

産業用ロボット向け三次元計測技術

堂前幸康*

3D Measurement Technology for Industrial Robots

Yukiyasu Domae

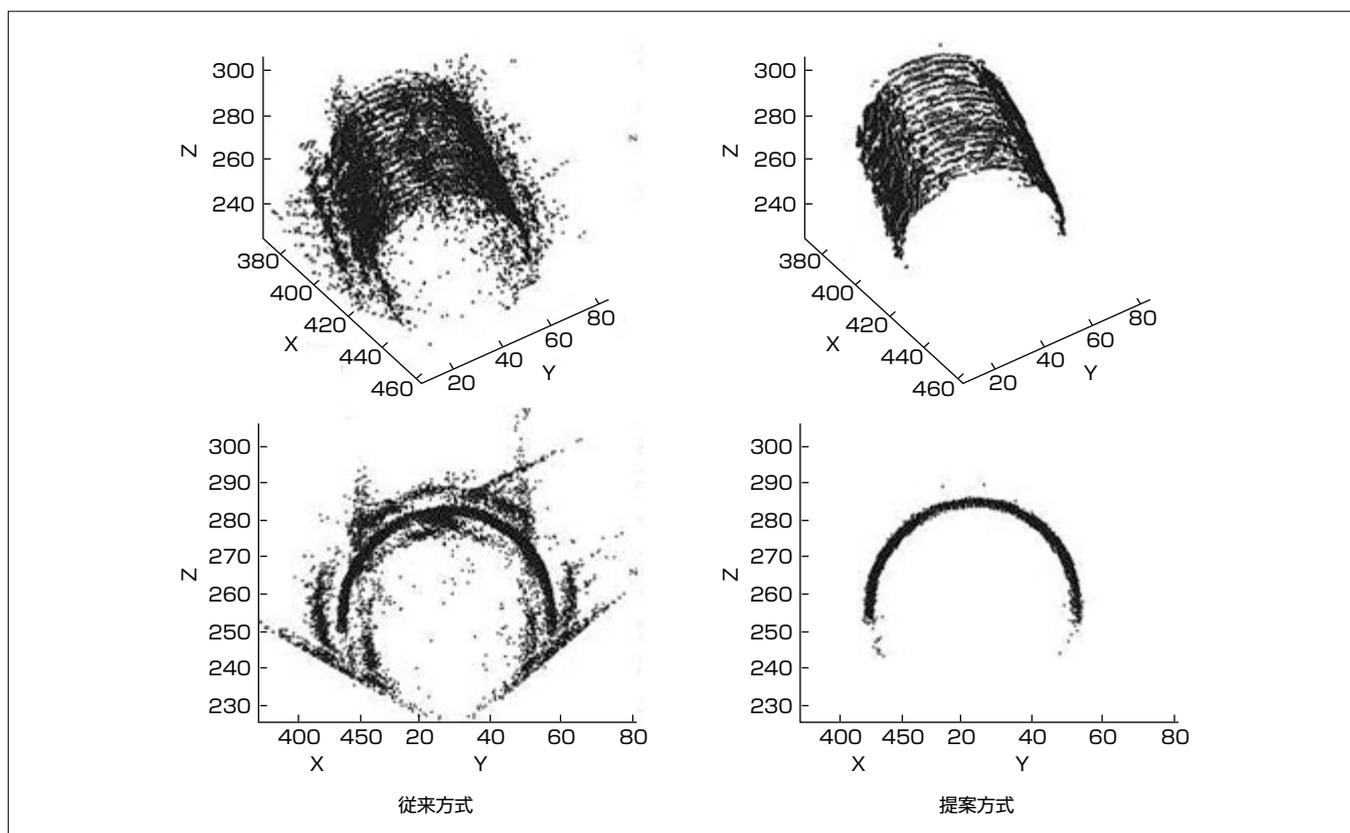
要旨

生産現場の組立て作業を自動化するために、産業用ロボットを使った生産システムが利用されている。産業用ロボットがバラ積みされた部品を自律的に操作するためには、部品の姿勢や状態を認識するための三次元計測機能が不可欠である。

コストや設置性の良さからカメラ1台をロボットに取り付けば三次元計測できるような方式が望まれる。これはロボットによってカメラを移動し視点を変え、三角測量の原理に基づき三次元位置を測定することで実現可能とされてきた。これは“モーショステレオ方式”と呼ばれる。しかし実際の計測では、ロボットの運動は振動などによって誤差が加わることで、撮影タイミングとロボット運動が非同期であることによって、従来のモーショステレオ方式で

は安定した計測が困難であった。

この課題に対して、運動中の非同期な撮影画像を使い、三次元計測を安定化させたモーショステレオ方式を提案する。提案方式は、静止撮影した2視点による三角測量を行うが、その2視点間を移動中に撮影した連続画像上でも計測点を追跡し続ける。追跡した計測点の軌跡の状態より、計測が安定しているかどうかを判定する追跡安定度評価指標を作成し、これに基づき不安定な計測点を棄却するという方法を採用した。ロボットにカメラを搭載し物体を計測する実験では、従来のモーショステレオ方式に比べ、S/N (Signal to Noise)でおよそ16倍、94%のノイズが除去された三次元計測結果を得ることができた。



提案方式による円筒物体の三次元計測例

生産現場における産業用ロボットが、組立て部品の形状や姿勢を認識するための三次元計測技術である。ロボットにカメラを搭載し、ロボットの運動前後でカメラの視点が変わることを利用して三次元計測する。運動中にも対象を撮影し、対象の見えの変化を追従しておくことで、三次元計測精度を向上させた。

1. ま え が き

カメラで三角測量を行う“ステレオ視”はポピュラーな三次元計測原理であり、検査、監視、モデリング、マッピング、娯楽等、様々な用途に応用されている。最も基本的なステレオ視は、空間的・時間的キャリブレーションのとれたカメラ2台で撮影した2枚の画像から同一の点を対応付けし、三角測量の原理に基づいてその点の三次元位置を計算する2眼カメラ方式⁽¹⁾によって実現される。しかし、異なる画像上の2点を対応付けすることは難しい問題で、失敗による計測不能な点や、大きな誤差を含む点が多数生じる。そのため、カメラの数を増やすことで対応付けを安定させた3眼方式⁽²⁾⁽³⁾が提案されている。さらに、複数のカメラ間でそれぞれステレオ視を行い、その評価値を合成することで性能を向上させたマルチベースラインステレオ方式⁽⁴⁾やその応用⁽⁵⁾⁽⁶⁾が有名である。

カメラ1台を運動させてステレオ視を実現するモーシヨンステレオ方式もある。これは、カメラ同士のキャリブレーションが不要、精度と視野のトレードオフのバランスが調整可能、設置面積やコストが少なく済む等多数の利点を持つ。この方式では、カメラを位置決め精度の高い自動ステージやロボットに設置して、視点を変える。静止した対象物の計測に有効である。2つの視点から撮影する基本的なステレオ視だけでなく、徐々に移動させながら時系列画像を生成し、その軌跡をもとに安定して対応付けを行う方式⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾が提案されている。また、3眼方式やマルチベースラインステレオ方式と同等の処理を1台のカメラを移動させて実現することも可能である⁽¹⁰⁾。

モーシヨンステレオ方式では各カメラの相対位置の計算には自動ステージやロボットの位置情報を使うため、カメラの撮影タイミングと自動ステージやロボットの位置取得タイミングの同期が必要となる。同期は静止させて行うことが一般的である。産業用ロボットの場合、同じ運動後の繰り返し静止位置決め精度は±0.05mmでも、絶対誤差は±0.5mmと、誤差が1桁変わる。また、静止時の精度が重要視される移動ステージや産業用ロボットでは、ロボットの運動中の位置取得タイミングそのものの同期にも不正確さがある。そのため撮影タイミングで移動ステージやロボットを静止させ、精度を確保する。しかしこの方法で、先に述べた対応付け問題を安定して解くために視点数を増やそうとすると、静止時間分だけ計測時間が増えるという課題がある。精度を高めるためには、計測時間がほぼ撮影枚数倍されるため応用が難しい。

そこで、撮影タイミングと位置取得の同期のとれた2視点と、その2視点間を移動中に撮影する非同期な複数視点という新たな問題設定を考え、それに適したモーシヨンステレオ方式を構築した。提案する方式は、①運動中の連続

画像は対応付け性能を高めるための逐次対応付けにのみ使うこと、②その逐次対応付けによる各特徴点の追跡安定性を統計的指標によって評価し不良な対応を除去することという2つの特徴を持つ。これによって静止回数を増やさずに、計測性能の高いモーシヨンステレオ方式を実現した。次の章から、モーシヨンステレオ方式の基本原則、提案方式、実験結果について述べる。

2. モーシヨンステレオ方式

モーシヨンステレオ方式のモデルを図1に示す。空間上にある点Xがあり、姿勢を変えて2回カメラで計測したとする。このとき、カメラで撮ったそれぞれの画像での点の位置(x_f, x_l)はわかるが、実際の位置Xはわからない。これを解く。

- ①それぞれの画像での点の二次元位置(x_f, x_l)をカメラ座標系における三次元位置に変換する。これは焦点距離などのカメラ固有のパラメータ情報(A)がわかっているならば計算できる。
- ②次にそれぞれの三次元位置を基準座標系から見た位置に変換する。これはそれぞれのカメラ位置(T_f, T_l)情報を使って計算する。これはキャリブレーションによって計算できる。
- ③ここまででx_f, x_lをXに変換する式が計算できる。Xは式が2本あればそれをもとに計算できるので2視点で撮影している。これは一般的に三角測量の原理と呼ばれる解き方を動いて位置を変えて撮影したカメラに応用したものである。これらによって、次の式がモーシヨンステレオ方式の計算式になる。

$$\begin{cases} S_f X_f = A P T_f \\ S_l X_l = A P T_l \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

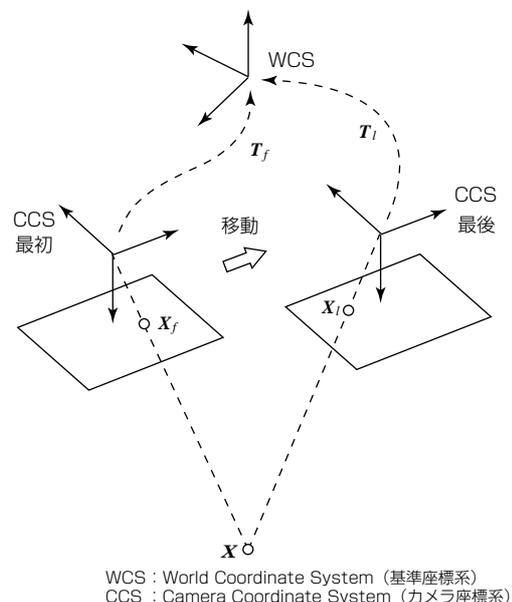


図1. モーシヨンステレオ方式のモデル

s_i, s_l は任意のスカラー量で、 P は射影行列と呼ばれるもので三次元の点を二次元に変換(射影)するものである。カメラの内部パラメータ(A), それぞれのカメラ位置(T_i, T_l)がわかれば、環境によらずこの式で三次元位置が計算できる。産業用ロボットで見た物体を操作しようとするれば、基準座標系として、ロボットの座標系を使い、ロボットの手先にカメラを固定(ハンドアイと呼ばれる)してカメラの位置がロボットからわかるようにすれば三次元位置計算が実現する。

3. ハンドアイの運動モデル

2つの視点で計測した二次元位置(x_i, x_l)に写っているものが同一のものかどうかを判定するのが、先に述べた対応付け問題である。

それぞれの画像が似ているかを画素情報の照らし合わせで評価するのだが、移動量が多いと“三次元的な見えの変化が大きく一致しない”と評価されることが多い。これが計測誤差となる。これを避けるため、図2のような運動モデルを用いる。ある視点で見た点の位置(x_i)とカメラの位置姿勢がわかっているとき、別のカメラ位置で見た点の位置はある直線上に存在するということがいえる。これはエピソード拘束、その直線はエピソード直線と呼ばれる。2視点間のロボットの運動が姿勢を変えない直線運動なら、運動中に撮影したそれぞれの点の位置も同じエピソード直線によって拘束される。式で表すと次のようになる。

$$x_i^T (t \times (x_l + t)) = 0 \dots\dots\dots(2)$$

T は転置行列を表す。 $x_i(i=1, 2, \dots, k)$ はそれぞれ運動中に撮影した画像上の点の位置である。 t はロボットの直線運動を表す並進ベクトルである。

この運動モデルを用いることで、対応付け問題を、ある直線上で解くことができる。さらに運動中の短い変化の中で対応付けを行うので照合間違いが大幅に減る。

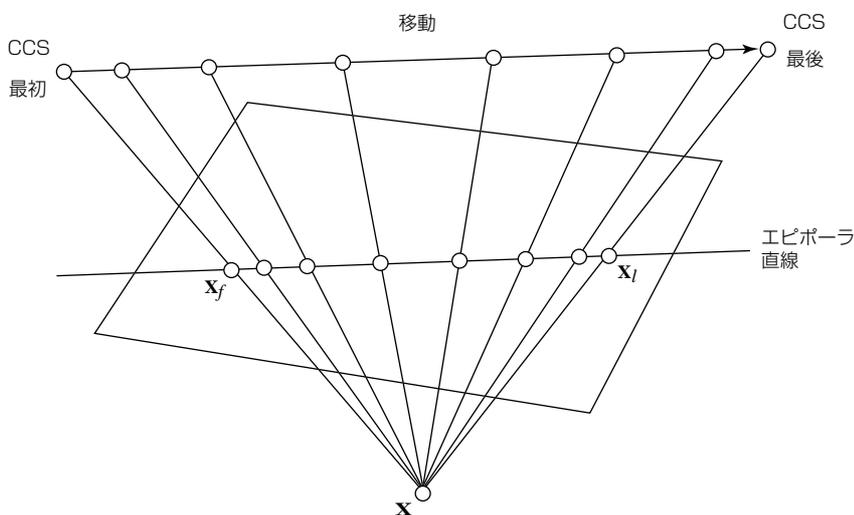


図2. ハンドアイの運動モデル

4. 追跡安定度

先に述べた運動モデルでは、運動中のカメラの位置姿勢は同期がとれておらず不明である。マルチベースラインステレオのような一般的な方法では、対応付け性能を高めることができない。そこで、運動中に逐次対応付けられる点の位置関係を位置とエピソード直線のなす角度をもとに、各運動中の変化量を統計的に評価し⁽¹¹⁾、不安定な対応付けは自動で棄却するようにした。これによって同期のとれていない計測による誤計測を減らすことができる。この方法は最終フレームで2種類の分散値を求めるだけなので計算コストが低く、最適化問題のように計算時間が発散しない。データ数が大きい三次元計測に適用しやすい。

5. 実験

実験ではロボットアームの手先にカメラを取り付け、モーションステレオの従来方式と提案方式で円筒を計測し、その計測性能を比較した。

実験用に構築した単眼ハンドアイシステムを図3に示す。ロボットアームは6自由度で、位置繰り返し精度が0.05mm, その手先にカメラが搭載されている。カメラの基本仕様は、解像度VGA (Video Graphics Array), フレームレート15fps (frames per second), レンズ焦点距離6mm, レンズ歪(ひず)みは事前に補正済みで、カメラパラメータ、位置姿勢はキャリブレーションされている。

実験では2つの方式で計測した三次元計測結果に対して平面なら平面モデル、円筒なら円筒モデルを最小二乗法で当てはめ、モデル面と計測点のユークリッド距離を誤差ととらえ、この距離が1mm未満の点をシグナル、1mm以上の点をノイズと定義し、 $S/N=10_{\log}10$ (dB)を計算し、これを性能評価値とした。また手動設定の必要のある閾値(しきいち)は、全手法ともシグナル数(S/N)が最も高くな

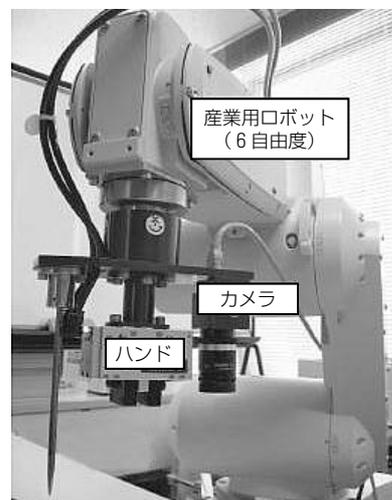


図3. 実験に利用した単眼ハンドアイシステム

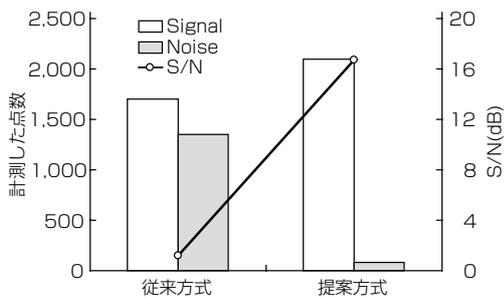


図4. 三次元計測結果(S/N)

るよう調整した。どの方式も閾値調整で得られる最も良い計測結果を選択した。追跡安定度ではカイ二乗分布の信頼区間をシグナル数(S/N)に準じ設定した。

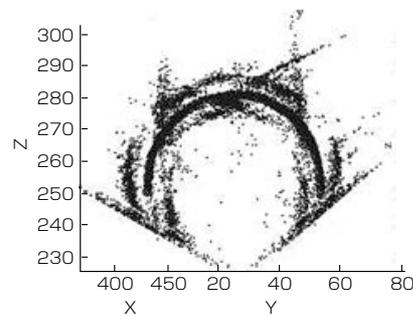
三次元計測結果を図4, 図5に示す。従来方式はノイズが多く、提案方式はノイズが見られない。画像の類似性を評価する対応付けではテクスチャのある領域が成功しやすいが、従来方式ではテクスチャのある領域でも計測がうまくいかない部分が多かった。これは似たような周辺のテクスチャと誤照合していることを意味する。一方、提案方式では対応付け問題を狭い範囲で解くので、周辺の似たテクスチャと誤照合を起こすことが少ない。各手法のS/N計算結果では圧倒的に提案方式が高く、ノイズはほぼ除去されている。提案方式でシグナルが減少する理由は、運動中の追跡は不安定でも最終的に対応付けが成功した点を、除去してしまうためである。比較するとシグナルは7.7%減少だが、94%のノイズは除去された。また、提案方式でノイズと定義された点の誤差平均は1.2mmである。従来方式では3mm以上の誤差平均であり、提案方式はより高い精度である。

6. む す び

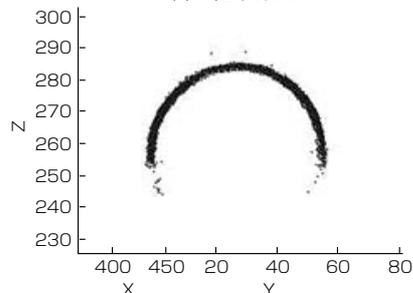
2視点間の運動を利用したモーシヨンステレオ方式で、静止回数を増やさずに計測性能を高めるため、①運動中の連続画像上でエピポーラ拘束に基づき逐次対応付けを行い、②エピポーラ拘束と統計的性質に基づいた追跡安定度という評価指標を導入し誤対応除去を行った。実験では、従来方式と比較し、提案方式が高いS/Nを持つ計測結果を示すことを確認した。

参考文献

(1) 奥富正敏：ステレオ視(Stereo Vision), コンピュータビジョン技術評論と将来展望, 第8章, 128~129 (1998)
 (2) Pietikainen, M., et al.: Depth from three camera stereo, Proc. IEEE CVPR, 2~8 (1986)
 (3) Mulligan, J., et al.: Trinocular stereo: A real-time algorithm and its evaluation, International Jour. Computer Vision, 47, No. 1~3, 51~61 (2002)



(a) 従来方式



(b) 提案方式

図5. 円筒面の計測結果

(4) Okutomi, M., et al.: A multiple-baseline stereo, Proc. IEEE CVPR, 63~69 (1991)
 (5) Kang, S.B., et al.: A multibaseline stereo system with active illumination and real-time image acquisition, Proc. Int. Conf-on Computer Vision, 88~93 (1995)
 (6) 佐藤智和, ほか: 画像特徴点の数え上げに基づくマルチベースラインステレオ, 情報処理学会誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, 48, No.SIG16 (CVIM19), 25~37 (2007), 153~160 (2005)
 (7) 山本正信: 連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出, 電子情報通信学会論文誌, J69-D, No.11, 1631~1638 (1986)
 (8) Bolles, R.C., et al.: Epipolar-plane image analysis an approach to determining structure from motion, International Journal of Computer Vision, 1, No. 1, 7~55 (1987)
 (9) 杉本茂樹, ほか: 時空間濃淡画像からの回転物体の形状復元, 第4回画像センシングシンポジウム講演論文集, 21~26 (1998)
 (10) Sato, T., et al.: Dense 3-D reconstruction of an outdoor scene by hundreds-baseline stereo using a hand-held video Camera, International Journal of Computer Vision, 47, No. 1~3, 119~128 (2002)
 (11) 堂前幸康, ほか: カメラ撮影とロボットの位置取得の同期がとれた2点間を運動中の非同期連続画像における追跡安定度を考慮した単眼モーシヨンステレオ, 精密工学会誌, 77, No. 1, 90~96 (2011)