

氏名(本籍)	は が まさ かず 羽 賀 正 和 (宮 城 県)
学位の種類	博 士 (情報科学)
学位記番号	情 博 第 186 号
学位授与年月日	平成13年3月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学専攻
学位論文題目	油圧ショベルのオペレータ支援機能に関する研究
論文審査委員	(主 査) 東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 中野 栄二 東北大学教授 北村 正晴 東北大学助教授 石原 正 (工学研究科)

論文内容要旨

第1章 序 論

建設作業の効率化，建設コストの低減は大きな社会的要求になってきている。油圧ショベルはその応用作業の多さにより現在の土木作業機械の代表的作業機である。油圧ショベルの作業で大きな割合を示す掘削作業は目標掘削深さに仕上げる作業であり，油圧ショベルのオペレータ以外に補助的作業を行う手元作業者，計測作業者が必要とされる。手元作業者は掘削作業の合間に掘削面の細かい手直し作業などを行い，計測作業者は掘削深さの計測，確認作業を行う。これらの作業は天候の影響がある中で行われ，掘削面への移動，上り下り，計測，手直し作業など大変労力がかかる作業となっている。そのため，油圧ショベルによる掘削作業の効率化を図るため，単に油圧ショベルの操作のみならず，油圧ショベルによる作業全体を考慮し，計測作業の削減，掘削操作の容易化を目的として研究を行う。

従来より掘削作業支援機能として水平掘削や傾斜掘削を支援する油圧ショベルのブーム，アーム，バケット（以下これらを総称してフロントと記す）の自動制御の研究が行われているが，使い勝手および掘削精度が熟練オペレータより劣る等の理由によりあまり普及していない。油圧ショベルは圧油を複数のアクチュエータへ絞りを介して分配しており，掘削抵抗による負荷の変化または油温の変化によりアクチュエータ速度が影響を受ける。また，制御指令を与えてからアクチュエータが動作するまでの応答遅れも大きい。そのため，高精度でフロントの軌跡を制御するには人間のような高度な経験に基づくフィードフォワード操作，さらに現場の状況を認識し瞬時に判断する事が必要になる。現場作業に有効なオペレータ支援機能を考えた場合，機械を完全に自動で動作させるのではなく，人と機械の優れた面をうまく複合させる事により作業効率を向上させる事が有効であるとの考えに基づき研究を行う。

第2章 油圧ショベルの構成と作業内容

油圧ショベルのブーム，アーム，バケットの先端部はそれぞれピン結合部を中心に円弧動作を行い，油圧

シリンダにより独立して駆動される。そのため、バケット先端を直線的に動作させるためには、アーム、ブームを複合的に動作させる必要があり、熟練を要する作業である。油圧ショベルの中でも高度な技術が要求される法面掘削作業においては斜面を仕上げる作業であるため、目標掘削面の目安となる丁張りの設置が必要とされ、計測作業、丁張り作成、設置等の負担も大きい。圃場整備作業においては、水田面全体に均等に水が行き渡るために、広範囲の水平面を正確に仕上げる必要がある。広範囲に渡る高精度な掘削作業は人間の感覚のみでは困難であり、掘削中の計測作業が必要とされる。この様に油圧ショベルの掘削作業は掘削面を正確に仕上げる必要性があり計測作業ならびに操作の熟練が要求される作業となっている。

第3章 油圧ショベルシミュレータの作成

油圧ショベルの支援機能の動作および有用性確認のため、油圧ショベルのブーム、アーム、バケットの動作を行うシミュレータを作成した。前後左右4方向に動作する電気ジョイスティック2本を操作レバーとして使用し、実機の代表的な動作特性を基にしたシミュレーションを行い、油圧ショベルのフロントの動作をパソコン画面上に表示した。画面上に目標掘削面および土の表示を行い、バケットが通過した土の表示部分を削ることにより掘削結果表示を行った。掘削の履歴が確認でき、掘削結果の評価に有効と考える。

第4章 シミュレータによる実験

油圧ショベルによる掘削時の深さ計測作業の削減および掘り過ぎの減少を図るため、目標掘削面とバケットの位置関係把握を支援する油圧ショベルフロントのグラフィック表示の評価を行った。画面表示の有用性の確認及び油圧ショベルのフロント操作を行う場合の操作性、掘削精度の評価を行った。

シミュレータにより斜面に沿った掘削動作を行った結果を図4. 1に示す。通常、油圧ショベルの掘削作業においては仕上げ面の目標となる目印の設置作業、仕上げ後の計測作業が必要とされる。目標掘削面および作業部分であるブーム、アーム、バケットの位置をグラフィック表示する事により、目標掘削面に対するバケットの位置およびバケットの角度が容易に把握できることが確認された。特に傾斜掘削において数値表示では困難であったX、Y方向の位置把握が容易に行えるため効果が大きいことが確認された。

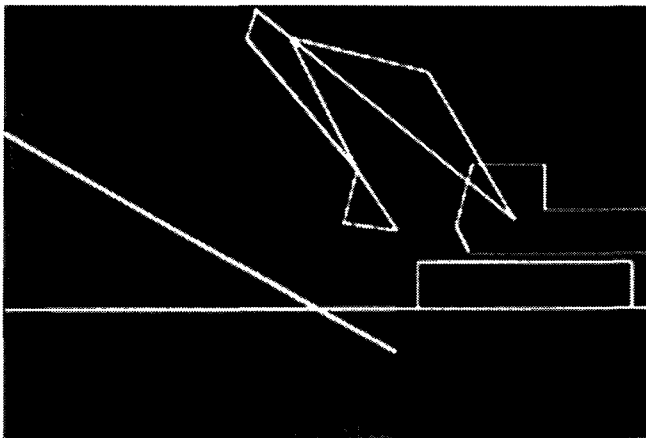


図4. 1 傾斜プラス30度場合の表示および掘削動作結果

シミュレータにより、グラフィック表示を用いた掘削動作と深さ数値表示を用いた掘削動作の掘削精度比

較を行った結果、掘り過ぎ、堀残しの面積を示す評価指標 $integ$ の値が50%～60%に減少し、グラフィック表示が精度向上に効果があることが確認された。また、グラフィック表示の場合、現在のアーム、ブームの動きによりバケットがどのように動作するのか予測が可能であり、設定深さに沿った掘削を行うために、どのようにアーム、ブームを操作するべきかを判断しやすいことが確認された。

第5章 領域制限掘削制御およびそのシミュレーション

油圧ショベルの操作部分に関しては人間の判断を主とし、それを支援する機能を機械が受け持つという考えに基づいて領域制限制御の検討を行った。領域制限制御とは従来の設定された軌跡をトレースする動作ではなく、設定した掘削面より下へは入り込まない様に掘削領域を制限する制御である。領域制限制御の原理を図5.1に示す。領域制限制御を用いて設定面より深く掘削しようとしても自然に設定面に沿った掘削となる。シミュレータにより領域制限制御による掘削動作を行い、以下のことが確認された。

- ・ 設定面に沿ってバケットを動作させる場合、操作はアーム引き操作のみでよいため、簡単に操作できる。
- ・ 設定面から離れた範囲での手動操作と設定面付近での自動制御との動作のつながりが良く掘削動作がスムーズに行える。

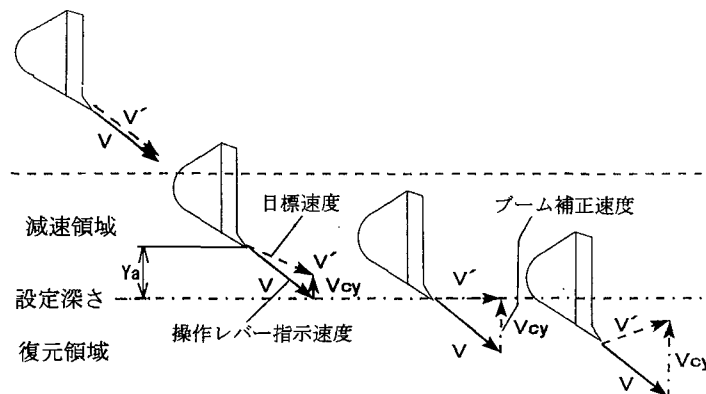


図5.1 領域制限制御の原理

また、実際の掘削を想定して掘削負荷の影響のシミュレーションを行い、速度低下により掘削精度が悪化することが確認された。特に石が混在する土質を想定したランダムな速度低下の場合は精度の悪化が増大する結果となった。その場合、制御にアクチュエータ動作速度のフィードバックを加えることにより速度低下による精度悪化が減少することが確認された。

第6章 実機における実験

油圧ショベル実機を用いて、操作パネル上の深さ数値表示を目安にした水平掘削動作および領域制限制御を用いた水平掘削動作を行った結果、深さ数値表示による掘削に比較し領域制限制御による掘削は掘残しが少なく、掘りすぎ、堀残し量を表す評価指数 $integ$ は数値表示の評価指数に比べ50～60%に減少し、精度が良い結果となった。

深さ数値表示による掘削動作、領域制限制御による掘削動作、いずれの場合も実機とシミュレーションの精度の評価指標 $integ$ は良い一致を示し、シミュレーションの有用性が確認された。

領域制限制御により堅土掘削を行った結果、最大200mm程度の掘残しが生じた。設定深さ付近では制御の減速により掘削力が低下するため、領域制限制御の設定深さを目標深さより深くし、操作パネルの深さ表示を目安にしながら掘削を行った。その結果、アーム鉛直姿勢付近では目標深さまで掘削が可能になった。掘残しを減少させるために、掘削負荷またはオペレータの操作に応じて、制御によるブーム、アームの減速量を少なくして掘削力を増加させることが有効と考える。一方、フロントを最大に伸ばした位置からの動き出し付近においては掘残しの減少はあまり確認されなかった。フロントを最大に伸ばした位置付近ではアーム動作によるバケット爪先の動作が垂直方向に近い掘削力が有効に働きにくいためと考えられ、掘削力をより有効に作用させるために地面に対するバケット爪先角度およびバケット動作方向の制御が必要になると考える。

領域制限制御機能についてのユーザーからの主な評価内容として、計測の手間が省ける、掘り過ぎることがなくてよい、掘削作業が簡単、などの評価を受けた。要望としては、設定方法を簡単にしてほしい、掘削精度の向上、傾斜掘削機能がほしい、などの意見を得た。

第7章 外部基準を用いた領域制限制御

連続した溝掘削、圃場整備などの作業では、長い距離、または広い範囲に渡って油圧ショベルを移動させながら、一定の深さで掘削を行う必要がある。油圧ショベルが平らな地面の上で作業する場合には機体を基準とした設定深さを用いて一定深さでの掘削は可能であるが、通常の現場では地面に起伏があり機体の移動により機体高さが変化する。そのため機体を基準とした設定深さを用いて広範囲にわたる水平面を形成する事は困難である。機体の高さ変動に左右されず一定の深さでの掘削を行うために、レーザーなどの外部基準を用いた領域掘削制御の実験を行った。

12tクラスの油圧ショベル日立 EX120-5 を用い、外部基準にレーザー灯台を用いた溝掘削試験を行った結果、16mの掘削距離に渡り、ほぼ±100mmの掘削精度が達成され、外部基準方式を用いた深さ設定による領域制限制御の有効性が確認された。

ユーザーテストにおいてレーザー灯台を使用した領域制限掘削により下水本管工事現場にて仮埋設用の溝掘削を行い、荒仕上げとして実用上十分な掘削精度、掘り過ぎない安心感、掘削作業が容易、掘削時の深さ計測削減による作業効率向上、通常掘削と感覚と同様に操作でき違和感の無い操作感覚等の評価を得た。

第8章 結論

人と機械の優れた面を複合させる事により作業効率を向上させる考えに基づき、油圧ショベルの支援機能としてバケット、アーム、ブーム動作を表示する掘削状態のグラフィック表示、掘り過ぎることなく目標掘削面に沿って掘削可能な領域制限制御について研究を行い、以下の結論を得た。

油圧ショベルのブーム、アーム、バケット動作のシミュレータを用いて、グラフィック表示および領域制限制御の評価を行い、精度向上、作業性の向上などの有用性が確認された。また、油圧ショベルの実機を用いて領域制限制御の評価を行い、シミュレータの場合と同様に精度向上、作業性の向上などの有用性が確認された。

レーザー基準を外部基準として用いた領域制限制御は長い溝掘削や広い範囲の掘削作業に有効であることが確認された。レーザー基準を用いた領域制限制御はユーザーより掘削作業が容易、作業性向上などの評価を得た。

論文審査の結果の要旨

油圧ショベルは土木作業で広く用いられているが、オペレータは劣悪な環境下で熟練を要する作業を長時間にわたって要求されることが多い。本論文は油圧ショベルの作業の中で最も重要な掘削作業に対して、オペレータの負担を軽減する新しい支援システムを提案し、その有効性について考察したものであり、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、油圧ショベルの作業内容を概観し、従来の油圧ショベルのオペレータ支援機能の問題点を明らかにしている。

第3章では、新しく開発した油圧ショベルのシミュレータについて述べている。このシミュレータは、オペレータがジョイスティックを操作することにより、モニタ画面に表示される仮想的なバケット、アーム、ブームを実機とほぼ同様に動作させることができる。これは、支援機能の開発を効率的に行うために有用である。

第4章では、油圧ショベルシミュレータを用いて、掘削状態の表示法が掘削精度に与える影響について考察し、効果的なグラフィクス表示法を提案している。この表示法を用いることにより、掘削深さのみを数値的に表示する場合に比べ、掘削精度を大幅に向上させることが可能であることを確認している。これは有用な知見である。

第5章では、計算機による自動制御により、設定面より下へは掘削が行われないようオペレータを支援する「領域制限制御方式」を提案している。シミュレータを用いてこの支援機能の効果について実験を行い、手動と自動のつながりが良くオペレータが違和感なく作業を行えることを確認している。これは極めて興味深い成果である。

第6章では、油圧ショベル実機に対して、前章で提案した領域制限制御方式を実装し、実際に掘削作業を行い、これらの支援機能の有効性を確認している。これは、極めて重要な成果である。

第7章では、レーザーを外部基準に用いた領域制限制御方式を提案している。実機による実験の結果、機体移動による機体の高さ変動によらず、一定の深さでの広範囲の掘削が可能になることを確認している。これは実用上極めて有用な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、油圧ショベルの掘削作業に対して、人間の優れた操作能力を生かしつつ、計算機による計測制御技術によりオペレータの負担を軽減する支援機能を提案し、その有用性を実証したものであり、人間工学、制御工学および情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。