

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 サホロール ハムディ モハメド サレフ

サホロール ハムディ モハメド サレフ提出の本論文は「3D Reconstruction of Scattered Objects within RGB-D Images (RGB-D 画像内に点在する物体の三次元再構成)」と題し、全 5 章より構成される。

現実世界のオブジェクトの三次元構造を構築することは、コンピュータビジョンやロボット工学を含む幅広い分野で期待されている技術である。昨今、三次元構造の再構成は、コンピュータグラフィックス、仮想現実および拡張現実を用いた監視、ロボットナビゲーション、マニピュレーションおよび物体認識などの目標を達成するために活発に研究されている。本論文の目的は、オブジェクトの全ての表面をカバーする正確なモデルを再構築し、そのモデルを環境中から妥当な時間内にセグメント化することである。特に、同種または異種のオブジェクトが多数映り込んだシーンが、多数の視点からキャプチャされ、これらの RGB-D 画像が入力となる場合を対象とした、手法の提案と検討がおこなわれている。

本論文の最初の貢献として、(1)視点差に対する特徴ベースのアルゴリズムの不変性を改善するための、既存の特徴ベースアルゴリズムを拡張する汎用的な枠組みの提案がなされている。これは、オブジェクトの表面を回転して不変的な見え方に変換することで、形状の検出と記述を向上させることを目的としている。アルゴリズムの最大視点差、つまり視点不変性を改善することによる、もう 1 つの重要な利点は、オブジェクト全体をカバーするのに必要なフレーム数、つまりキャプチャと再構築にかかる時間を減らせることにある。本論文の第 2 の貢献として、(2)再現性の高く他と大きく異なる特徴を見つけ記述するアルゴリズムを用いたとしても、ノイズ、似た表面形状、オクルージョンによる外れ値に起因して対応セットには外れ値が多く発生する問題の解決がある。このような外れ値をフィルタリングで排除することは、非常に明確でよく知られた問題であるが、本論文では、この問題を解決する迅速な投票ベースのパターン認識スキームを提案している。このスキームでは、正常値である可能性に基づいて特徴間の対応をランク付けし、それにより時間と精度のトレードオフを考慮した外れ値排除を可能にしている。本論文の第 3 の貢献は、(3)オブジェクトの空間形状に関する情報が乏しいことから生じる、物体のセグメンテーションの問題の解決で、最初に三次元構造の再構成をおこなうことで、これを解決している。提案された多仮説モデリングアプローチは、同じ物体が同じシーンにある等の空間的な情報

を用いることで、物体のモデル化と背景からのセグメンテーションを同時にかつ自動的に実現するものである。ここで仮説とは、特徴の一致から得られる幾何モデルの候補を表す。

上記(1)の結果として、既存の二次元特徴が平均的に 33.3° を超える視点差に対応できないのに対して、本論文の手法を用いることで既存の特徴抽出と記述手法の視点不変性が改善され、明確な表面不連続性を有する物体は平均 52.8° 、全てのデータセットに対して、平均 45.4° の視点差まで対応することを可能にした。同様に、20 個の特徴アルゴリズムと表面の不連続性が異なるさまざまなオブジェクトを含む合計 140 個の組み合わせのうち、ある二次元特徴点アルゴリズムが、そのうちの 2 個の組み合わせのみでしか、 60° の視点の差という目標を超えられないのに対し、提案手法を用いると、73 個の組み合わせで、19 個の異なる特徴点アルゴリズムが目標値を超えることを確認している。さらに、提案された手法は、たとえ入力となる深度情報にノイズが存在する場合でも、ロバストに動作することが確認されている。上記の(2)の結果として、提案した手法は、PR（適合率と再現率）- AUC（曲線下面積）計量で、最先端のスキームがそれぞれ 74.2%（+5.6%、-21.5%）と 78.3%（+5.2%、-25.9%）であるのに対し、97.0%（+0.2%、-12.9%）を達成している。さらに、提案された方式は、最速の最先端の方式によって消費される時間の 41.5%（+11.7%、-4.4%）を超えない非常に高速な計算を可能にしている。同様に、提案手法は、オクルージョンや正常値の不足に対する高いロバスト性を実証している。上記の(3)の結果として、提案された多仮説モデリングアプローチは、仮説の適合率、点の再現率、およびスピードの面で、他の方法よりも優れていることが確認された。具体的には、750 の仮説に対し、正常値が 3.5%であるような条件で 50 試行の実験をおこなった結果、適合率 $69.6\% \pm 11.5\%$ 、再現率 $69.1\% \pm 5.4\%$ であった。これは、適合率、再現率ともに 12%以下の従来手法よりも非常に良い結果である。また、提案手法は仮説ごとに 6.45ms 以下で計算が終了するのに対し、従来の洗練された手法で、この 1.16%、ランダムに仮説を生成する手法で 268%長い時間が必要であった。この手法で重要な点は、漸次的なプロセスにある。これは、実行時間に加え、適合率と再現率のバランスが、調整できることを意味する。例えば、上記の 750 の仮説の代わりに、仮説の数を 200 にすれば、実行時間は四分の一になり、適合率と再現率はそれぞれ、 $93.9\% \pm 4.2\%$ と $32.4\% \pm 8.0\%$ になる。一方で、従来手法は漸次的ではなく、同じように仮説の数を 200 にしても、適合率と再現率は、それぞれ $6.6\% \pm 2.1\%$ と $3.8\% \pm 1.0\%$ に満たなかった。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。