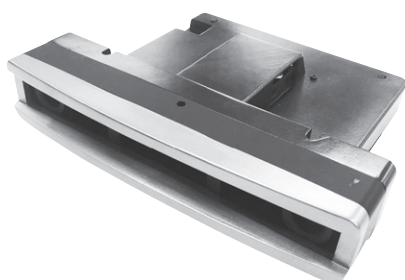


車載用ステレオカメラの魅力

實吉敬二 Keiji Saneyoshi
高橋利道 Toshimichi Takahashi

キーワード ADAS, AD, 認識技術

概要



ステレオカメラ

ステレオカメラは、先進運転支援システム（ADAS）や自動運転（AD）の外界認識センサとして自動車に搭載されている。同じ目的の外界認識センサとして、超音波センサ・電波レーダ・LiDAR（Light Detection And Ranging）・単眼カメラと比較しても、ステレオカメラは高い物体検出能力や衝突判断をするための有用な情報の提供など、車載用として優れた特長を持つ。車載用ステレオカメラのパフォーマンスを最大限に引き出すため、リアルタイム処理を考慮した実用化のキーテクノロジーである補正・校正について、精度や効率の向上に取り組んでいる。また、ステレオカメラを対象とした自動運転車の安全性を評価するシステムの構築にも取り組んでいる。

1 まえがき

国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（WP29）の自動運転分科会（GRVA）傘下のVMAD（Validation Method for Automated Driving）では、シミュレーションなどを活用したVirtual Testingなどが議論されている。Virtual Testingの中でもVILS（Vehicle In the Loop Simulation）では、自動運転車の完成車を改造することなくその安全性を評価するシステムが望まれている。そのため、屋外及び屋内の試験設備で、ステレオカメラを対象とした自動運転車の安全性を評価するシステムの構築に取り組んでいる。

自動車の先進運転支援システム（ADAS）や自動運転（AD）には、認知・予測・判断・操作の要素が必要不可欠で、認識技術の中核となるセンサとしてカメラが使用されている。物体を立体として認識

する方法はいくつか考えられる。遠近法や陰影のつき方、写真で使用されるピンボケなどの単眼視による方法は、二次元の画像から立体を認識するために、対象が立体物であるという仮定が必要となる。一方で両眼立体視では、眼をもう一つ増やすことで立体情報を直接得ることができる。

多くの動物は二つの眼を持っているが、両眼立体視を行っているのは、ネコ科と人間などの霊長類に限られる。立体情報は、次のようにするとすぐに体感できる。1本の指を目の前に立てたまま遠くを見ると指が2本に離れて見える。これは網膜に写る指の位置が左右の目で違うためである。この2本の指の間隔を視差と呼ぶが、指を近づけると指の間隔が広がり視差が大きくなり、逆に遠ざけると小さくなる。この視差を脳が計測し、そこから距離感を得ている。立体物の様々な部分の視差を計測することで、立体物全体の形状を認識している。本稿では、

両眼立体視を人工的に実現するための方法や特長を、現在の取り組みを含めて紹介する。

2 ステレオ法

両眼立体視を人工的に実現するには、視差を正確に効率よく計測することが重要である。第1図に視差と距離を示す。視差 D と対象物体までの距離 Z の関係は、単純に反比例する式で表される。

$$Z = \frac{Bf}{D} \dots\dots\dots(1)$$

$$D = u_c - u_b \dots\dots\dots(2)$$

Z : 対象物体までの距離

B : カメラ間の距離

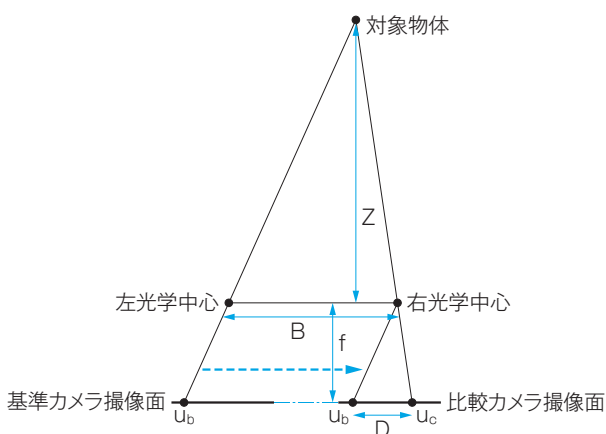
f : カメラの焦点距離

D : 視差

u_b : 対象物体の基準カメラ撮像面の水平方向座標

u_c : 対象物体の比較カメラ撮像面の水平方向座標

左右のカメラ間の距離 B 及び焦点距離 f がステレオカメラごとの一定値として既知の値(Bf)であるため、視差 D が求めれば一義的に対象との距離 Z を求めることができる。比例定数 Bf はカメラ間の距離 B とカメラの焦点距離 f の積で表される。距離と視差の変換を容易にするため、距離はメートル、視差は画素で表し、 Bf の値をメートル・画素の単位で表している。



第1図 視差と距離

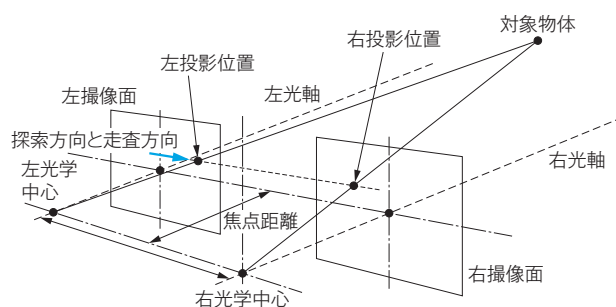
物体までの位置とカメラに写る位置や視差の関係を示す。

2.1 視差を求める方法

画像に写った立体物の視差を求めるには、一方の画像(以下、基準画像)に写った物体の小領域と同じ小領域を他方の画像(以下、比較画像)から見つけてその座標の差を求める。この方法には、画像処理の一つであるパターンマッチング法を用いる。最も単純でよく使われる方法は、比較する二つの領域から同じ位置の画素ごとに輝度の差を取り、その絶対値を領域全体にわたって加え合わせて、評価値にする方法である。この評価値はSAD (Sum of Absolute Difference) と呼ばれる。もしパターンが同一であれば、どの位置の輝度も同じになるためSADの値は0になる。パターンの類似性が薄れるほどSADの値は大きくなる。基準画像の領域に対して、もう一方の比較画像を探索して最も小さいSADの値となった探索範囲内の領域で基準画像からのずれが視差となる。

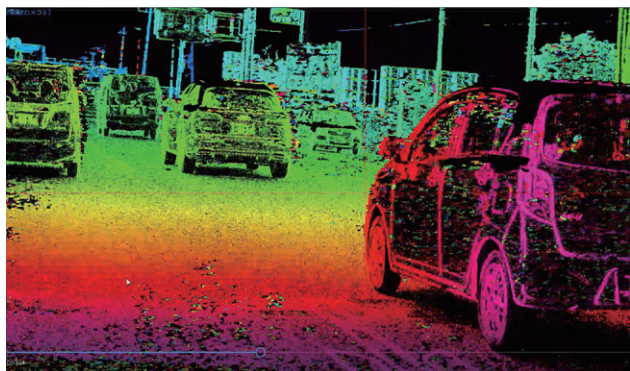
2.2 探索範囲

第2図に平行等位にして探索する方向と走査方向を示す。実際の比較画像を探索する上で、カメラの理想的な配置である。この配置は二つのカメラの焦点距離が同一であり光軸がお互いに平行で、二つの撮像面が光軸に垂直かつ同一平面上にあり、さらにそれぞれの撮像面の走査方向が二つの光学中心を結ぶ方向と一致している。この配置を平行等位の配置という。平行等位の配置であれば、基準画像の任意の領域で対応する比較画像の同じ高さを一次元的に走査することで見つけることができる。平行等位でない場合は、探索する方向と走査する方向が一致



第2図 探索方向と走査方向

平行等位にして探索する方向と走査方向の関係を示す。



第3図 4Kステレオカメラで撮影した視差画像

視差の大きい方から赤色・黄色・緑色・水色・青色と変化させている。したがって、赤色の方が近いことになる。



第4図 視差画像からの物体抽出

視差画像から視差によりグループ化することで、知識も仮定も使わずに右の歩行者を抽出することができるため、競合技術の単眼カメラよりも安全かつ確実である。

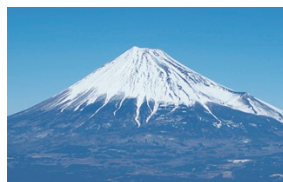
せず複雑な処理が必要である。このため、高速性能が要求される車載用ステレオカメラでは、平行等位にすることが一般的である。

生成した画像は、まだ距離に換算していない視差画像である。距離への換算には割り算が伴うため処理の負荷が重くなる。このため、ノイズ除去やミスマッチングした視差の削除・修正、その後の物体検出なども視差画像に対して行い、必要に応じて部分的に距離へ変換することで処理の負荷を軽くしている。第3図に4Kステレオカメラで撮影した視差画像の例を示す。

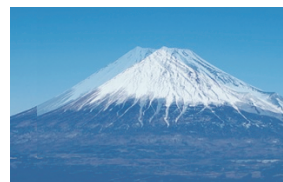
3 ステレオ法の特長

第4図に視差画像からの物体抽出を示す。生成した視差画像の特長は、以下のとおりである。

(1) 視差画像では、同じ物体は類似した視差の塊になる。したがって視差によってグループ化すること



(a) 単眼カメラ



(b) ステレオカメラ

第5図 近くに置いた富士山の写真

(a) 単眼カメラでは本質的に距離が分からないが、(b) ステレオカメラでは視差から距離が分かるため、近くに置いた写真と認識することができる。

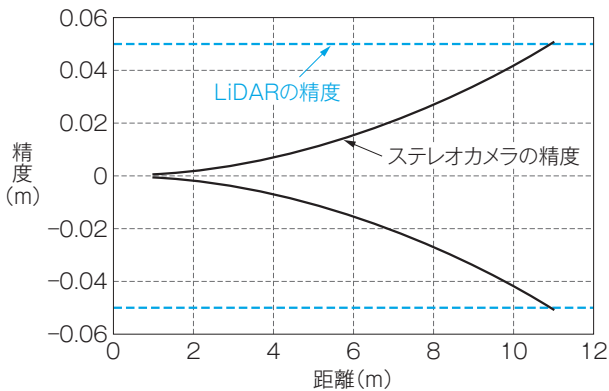
で、一つの立体物が塊になって抽出される。様々な視差から同時に抽出するため、複数の立体物がその形状とともに同時かつ簡単に抽出できる。そして、視差が分かっていることから距離は簡単に計算できる。

(2) 画面に写っていれば、どのような物体でもそこまでの距離情報が得られる。例えば東京から富士山を撮像した場合、視差が1画素のときの距離を400mとすれば、富士山は視差がほぼ0画素になるため400mより遠いことが分かる。これは衝突回避にとって重要な情報であるが、第5図のように単眼カメラでは近くに置いた富士山の写真でも同じに見えてしまい、近くにあるのか遠くにあるのか判断できない。

(3) 画面に映っている物体までの距離情報は、画素と1対1の対応として得られる。単眼カメラとLiDAR (Light Detection And Ranging) やミリ波レーダの組み合わせは、センサフュージョンとして一般に行われているが、それぞれのセンサが検知している物体の座標系が異なるため、その合わせ込みや経時変化が問題になることが多い。

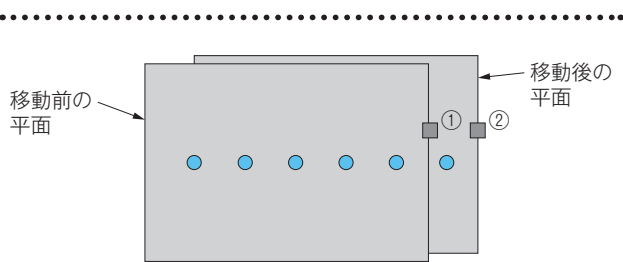
(4) 第6図にVGAサイズのステレオカメラの測距精度を示す。VGAステレオカメラの例では、10m先での距離精度は±4cm、5mでは±1cmである。物体からの距離が近いほど高精度になるため、正確な衝突回避ができる。距離によらず精度が一定のLiDARは、遠い距離では精度が高くて、衝突の判断をしなければならぬ近い距離では、粗い制御となることが懸念される。

(5) 第7図に横方向の動きが分かるステレオカメラ



第 6 図 VGA サイズのステレオカメラの測距精度

ステレオカメラは、近距離の測距精度が良いことを示している。



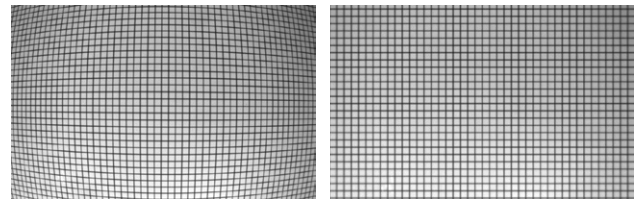
第 7 図 横方向の動きが分かるステレオカメラ

LiDARは常に青い点までの距離のみを繰り返し測定するため、平面が動いても横方向の動きは分からない。ステレオカメラは、エッジ位置とその視差（距離）を測定できる。

を示す。LiDARやミリ波レーダは、平面内のある点に対して距離を検出するため、平面が横に動いた動作をした場合、その動きを検出することは困難である。ステレオカメラは、位置が変化する境界を画素単位で、しかも短い時間間隔で連続的に検知できるため、物体の横方向への動きも含めた精度の高い相対速度ベクトルが分かる。①はあるフレームで検出したエッジの三次元位置、②は次のフレームで検出した同じエッジの三次元位置を表し、①と②の差から横方向の相対速度が計算できる。横から飛び出してきた物体との衝突予測や、自車が旋回するときのトラッキングの性能に大きく影響する。

4 補正と校正

多くの特長を持つステレオカメラであるが、実際に撮影すると画像はレンズを通して得られるため、どうしてもひずみが生じる。平行等位にすると探索



第 8 図 補正前と補正後の格子画像

左図はひずみがある画像、右図は補正後の画像を示す。補正後はひずみが低減された格子画像となっている。

範囲が走査方向に一致することを述べたが、ひずむと探索範囲が直線にならず領域を探ることが困難となり、仮に探索範囲内の領域で見つかったとしても正確な視差が分からない。この問題が、ステレオカメラの実用化で最も苦勞する問題である。

4.1 ひずみの補正

実用化の問題を解決するためには、ひずみを測定して補正処理回路を組み込む方法が考えられる。補正の方法は、大きく二つに分けられる。ひずみをパラメータ化して計算によって補正する方法と、画素ごとに直接補正後の座標を求めて補正する方法である。どちらもチェッカや格子などの模様が描かれたパターンを撮影して、そこから得られる特徴点の位置関係を基に補正する。

パラメータ化による方法は、例えばOpenCV (Open source Computer Vision library) にも組み込まれているため、手軽に扱えることもあり広く普及している。しかしながら、対称性を基本にしているため、レンズの中心軸がずれているような対称性を崩すひずみには対応が困難である。このため、高い精度が要求されるステレオカメラでは、画素ごとに補正する方法が必要とされる。第 8 図に補正前と補正後の格子画像を示す。

4.2 校正

画像のひずみを補正しても平行等位にはならない。これは二つのカメラの相対的な位置関係が問題であり、平行等位となるようにカメラ位置を調整する必要がある。調整の精度は、基準画像と比較画像の位置ずれとして、0.1 ~ 0.2画素以内に収める必要

がある。CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) センサの1画素当たりの大きさは $3\mu\text{m}$ ほどで、 $0.1 \sim 0.2$ 画素は $1\mu\text{m}$ より小さい。カメラの位置ずれには並進成分と回転成分があるが、カメラは風景をレンズで数千分の1に縮小しているため、並進成分への影響は無視できる。一方で、回転成分はレンズの焦点距離が5mm程度となり、カメラを1万分の1傾けると約0.2画素程度ずれが発生する。こうした回転成分は二つのカメラをつなぐ土台のねじれや反りで生じる。これを機械的に経時変化もしないように抑え込むことは困難である。このため、電子的に平行等位となるように調整する。この調整にもチェッカや格子などの模様が描かれたパターンを撮影して行う。微小な回転成分による画像のずれは、画像の並進や回転の形として現れる。したがって、この補正は画像全体の並進や回転を考えればよいため、簡単な処理で対応できる。回転が大きくなると光軸が撮像面に垂直にならないため、画面の両端で拡大率が異なってくる。この場合は若干複雑になるが、線形変換で校正できるため、軽い処理で対応できる。

4.3 電子的な調整

補正や校正の電子的な調整は、調整前のずれが50画素程度あっても対応できるため、部品の公差内に収めることができる。このため、位置調整無しで組み立て、最後に電子的に無人で調整することで人手による調整作業を不要にできる。あらかじめ補正と校正を併せてテーブル化しておけば計算処理の負荷は軽微であり、リアルタイム処理にも十分使用できる。このため、パラメータ化する方法と画素ごとの直接補正法では、二つの方法の処理時間や負荷における優劣の差がない。また、電子的な調整を適用することで、動作中も常にカメラのずれを視差画像からチェックして自動的に調整することで、ステレオカメラの無調整化が実現できる。

車載用のステレオカメラは、無限遠にピントを合わせているため、補正するためのパターンを撮影するには、ピントが合うようにパターンを遠方に配置

する必要がある。パターンを遠方に配置するには、寸法が非常に大きいパターンを用意しなければならない。このような状況を避けるためにパターンをカメラ近くに置き、コンバージョンレンズを使ってピントを合わせる方法⁽¹⁾がある。

5 むすび

自動車は、奥行き方向に向かって動くため、周囲を奥行きのある物体として認識することは至極当然の考え方である。二つの眼を使った立体画像認識は、普段から我々が行っている両眼立体視のやり方で、進化の最後によりやく獲得した高度な外界認識法である。ITD Lab(株)が開発してきたステレオカメラもそこからヒントを得ている。

移動ロボットや人間の手助けをする様々なロボットが活躍する時代である。自動車に限らずそのようなロボットには、人間と同様の物体認識能力や周囲環境認識能力が求められる。人間と同じ手法で認識するステレオカメラは、最も重要なセンサとして今後も活躍すると確信している。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

(1) 中川正夫・山本裕之・高橋利道・實吉敬二：「ディスプレイとコンバージョンレンズを用いたステレオカメラの性能評価手法に関する研究」, 精密工学会誌, 2022年88巻10号, pp.789-794

《執筆者紹介》



實吉敬二
Keiji Saneyoshi
ITD Lab(株)



高橋利道
Toshimichi Takahashi
モビリティ T&S 技術部
Mobility Testingに関するマーケティング・企画・開発に従事