局所視差ヒストグラムを用いた三眼立体視による重機検出システム

非会員 綾 木 之 裕 (大阪大学工学部) 正 員 石 橋 武 (東京電力株式会社)
 非会員 上 町 新 也 (住友電気工業株式会社) 非会員 白 井 良 明 (大阪大学工学部)

Trinocular Vision System using Local Disparity Histogram for Detection of Heavy Machinery
 Approaching to Power Transmission Lines

Ayaki Yukihiro, Non-member (Faculty of Engineering, Osaka University), Uemachi Shinya,
 Non-member (Sumitomo Electric Industries), Ishibashi Takeshi, Member (Tokyo Electric Power
 Company), Shirai Yoshiaki, Non-member (Faculty of Engineering, Osaka University)

This paper describes a trinocular vision system to detect heavy machineries such as mobile cranes approaching power transmission lines for avoiding contact accidents. Because the monitoring area is large, a passive measuring method is desirable. We have developed trinocular vision to acquire range data more reliably than conventional binocular vision. In order to find the correspondence of features in three images, we use a disparity histogram for matching candidates in a local area. By this way, the disparities of horizontal or vertical edges can be determined as well as reliable correspondence is obtained. We apply this trinocular vision to the monitoring system which is attached to a tower for power transmission lines. The system monitors a prespecified space to detect objects approaching power transmission lines. Experiments were carried out for real situations and proved the system is satisfactory.

キーワード：両眼立体視，三眼立体視，局所視差ヒストグラム，自動監視システム

1. はじめに

架空送電線とクレーン等重機との接触事故は、各種の対策により減少はしているものの、依然として年間で数件発生している。この種の事故は、線路付近での重機使用作業時は事前に届出を行なうと共に監視員を配備するよう、電力会社が要請しているにも関わらず、予定外作業等、監視員が不在時の作業で発生しているケースが多い。事故の未然防止対策として、工事現場の定期巡視や工事現場付近に設置した ITV カメラ (以下カメラと呼ぶ) の保守員による監視等が実施されているが、人手がかかる、長時間連続監視が難しい等、保守業務効率化の障害となっている。また、一台のカメラより得られた画像を処理して監視する装置が既に実用化されているが、重機の遠近情報が得られないため誤動作が多く信頼性が低いという問題があり、従来方式に代わる信頼性の高い自動監視システムの開発が望まれていた。そこで筆者等は架空送電線付近で稼働する重機を、複数のカメラ画像を用いてその三次元的な位置情報から検出する監視システムの開発に着手し、試作機の評価を終え、実用化への見通しを得た。

被写体の位置情報を得る手段の 1 つに両眼立体視法がある。これは、複数の異なる視点からの画像を用いて被写体

の写る位置のずれ即ち視差から、三角測量の原理を用いて 3 次元の位置情報を得るものである⁽¹⁾。両眼立体視は、

- 受動的計測であり計測対象に制約が少ない。
- 計測可能範囲が広い。
- 基本的に 2 台のカメラと計算機があれば実現可能。

などの利点があり、本システムに適した位置情報獲得の有力な一手段である。しかし、被写体の視差を求める時に複数の画像上の同一の被写体どうしを対応づける必要があるため、その難しさから信頼性の面でやや劣るところもある。本システムの目的を考えると十分な信頼性が必要であるため、筆者らは通常の両眼立体視法をさらに発展させた 3 眼立体視法を開発し、本システムに適用した。

2. 3 眼立体視法

監視という目的を考えると、環境の 3 次元位置情報を精度良く確実に得ることが最も重要であるため、本システムでは被写体の輪郭、即ちエッジ点を対応付けの対象とする。エッジ点は画像をガウシアンフィルタで平滑化して、ラプラシアンフィルタをかけた結果が零になる点とする。さらに、各エッジ点の輝度コントラストおよびエッジ点の方向を特徴量として求め、対応候補点を選別する指標として用いる。しかし、ノイズの影響等により特徴量が最も類

似する組合せが、必ずしも正しい対応を表しているとはいえない。筆者らは視差の大局的な情報を用いた両眼立体視法⁽⁴⁾を提案した。以下にその概要を説明し、問題点を指摘する。

(2・1) 局所視差ヒストグラムを用いた対応付け まず、一つの領域内で視差が一樣となるように一方の画像を基盤目状に区切る。以下ではこの区切られた領域の、ある一つのものの視差を決定する手順を説明する。領域内のエッジ点毎に、他方の画像上のエッジ点で、エピポーラ拘束を満たし、かつ特徴量の類似度がしきい値以上であるものを対応候補点として探索する。対応候補点が存在すれば、対応の真偽にかかわらず、領域の視差ヒストグラムの対応する階級の度数を1だけ加算する。領域内の視差はほぼ一樣であるので、対応が真である対応候補点の視差はある階級値に集中し、偽のその視差はランダムに分散する。そこでヒストグラムのピークである階級値を領域の視差と決定する。これを模式的に示したものが図1である。領域の視差を得た後、対応付け領域の各エッジ点と、その対応候補点のうち視差が領域の視差と等しいエッジ点を対応付ける。

図1 局所視差ヒストグラム
Fig.1. local disparity histogram

この手法によりほとんどのエッジ点を対応付けることができるが、エピポーラ線上に対応候補点が多く存在する場合は、ヒストグラムがピークを持たなかったり、複数のピークを持つことになり領域の視差が決定できない。本システムが処理対象とする画像にはエッジが密に存在する。また、被写体の多くは人工物であるため、画像には水平エッジセグメントが多く含まれる。よって、水平なエピポーラ線上いたるところにエッジ点が存在することになるので視差が決定できない。エッジ点の3次元位置情報を正確に獲得できなければ、監視エリアに侵入してきた稼働物を見落とすことにつながる。

従って対応候補点の数を減少させることが必要となる。このために3眼立体視法がさまざまに研究されてきた⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。3台のカメラを一直線上にならないように配置す

るこの手法では、3本のエピポーラ線が存在するので、全てのエッジ点にはそれとは平行でないエピポーラ線が必ず2本以上存在し拘束条件が厳しくなる。よって、対応候補点を絞り込むことができ、幾何拘束条件のみで対応付けすることも可能な場合がある。しかし、エッジ点を非常に多く含む画像の場合、両眼立体視の場合と同様、エピポーラ線上に対応候補となるエッジ点が多数存在し、組合せが一意には決定できない。そこで筆者等はこの局所視差ヒストグラム(Local Disparity Histogram:LDH)を用いた対応付け手法(以下LDH法)を3眼立体視法へ適用した高信頼3眼立体視法を開発した。

(2・2) 局所視差ヒストグラムを用いた3眼立体視法 本手法ではヒストグラム作成段階での対応候補探索時に、エッジ点の特徴量の類似条件に加え、3眼立体視の幾何条件を満たすエッジ点を対応候補点とする。これにより偽の対応候補の数が減るため、真の視差でヒストグラムのピークを形成し易くなる。以下にその詳細を述べる。

図2 3眼立体視撮像系
Fig.2. imaging system of trinocular vision

本手法での撮像系の幾何を図2に示す。各カメラの光軸は平行で、水平方向のカメラ間の距離をa、垂直方向のカメラ間の距離をbとする。また以下では図中の1の画像面を左画像、2の画像面を右画像および3の画像面を上画像と呼ぶ。3次元空間上の1点Pの左画像、右画像および上画像上への投影像をそれぞれ $l(x_l, y_l)$ 、 $r(x_r, y_r)$ 、 $t(x_t, y_t)$ とすると、エピポーラ拘束条件より

$$\frac{b}{a} = \frac{b + y_t - y_l}{a + x_r - x_l} \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つ。式(1)を変形して、

$$\overline{y_t} = y_l - k(x_l - x_r) \dots\dots\dots (2)$$

を得る。ここでkは、下記(3)で表される。

$$k = \frac{b}{a} \dots\dots\dots (3)$$

$\overline{y}_r$ は、 x_l 、 x_r 、 y_l が得られた時に、3 眼立体視の幾何拘束条件を満たすべく、上画像内に存在が期待されるエッジ点の y 座標である。

3 眼立体視の幾何拘束条件を加えることで、従来の L-DH 法に比べ偽の対応候補点の数が減少する仕組みを、図 3 の概念図を用いて説明する。左画像中のエッジ点 l の対応候補点を抽出する場合、両眼立体視の場合には $r1$ 、 $r2$ 、 $r3$ が対応候補点となる。式 (2) を用いると、 $r1$ 、 $r2$ 、 $r3$ のそれぞれについて上画像での存在位置 $t1$ 、 $t2$ 、 $t3$ が得られる。しかし $t1$ 、 $t2$ には実際にはエッジ点が存在しないことから $r1$ 、 $r2$ は対応候補点ではないことがわかる。 $t3$ の特徴量が l にほぼ等しければ、 $r3$ は対応候補点となる。このように 3 眼立体視の幾何拘束条件を用いることで、両眼立体視の対応候補点の中から誤った対応候補点のみを減らすことができるので、視差のヒストグラムの正しいピークを得ることができる。

図 3 3 眼立体視の幾何拘束条件
Fig. 3. geometric constraint of trinocular stereo

カメラで被写体を写すと、量子化誤差などの影響でエッジ点の配列が画像間で微妙に異なる場合がある。この誤差は特にエッジ点とエッジポラ線とのなす角度が小さい場合に、視差に大きな影響を与える。よって、視差ヒストグラムの凸形状が鈍り、ヒストグラムはピークを持たない場合がある。逆にこの角度が大きいと誤差の影響は小さく、ヒストグラムはピークを形成し易い。本手法ではエッジポラ線が 3 本あるので、エッジセグメントとなす角度の大きなものを選択することができる。即ち水平なエッジポラ線(左、右画像間)あるいは垂直なエッジポラ線(左、上画像間)とエッジの方向差をとり、方向差がより大きなエッジポラ線を含む画像を対応候補点を抽出する画像として用いる。つまり、エッジの方向が水平なエッジポラ線に対して 45° 以上傾いていれば、右画像を対応候補点抽出のための画像、上画像を幾何拘束条件確認のための画像として用い、その傾きが 45° より小さければ、上画像を対応候補点

抽出のための画像、右画像を幾何拘束条件確認のための画像として用いる。この場合式 (1) より

$$\overline{x}_r = x_l - \frac{1}{k}(y_l - y_t) \dots\dots\dots (4)$$

を用いて、右画像内でのエッジ点の予測位置を求める。このようにして得られた対応候補点に対して〈2・1〉節に述べた視差決定の手法を適用して、画像内のエッジ点の視差を求めればよい。

〈2・3〉 対応候補予測位置の誤差の考慮 3 眼立体視の幾何拘束条件を適用するためにはカメラ間距離の比 k の値が必要である。カメラ間距離 a 、 b の値は実測可能であり、そこから k を計算できるが、ピクセルの精度でカメラ間の距離を正確に実測することは難しい。またレンズに歪みがある場合は、物理的なカメラ間距離の比と実際の画像上の k の値が等しくならない。

今、左画像、右画像で両眼立体視を行なったとする。 $d_h = x_l - x_r$ 、 $d_v = y_l - y_t$ とおくと、ある対象物体 L までの距離は平行ステレオ視の幾何より、

$$L = \frac{af}{d_h} \dots\dots\dots (5)$$

となる。同様な関係は、左画像、上画像で両眼立体視を行なった場合も成り立つ。従って

$$L = \frac{bf}{d_v} = \frac{af}{d_h} \dots\dots\dots (6)$$

となり、式 (3) を用いて、

$$k = \frac{d_v}{d_h} \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。つまり、 k は実際に計測することなく、水平、垂直両方向のそれぞれの両眼立体視から得られた同一エッジ点の視差の比を取ることで得られる。

理想的には唯一の k が存在し、画像内の 1 つのエッジ点のみで k の値を得ることができる。しかし実際には量子化の影響やレンズの歪みにより、1 点のみの値では誤差の影響が大きくなるので、画像内の多くのエッジ点に対して式 (7) を用いて各点毎の k を計算し、それらに対して信頼性の重みを付けた最小自乗法を適用して最適な k を求める。

まず量子化の影響を考える。 x_l 、 x_r 、 y_l 、 y_t にそれぞれ ± 0.5 の量子化誤差が含まれるとすると、 d_h 、 d_v には ± 1 の誤差が含まれることになる。真の k の値は最大値 $k_{max} = (d_v + 1)/(d_h - 1)$ 、最小値 $k_{min} = (d_v - 1)/(d_h + 1)$ の範囲に存在し、 k_{max} と k_{min} の差 δk は

$$\delta k = k_{max} - k_{min} = \frac{2(d_h + d_v)}{d_h^2 - 1} \dots\dots (8)$$

と表される。

つまり、 δk は d_h 、 d_v の値によって異なり、小さい視差の値で計算された k の誤差の分散は大きく、信頼性が低い。例えば $d_h = 3$ 、 $d_v = 3$ の時は $\delta k = 1.5$ 、 $d_h = 40$ 、 $d_v = 40$ の時は $\delta k \approx 0.1$ となる。従って δk を信頼性の指標として、重み $\frac{1}{\delta k}$ の重み付き最小自乗法を適用する。

画像中の n 個の点でそれぞれ得られた k を $k_i (i=1, \dots, n)$ とすると、真の値 k_0 を重み付き最小自乗法を用いて求めれば

$$k_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\delta k_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\delta k_i^2}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

次にレンズの歪みの影響を考えると、 k は画像の位置に依存した値になると考えられる。従ってある一定値の k では式 (2)、(4) は画像の全範囲で成り立たず、真の対応点を対応候補から漏らすことになる。そこで、 $k_i (i=1, \dots, n)$ の分布の標準偏差 σ を求め、 $k_0 \pm 3\sigma$ の範囲内で k を動かして式 (2)、式 (4) を適用し、探索位置に範囲を持たせることにする。これにより 3 眼立体視の幾何拘束条件の厳密性は失われるが、対応候補点が洩れなく抽出される。なお範囲内に 2 点以上特徴量の似たエッジ点が存在した場合は、範囲の中心に近いものを取る。

これらの計算では両眼立体視で得られたエッジ点の視差が誤っていても、 k の値も間違っただけになってしまう。よって、得られた視差が十分に確からしいエッジ点、つまり対応を求める際に特徴量の一致度に厳しい条件を課して得られた視差に対して計算を行なうことにする。

3. 対応付け実験

実験に用いた左原画像 (480x640) を図 4 に、ここからエッジ点を抽出したものを図 5 に示す。総エッジ点数は 48,053 点である。

図 4 原画像 (左)
Fig. 4. original image (Left)

〈3・1〉 3 眼立体視と両眼立体視の比較 3 眼立体視による結果を図 6 に示し、両眼立体視による結果を図 7 に示す。これらは視差を濃淡値で表しており、濃くなるほど視差が大きい (カメラからの距離に近い)。

3 眼立体視によって対応付けできたエッジ点は 23,312 点であった。両眼立体視によるものは対応点総数 21,539 点であった。3 眼立体視によるものは水平エッジセグメント (例えば建物の窓、電線等) の対応付けに成功していることがわかる。3 眼立体視では画像内に映る重機の形状が

図 5 エッジ点画像 (左)
Fig. 5. edge image (Left)

図 6 視差画像 (3 眼立体視)
Fig. 6. disparity image (trinocular stereo)

図 7 視差画像 (両眼立体視)
Fig. 7. disparity image (binocular stereo)

ほぼ獲得できている。水平エッジセグメントが対応付けできたにもかかわらず、対応点の増加が 1 割程度に留まったのは、3 眼立体視ではエッジ点の特徴量が 3 画面ともに一致しなければならず、両眼立体視で対応付けできても、3 眼立体視では対応付けできなかったエッジ点が存在するからである。しかし、それだけ得られた結果の信頼性は高いと考えられる。誤対応については定量的な評価を行っていないが、主観的には妥当な結果を得ている。

〈3・2〉 量子化誤差、レンズ歪みを考慮した場合としない場合の結果の比較 〈2・3〉 章で述べた量子化誤差、レンズ歪みを考慮した場合と、しない場合の対応付け結果を

比較する。誤差の考慮をしない場合については、式(2)、式(4)で与えられる探索位置の周囲8近傍を探索範囲とした。図8(a)は図6のクレーンおよびボールが写る領域を抽出し拡大したものであり、図8(b)は誤差の考慮をしない場合の、同様の領域での対応付け結果である。誤差を考

図8 誤差の考慮の効果
Fig. 8. effect of the error consideration

慮しない場合では視差の大きいところ(クレーン、ボール)で、対応付けできていないところが多く存在する。実際、誤差を考慮しない場合の対応点総数は21,257点であり、誤差を考慮した場合に較べて約1割少ない。これは視差の大きいところでは式(2)、式(4)中の k の誤差が探索位置に大きく影響するためであり、誤った位置を探索することにより対応候補点が抽出できないからである。

4. 重機稼働自動監視システムの開発

以上に述べた三眼立体視を応用した、重機稼働自動監視システムを開発した。本システムは、予め重機使用日程の届出がなされた架空送電線付近の工事現場付近の鉄塔に設置しておき、もし予定外の重機使用があればこれを自動検出し、電力所等の線路保守事務所(以下、事務所)に警報を出すというものである。そのため、この監視システムは、①工事現場への巡視パトロールが不要、②モニタの常時監視が不要、③立体的に監視するため誤動作が少ないといった特長を有する。

〈4.1〉システム構成 本システムの基本構成を図9に、処理ブロック図を図10に示す。

架空線下の画像を取り込む視覚装置は、重機稼働検出用白黒カメラ3台とモニタ用カラーカメラ1台で構成し、作業現場を見渡せる鉄塔上部に設置する。画像処理により重機の有無を判定する画像処理装置は鉄塔下部に設置することとし、判定結果及び判定時のモニタカメラ画像を中央処理装置に伝送することとした。判定結果等を受信し、表示

図9 システム構成
Fig. 9. system configuration

図10 処理ブロック図
Fig. 10. block diagram of processing

および記録する中央処理装置は、電力所等線路保守事務所に設置した。中央処理装置と工事現場側の装置(視覚装置と画像処理装置)間のデータ伝送には、電話線等の通信線がない場所でも使用出来ること、移設が容易に出来ることを考慮して、携帯電話を用いることとした。なお、画像処理装置は、画像を高速伝送できる光ファイバ等が現地に敷設されていれば事務所に設置できるが、光ファイバのない場所での使用を考えて鉄塔下部に設置した。システム基本仕様を表1に示す。

表1 システム基本仕様
Table 1. basic specification

項目	仕様等
機能	自動監視機能 送電線付近の重機稼働の有無を自動検出 概略距離を自動計測 安全性自動判別、警報自動送信
	遠方監視機能 監視結果情報および画像の自動伝送機能 遠方操作機能
性能	監視可能距離 20m~200m
	距離計測精度 距離計測誤差±3%以下
	処理速度 60秒以内
	使用環境 屋外使用(鉄塔取り付け)

〈4・2〉稼働監視処理 本システムでは視野角内の空間を、カメラ座標系に相似にし、縦軸、横軸を20画素(単位: pixel)、奥行きを1視差(単位: pixel)毎に区切ったシステム座標系で表す。初期設定時に、図11に示すような、ある地上高以上の送電線近傍の空間を、監視エリアと設定する。監視動作時には、得られた画像から、開発した手法を用いてエッジ点の対応づけを行い、視差画像即ち被写体の輪郭の三次元位置情報を求める。得られた三次元位置情報をシステム座標系にプロットし、監視エリア内にしきい値以上の体積をもつ領域が存在すれば、重機等がエリアに侵入したと判定する。なお、監視エリア内にある既存の構築物は、初期設定時に輪郭の三次元座標を求めておき、監視エリアから除外しておく。

重機有無の最終的な判定は、事務所にいる保守員が伝送された判定結果及び現地の画像に基づき、自らが現地の画像を確認して行なう。

図11 監視エリアイメージ図

Fig. 11. concept of the monitored space

〈4・3〉システム実証試験 実用性評価のために、本システムを送電線付近の工事現場に適用し、動作実証試験を行なった。工事は地上高15mのマンションを、最低地上高28m、径間長252mの送電線の真下に建設するものであるが、重機使用時でも送電を停止できない場所である。そこで、監視エリアの大きさを奥行き30m～100m、線路両側16m、高さを10m以上に設定した上で監視を行なった。試験風景を図12に示す。

画像上に出現するエッジ点数は平均約50000点、対応点数は平均約29000点、監視エリア内に存在する重機のエッジ点数は約500点～2800点あり、処理時間は55秒(CPU: SuperSparc75MHz, OS: VxWorks)であった。重機稼働の有無判定結果の一部を表2に示す。表2中の丸印は重機(クレーン)の位置を示す。表2から重機の姿勢に正しく対応して判定結果を出力していることがわかる。また、11時19分と12時53分の画像には明度

図12 現地実証試験風景(東京都杉並区)

Fig. 12. scene of experiment

の変化が見られるが、結果には影響しなかった。これは三眼立体視法がエッジ点を取り扱うため、画像全体についての明るさの変化の影響が小さくなるためであると考えられる。

5. まとめ

筆者らは3眼立体視における視差決定段階に局所視差ヒストグラムを用いることで信頼性の高い三次元位置情報獲得手段を開発した。この際に問題となる量子化誤差とレンズ歪みについては、それらを考慮した3眼立体視幾何拘束条件を適用することにより、信頼性の高い結果を得ることに成功した。本手段を用いて重機稼働自動監視システムを構築、実証試験を行ない、良好な結果を得た。

最後に、本システムの実証試験にあたり多大な御協力を頂いた東京電力(株)練馬電力所の方々、大阪大学工学部白井研究室のメンバーの方々に深く感謝の意を表する。

(平成9年2月26日受付, 同9年8月11日再受付)

文 献

- (1) Shirai Y.: "Three-Dimensional Computer Vision", Springer-Verlag, 1987
- (2) Yachida M.: "3-D data acquisition by multiple views", Faugeras and Giralat eds., Robotics Research, pp. 11-18, MIT Press (1986)
- (3) 渡辺正規, 大田友一, 池田克夫: "3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善", 情報処理, 27, 11, pp. 898-906, 1986.
- (4) 植芝, 富田, "水平三眼ステレオによる遮蔽輪郭線からの曲面形状復元", 情報処理学会研究報告, Vol. 91, No. 10, pp. 9-14 (1991)
- (5) 山口, 中山, 白井, 浅田: "信頼性の高い対応を優先した多段階ステレオ法", 信学論, D-II, Vol. J 74-D-II, No. 7, pp. 918-925 (1991)

表 2 判定結果 (東京都杉並区：1996 年 2 月 12 日)
Table 2. experimental results(Suginami,Tokyo, Feb 12th 1996)

撮影時間	07:38	08:24	09:10	10:25	11:19
監視結果
監視結果	変化なし	重機稼働中	変化なし	重機稼働中	重機稼働中

撮影時間	12:53	13:13	13:53	15:54	16:59
監視結果
監視結果	変化なし	重機稼働中	重機稼働中	重機稼働中	変化なし

(6) Kanade T. and Okutomi M.: "A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 16, No 9, pp.920-932(1994)

綾 木 之 裕 (非会員) 平 6 大阪大学工学部機械工学科卒業。平 8 同大大学院博士前期課程修了。同年松下電器産業 (株) 入社。ステレオビジョンの研究に従事。日本ロボット学会学生会員。

白 井 良 明 (非会員) 昭 39 名古屋大学工学部機械工学科卒業。昭 44 東京大大学院工学系博士課程了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。コンピュータビジョン、ロボティクスの研究に従事。昭 46～昭 47MIT AIラボ客員研究員。昭 63 大阪大学工学部電子制御機械工学科教授。人工知能学会、日本ロボット学会、情報処理学会、日本機械学会各会員。

上 町 新 也 (非会員) 平 2 大阪大学工学部機械工学科卒業。同年住友電気工業 (株) 入社。ステレオビジョン、画像伝送の研究に従事。現在同社システムエレクトロニクス研究開発センターに勤務。

石 橋 武 (正員) 昭 46 科学技術学園高等学校。同年東京電力 (株) 入社。主として送電線保守システムの開発に従事。現在、同社東京西支店流通設備部に勤務。電気学会会員。