人工的なマークを利用できる場合を除いて、環境をかなり限定しなければならず、実用とはほど遠い状態にある²⁾。超音波は簡単な障害物の検出などには用いられるが、分解能に問題がある。また、レーザー光・ミリ波を用いる方法は、発射方向の制御や、伝播時間の測定などに大型の装置が必要になる。視覚を用いるものでは、スリット光やパターンの投影による三角測量を用いたものが提案されているが、照明の明るい場所や遠方の物体への適用に難点がある。このような問題点を克服するものとして、受動的なセンシングを行う両眼立体視によるものが有望と考えられる。

立体視による距離測定の試みは数多く発表されている。立体視における最も重要な課題は、左右眼から得られる像から、同じ物体に対する像の対応関係を求めることにある。この対応点決定の手法として種々の手法が提案されている。基本的な手法として、Marrらの提案した Cooperative Algorithm^{3), 7), 8)}と呼ばれている弛緩法によるものやエッジの照合による方

* (株)日立製作所システム開発研究所
川崎市麻生区王禅寺 1099

* Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.,
Kawasaki

(Received February 14, 1985)

(Revised September 2, 1985)

法^{7),8),10)},あるいは動的計画法によるもの⁴⁾などがある。また、左右の像の間で相関の最も高い部分を対応点とする相関法⁵⁾や各々の像から同じ特徴を持つ点を発見して対応を取る特徴照合法⁹⁾などが提案されている。

Cooperative Algorithm は random dot stereo のように2値化された像に対して有効であることが報告されているが、濃淡情報を直接扱うことができないという問題点がある。また、エッジの照合による方法は一種の特徴照合法であり、各種の濃淡画像に有効であることが示されている。しかし、エッジの数により計算時間が大幅に変化するという問題点がある。動的計画法によるものはエッジの強度も考慮できるため、弛緩法を用いたものに較べあいまい性の少ない解が求まるが、画素対画素の対応決定であるため精度が悪いという問題点がある。相関法は、処理に非常に時間がかかる、あるいは、画面間で明るさや形状があまり変化しない場合以外には適用できない。特徴照合法では、物体の認識に十分な特徴点の抽出が困難であるという問題がある。

Marr らの cooperative algorithm は濃淡画像に $F^{\circ}G$ フィルタを作用させ、結果の符号を用いて2値化した後で処理を行う。このため、エッジの強度など特徴量を考慮できないという問題点があった。本論文では、cooperative algorithm と同じ弛緩法にもとづき、しかもエッジの強度が考慮できる方法を報告する。すなわち、対応点の決定とは、対となる一方の画像から他方の画像へと物理的に矛盾なく特徴量を移しかえることであると考え、この移しかえのために、特徴量を電流値と考えた抵抗回路網を考え、抵抗値の更新のために、生体系の情報処理様式である側抑制理論⁹⁾を用いた手法を提案する。

2. ネットワーク算法^{11),12)} によるステレオ対応探索

本章では、ステレオ対応探索における拘束条件と、それを満たした対応点決定を行うためのネットワークの構成方法、具体的な計算手順について述べる。

2.1 対応探索における拘束条件

ステレオ対応探索においては、物理的な表面のもつ単純な性質により、問題を十分に限定することができる⁷⁾。その性質とは、

(1) Uniqueness: 物理的表面上の

ある一点は、どの時点においても、ただ一つの3次元配置しか持たない。

(2) Continuity: 表面上での奥行きの変動は一般に滑らかであり、しかも不連続的な変化は境界線のところでしか生じない。

ということである。さらに Marr らは、2値化された像においては、

(3) Compatibility: 黒い点は黒い点としか対応しない。

という拘束条件も導入し、以上三つの拘束条件を満足する対応点は、実際の対応点と一致する、という仮説を立てた。

次節以下では、濃淡画像情報を用いて対応点を効率的に求めるための、可変抵抗で接続された回路網を提案する。さらに、この回路網上において前記拘束条件を満足する電流分布を求める方法について述べる。

2.2 ネットワークの構成

本論文で扱うステレオ対は、左右の像は十分接近した位置から撮影されており、両画像間の差は非常に小さいとする。また、両画像は、左右の画像面が左右のカメラのレンズ中心を結ぶ線分 (base line) に平行になる位置で撮影されており、視線投影線 (epipolar line) は画像の走査線に一致しているものとする。

このような条件のもとでは、左右一对の走査線上での対応探索を各走査線毎に独立に行えばよいことになる。この探索を、左右の走査線をそれぞれ横軸・縦軸とする2次元の平面上で、対応づけを示すパスを探す問題として考える。

Fig. 1 (a) に示すような抵抗回路網を考える。縦軸・横軸に右眼像と左眼像の一对の走査線上の各画素を対応づけ、各画素から抵抗回路網に電流を流す電圧

Fig. 1 (a) The structure of the network for stereo matching
(b) Pattern of weighting factor to change the value of variable resistors

源 (ER_i , EL_j) を設定する。左右の像の対応点を求めることはこの電圧源と可変抵抗 (R_{ij}) の値を調節することにより、各画素の持つ特徴量に相当する電流値 (IR_i , IL_j) を、右眼の像から左眼の像へと、前節の三つの拘束条件を満足させながら移しかえるときの電流分布を求めればよいことになる。

2.3 計算手順

Fig. 1(a) のネットワーク上では次のオームの法則が成立しなければならない。

$$\begin{cases} IR_i = \sum_{j=i-s}^{i+s} x_{ij} & (i=1, 2, \dots, m) \\ IL_j = \sum_{i=j-s}^{j+s} x_{ij} & (j=1, 2, \dots, m) \\ ER_i - EL_j = R_{ij} \cdot x_{ij} \\ & (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 x_{ij} は右眼像の i 番目の画素から左眼像の j 番目の画素へと流れる電流値である。また、 s は disparity 方向への回路網の広がりを示す定数である。

対応点の探索は、2.2 節の拘束条件と (1) 式を満足する解を求めればよいことになる。このような解は次の計算手順 (II) ~ (IV) を数回繰り返すことにより求められる。

- (I) 各画素 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m$) に対する初期電位 ER_i^0 , EL_j^0 および各可変抵抗の初期値 R_{ij}^0 を設定する。
- (II) 各可変抵抗を流れる電流値 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, m$) を

$$x_{ij} = (ER_i^0 - EL_j^0) / R_{ij}^0 \quad (2)$$
 により求める。
- (III) 各画素に対する電位 ER_i ($i=1, 2, \dots, m$), EL_j ($j=1, 2, \dots, m$) を

$$\begin{cases} ER_i^{t+1} = ER_i^t + \varepsilon \left\{ IR_i - \sum_{j=i-s}^{i+s} x_{ij}^t \right\} \\ EL_j^{t+1} = EL_j^t - \varepsilon \left\{ IL_j - \sum_{i=j-s}^{j+s} x_{ij}^t \right\} \end{cases} \quad (3)$$

により更新する。ここに ε は適当な補正係数である。

- (IV) 各抵抗値を次式により更新し、ステップ (II) に戻る。

$$R_{ij}^{t+1} = R_{ij}^t - \beta \cdot \sum_{k,l} w(k,l) \cdot x_{k,l} \quad (4)$$

ただし、 $R_{ij}^{t+1} > 10.0$ となる場合は $R_{ij}^{t+1} = 10.0$ 、また $R_{ij}^{t+1} < 1.0$ となる場合は $R_{ij}^{t+1} = 1.0$ とおきかえる。(4)式で、 $w(k,l)$ は電流値 $x_{k,l}$ に対する重み係数であり、これについては後に詳述する。また β は適当な補正係数である。

以上の手順から電流分布が求められれば、対応点は

次式により求めることができる。

$$\begin{cases} d_i = \frac{\sum_{j=j_m-a}^{j_m+a} (j-j_m) |x_{ij}|}{\sum_{j=j_m-a}^{j_m+a} |x_{ij}| + j_m} \\ j_m = \{j; \max |x_{ij}|, j=i-s, \dots, i+s\} \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 d_i : 右眼像の i 番目の画素と対応する左眼像の画素番号

s : ネットワークの幅を示す定数

a : 対応点を求める幅を示す定数

(5)式は、右眼像の i 番目の画像と接続されているノードから、電流値が最大のものを選び、このノードを中心とする $\pm a$ の幅以内にあるノードの電流値に対し、ノード間の距離を重みとして加重平均を示している。

繰返し計算における (I) の初期値設定は次のように行う。 ER_i および EL_j は、繰返し計算の終了時は IR_i , IL_j に近い値となるため、 $ER_i^0 = IR_i$, $EL_j^0 = IL_j$ として与える。 R_{ij}^0 は最も coarse な画像 (これについては後に詳述する) に対する計算の開始時には、 $R_{ij}^0 = 5.0$ と与える。coarse to fine の過程での初期値は、(5)式の計算結果を用い、

$$R_{ij}^0 = 1.0 + (j - d_i)^2 \quad (6)$$

ただし、 $R_{ij}^0 > 10.0$ となる場合は $R_{ij}^0 = 10.0$ として与える。これは対応点の存在する近傍から計算を開始し、収束に必要な計算回数を減らすためである。

収束の判定は、電流値の変化あるいは対応点の変化などのノルムを用いて行うことができる。しかし、この計算もかなりの量となるため、種々の画像に対する実験の結果から十分な繰返し回数と考えられる 20 回の iteration で打ち切ることとする。

2.4 抵抗値の更新方法

本節では 2.1 節の拘束条件を満足させるための抵抗値更新時の重み w について詳述する。

Uniqueness および Continuity を満足させるために Fig. 1(b) に示すような重みづけを考える。この重みづけは生体系における側抑制の考え方に基づくものである。すなわち、ある 1 点 P の抵抗値を更新するには、P の近傍の電流分布を考え、興奮性方向の抵抗を流れる電流値には正の重みづけ、抑制性方向の抵抗を流れる電流値には負の重みづけを行い、それらの総和により更新する量を求める。これにより、抑制性方向に大きな電流値を持つ抵抗があれば、P 点の抵抗値は増大し、興奮性方向に大きな電流値を持つ抵抗があれば、抵抗値は減少し、益々電流値は大きくなってゆく。

この重みづけパターンにより各画素からの電流値は複数の部分に分散することがなく、唯一の画素近傍に

(a) proposed method (b) cooperative algorithm (c) an example of false target

Fig. 2 A comparison with a cooperative algorithm

集中して流れ、Uniqueness を満足する解を得ることができる。また、重みづけパターンを、興奮性の方向に数画素の幅をもたせていることにより、大きい電流値を持つ抵抗があれば、興奮性方向の隣あった抵抗の抵抗値を減少させ、同じ disparity の方向に電流値の大きい抵抗が並ぶようになり、continuity を満足させることができる。

Compatibility は電位の考え方を導入することで満足させることができる。すなわち、電位という概念を導入することにより、右眼像の大きい特徴量を持つ画素は、電位が高く（正の極性を持つ特徴量の場合）なり、対となる画像中の電位の低い（負の極性を持つ特徴量の場合）特徴量を持つ画素との間に大きな電流が流れる。こういう強い流れは、周囲の弱い特徴量に影響されずに対応点が決定される。こういう強い特徴量の matching から順次に弱い特徴量へと対応づけされてゆくために、Compatibility を満足する解が得られる。

以上のように電位と電流という概念を導入した効果を Fig. 2 を用いて具体的に説明する。Fig. 2(a) に示すような特徴量の分布があるとすると、この場合、収束計算の開始時には、図に示したように i_2 から j_2 への電流 $x_{i_2 j_2}$ が大きくなる。計算を繰返すに従い、この $x_{i_2 j_2}$ が他の電流に側抑制の効果を及ぼし、 $x_{i_1 j_2}$ および $x_{i_2 j_1}$ が抑制され、 $x_{i_1 j_1}$ が興奮してゆく。このように大きな電流値を持つ部分が側抑制において大きな役割をすることから収束性の向上とあいまい性の減少という効果を得ることができる。

Marr らの提案した手法では、Fig. 2(b) に示すように 2 値化されたデータを扱うために、それぞれの画素間の結合度が同等に評価されるため、収束性が悪く、あいまい性が残る。Fig. 2(c) のようにエッジ強度の順序が入れ替わっている場合、本論文の方法によれば、 $x_{i_1 j_2}$ が大きな電流値として残り、 i_2 および j_2 が対応する画素は白丸で示す異なる画素に対応づけられる。電流値の大きい対応付けがない場合は occluding があると考えることにより、本論文の方法では

ある程度 occluding の検出も行うことができる。一方、Marr らの方法では Fig. 2(a) と Fig. 2(c) の差異が検出できないため、Fig. 2(c) の場合においても i_1 と j_1 、 i_2 と j_2 という誤った対応付けを行ってしまう。

3. 計算例

本章では、前章で述べた計算

方式を実画像に適用した例について述べる。

3.1 走査線内探索

Fig. 3 に計算に用いた右眼像と左眼像を示す。これらの像はレンズ中心が 10cm 離れた位置から撮影されたものであり、縦横とも 512 画素からなる。また、各画素は 8 bit (256 レベル) の濃淡情報をもつ。

この画像に対し、最初から 1 画素単位の計算を行ってゆくのは、枝数 (1 つの画素から対となる画像に張る枝数 $2s+1$) が非常に多いネットワークを扱う必要が生ずるばかりでなく、誤った対応結果の点も多くなってしまう。このため、ここでは coarse to fine strategy^{5), 10)} を用いている。しかし、これでは誤った対応結果は減少するが、大きいネットワークを最初から扱わねばならない欠点が残る。そこで、coarse to fine の過程では領域毎の平均明るさを用いた計算を、大きい領域を用いたものから、小さい領域を用いたものへと順次繰返すことにする。

Fig. 4 に原画像の下から第 338 番目の走査線のデータを示す。Fig. 4(a) は右眼像、Fig. 4(b) は左眼像である。この走査線に対する対応点の計算結果を Fig. 5 に示す。横軸は右眼像の画素番号であり、縦軸は各画素が対応する左眼像の位置とのずれ量 (画素数) を右方向へのずれを正として表示している。また、ここでは下式に示す微分を行った結果を特徴量 IR_i 、 IL_j として与えている。

$$\begin{cases} IR_i = BR_{i+1} - BR_{i-1} \\ IL_j = BL_{j+1} - BL_{j-1} \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 3 An example of stereo images

Fig. 4 Intensity change for the scanline 338

Fig. 5 The result of applying the algorithm for the scanline

Fig. 6 Applied cross sectional pattern of weighting factor w

Fig. 8 The illustration of the method to consider the consistency across scanlines

Fig. 7 The result for whole image, inconsidering the consistency across scanlines

Fig. 9 The result for whole image, considering the consistency across scanlines

ここに, BR_i : 右眼像の各領域の平均明るさ

BL_i : 左眼像の各領域の平均明るさ

また, 抵抗値更新のための重み係数 w は **Fig. 6** に示すようなガウス分布の Laplacian を, 点線で示すような矩形で近似して用いている. この重み係数は収束の速度に大きな影響を与える. **Fig. 6** に示した係数は, 種々の画像に適用した結果最も良好であったものを示した. この重み係数と収束速度については, 詳細な検討を行い, 別の機会に報告する. **Fig. 5** では微分値が 10.0 以上の部分に対する対応結果を表示し, それ以外の部分はこれを補間している.

この対応点計算結果では, 98 番目の画素付近と, 398 番目の画素付近に誤った対応結果がある. 前者は, occluding すなわち左眼像にあるエッジが右眼像にないために生じたものである. つまり, **Fig. 4** の右眼像のエッジ(イ)は, 正しくは左眼像のエッジ(ロ)に対応するものであるが, 誤ってエッジ(ハ)に対応したものである. 後者は右眼像の弱いエッジが左眼像の強いエッジに対応してしまった結果である. つまり, **Fig. 4** の右眼像の弱いエッジ(ニ)は正しくは左眼像の(ホ)の部分に対応すべきであるが, 周囲の強いエッジ(ヘ)に対応してしまったものである. これは, 側抑制の重みづけパターンの, 興奮性の方向への幅が 3 画素と小さいために, continuity が崩れたものと考えられる.

このようにして, 各走査線毎に独立な対応点の探索を全走査線に施し, 三角測量の原理から奥行き距離を求めた結果を **Fig. 7** に示す. ここで, 奥行きの計算結果は, 右眼像において微分値が 10.0 以上の画素に対してのみ表示し, 近くの物体を赤とし, 遠方に遠ざかるに従い青となるように表わしている. 先に述べたような原因による誤った結果が多少あるが概ね正しい結果が得られている. しかし, この例では走査線毎に独立な計算を行っているために, 数個の走査線では誤った結果が非常に多くなっている. 次節において, この誤った対応結果を減少させるために, 走査線間の整合性を考慮する方法について述べる.

3.2 走査線間の整合性

前節で述べた誤った対応部分を減少させるために走査線間の整合性も考慮する方法を **Fig. 8** に示す. s ラインにおいて対応点決定を行っているとき, p^s 点における抵抗値の更新は, s ライン上の p^s 点近傍の点から側抑制を受けるばかりでなく, $(s+1)$ および $(s-1)$ ライン上の点 p^{s+1} および p^{s-1} 近傍の点からも側抑制を受けるようにする. すなわち, 抵抗値更新を行う (4) 式において, s ライン上の回路網の抵抗 R_{ij}^s を,

$$R_{ij}^{s+1} = R_{ij}^s - \beta \sum_{p=s-1}^{s+1} \sum_{k,l} w(k,l) \cdot x_{k,l}^p \quad (8)$$

より求める. ここに $x_{k,l}^p$ は p ライン上の回路網での電流値を示す.

これにより, 走査線方向と直交した方向にも continuity を満足させるようにすることができる. この走査線間の整合性も考慮に入れた計算結果を **Fig. 9** に示す.

Fig. 7 と **Fig. 9** を比較すると, **Fig. 7** において誤った対応決定をしていた走査線が減少し, 走査線間の整合性も考慮した効果があらわれている.

3.3 計算時間と精度の検討

本章での計算例に要した cpu 時間は, 大型汎用コンピュータ M-200H を用いて, 走査線毎に独立な計算で約 20 分, 走査線間の整合性を考慮した計算で約 40 分である. この結果は, 移動ロボットの視覚としてはまだ十分な速度とはいえず, 今後この高速化方式を検討する必要がある.

前節までに示した計算例には, 部分的に誤った対応結果もあるが, 正しい対応の部分では対応誤差は ± 0.5 画素以内である. これは, 3m の奥行き距離にある物体に対し, ± 6 cm の距離精度を得られることを示しており, この程度の誤差であれば, 移動ロボットの誘導には十分使用できると思われる.

4. あとがき

本論文では, ネットワーク算法を用いてステレオ対応点を求める手法を明らかにした. すなわち, 両眼視像に対する対応点決定の方法として, 数理計画手法のネットワーク計画法に, 生体系の基本的な視覚情報処理様式である側抑制の考え方を導入した. 画像内の各画素から, 対となる画像の対応画素付近に枝を張ったネットワーク (電気回路網) を構成する. 対となる画像は非常に近似していることから, 対応点決定の問題は, 一方の画像の特徴量を他方の画像へと, このネットワークを通して輸送する場合の流れを求めることになる. このとき, 対応点決定のための拘束条件を満足させるために, 各枝に対するコスト (抵抗値) を側抑制の考え方にに基づき更新しながら, 繰返し計算により求める. 実画像による検討の結果, 3m の距離にある物体に対し ± 6 cm 程度の精度で距離が求まることを明らかにした.

最後に, 本研究の機会を与えてくださった, 当所川崎淳所長, 井原廣一副所長, 春名公一部長, 本研究を進めるにあたって有益な御意見, 御討論をいただいた東北大学木村正行教授, また本研究の遂行にあたり御

協力をいただいた各位に対し、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 藤江, 他: 知能移動ロボットのシステム構成, 第 2 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 221/224 (1984)
- 2) 白井: ロボットの物体認識技術, 計測と制御, **21**-12, 1115/1121 (1982)
- 3) D. Marr and T. Poggio: Cooperative Computation of Stereo Disparity, Science, Vol. 194, 15 October 1976, 283/287 (1976)
- 4) 太田, 金出: 走査線間の整合性を考慮した動的計画法によるステレオ対応探索, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料, **29**-7 (1984)
- 5) H. P. Moravec: The Stanford Cart and The CMU Rover, Proc. of The IEEE, **71**-7, 872/884 (1983)
- 6) 谷内田: 多重画像を利用したシーンの理解, 情報処理, **24**-12, 1429/1436 (1983)
- 7) D. Marr: Vision, W.H. Freeman and Company (1982)
- 8) T. ポッジョ: 人間の視覚と機械の視覚, サインズ日本版, 84-6 (1984)
- 9) 甘利: 神経回路網の数理, 産業図書 (1978)
- 10) W. E. L. Grimson: From Images to Surfaces, MIT Press (1981)
- 11) M. Iri: Network Flow Transportation and Scheduling: Theory and Algorithms, Academic Press (1969)
- 12) L. R. Ford, Jr. and D. R. Fulkerson: Flows in Networks, Princeton University Press (1962)