

直接操縦から自律制御へのオンライン移行型遠隔作業ロボットシステム

— 自由空間の高速獲得とオペレータ支援機能 —

○長谷川勉、小船博行、向井大樹、村上剛司、倉爪亮(九大)

Rapid Acquisition of Free-space and Operator support in a telerobotic system

Tsutomu Hasegawa, Hiroyuki Kobune, Daiki Mukai, Kouji Murakami, Ryo Kurazume

Kyushu University

Abstract — A method of rapid acquisition of free-space for a telerobotic manipulator is proposed. The free-space structure is immediately utilized to support human operator in master-slave manipulation and leads to on-line transition to autonomous telerobotic operation.

Key Words: telerobotics, free-space, autonomous manipulation

1. はじめに

マスタスレーブ方式の遠隔操作は、危険な非整備環境において事前知識なしで種々の作業を実施できる唯一の方法である。しかし、作業速度は遅く、熟練したオペレータでも操縦負担は大きい。この負担を軽減し、システムの機能を高めることを目的として、筆者らは直接操縦から自律制御へのオンライン移行を実現する新しいシステム方式を提案した[1,2,3]。本報告では、システム性能を高めるために新たに付加した2つの機能について述べる。

自律制御の重要な要素であるマニピュレータの動作計画には、環境内の障害物の形状や配置を表現した環境モデルと考えられてきたが、非整備環境の信頼できる幾何モデルをコンピュータビジョンで自動生成するのは非常にむずかしい。そこでこのシステムでは環境モデルを生成することをやめ、その代わりに自由空間のモデルを直接生成し、この自由空間モデルに基づいて遠隔マニピュレータの動作を自動計画する。これはスレーブマニピュレータの作業動作軌跡が、操作員の注意深い操縦により環境内障害物との衝突を避けた安全軌跡になっていることに着目し、その掃引空間を記録蓄積し自由空間モデルとするものである。作業開始直後は操作員による操縦が必要であるが、作業が進めば動作の自動計画が可能になる。このシステムを使いやすく高機能のものとするには、いくつかの改善点が考えられるが、本稿では、自由空間の高速獲得と獲得範囲の拡大の手法、および獲得された自由空間記述を利用したオペレータ支援機能を提案する。

2. システムコンセプト

マスタスレーブマニピュレーションから自律遠隔作業へのオンライン移行は、Fig. 1に示すように2つのステップで達成される。Phase1は従来のマスタスレーブ型遠隔操作であり、スレーブの動きをオペレ

ータがモニタ画面で監視しながらマスタアームを操作して作業を行う。スレーブアームの掃引空間とスレーブ手先付近に装備されたステレオカメラの走査

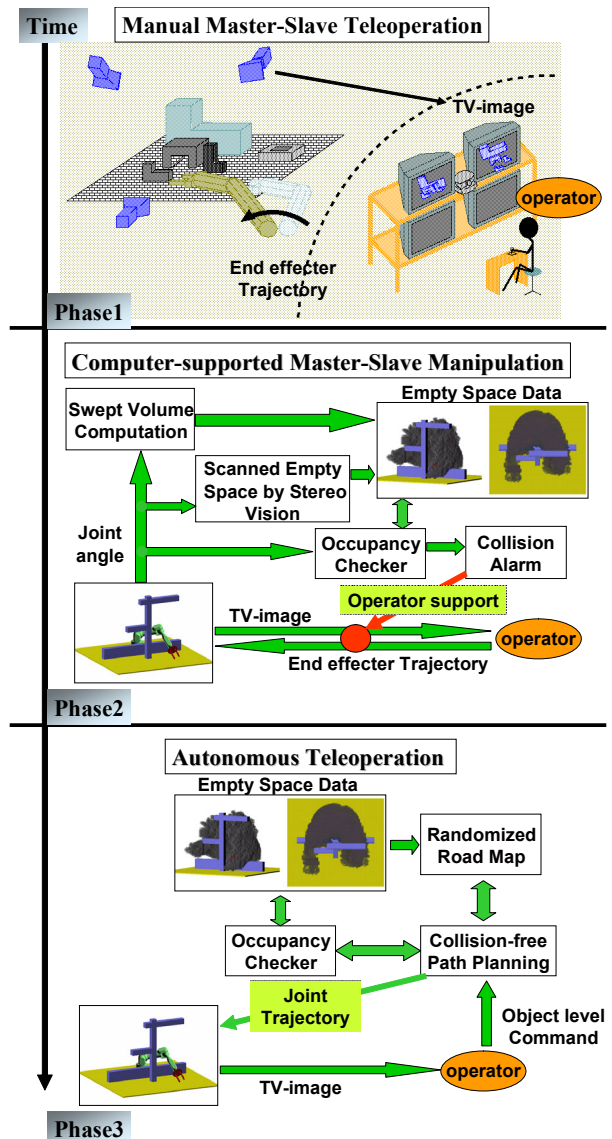


Fig. 1 システム構成とオンライン移行

空間が3次元の自由空間として記述される。いくつかのタスクが実行されて自由空間が蓄積されると、これを用いて操作者を支援するPhase2に入る。システムはスレーブマニピュレータが既掃引の自由空間中に含まれるかどうかチェックし、自由空間外の部分を表示して注意を促す。また、自由空間内に含まれているときにも、マニピュレータ各部から最近傍の自由空間境界までの距離を計算し、これに基づいた支援を行う。システム支援下での遠隔作業が更すすんで自由空間が十分記述されると、Phase3の自律制御に移行する。オペレータはシンボル等による高レベルのコマンドを与えるだけで、システムがマニピュレータ動作計画を行い、自律的に作業実行されるようになる。

3. 自由空間の高速獲得

3.1 マニピュレータ掃引空間と Octree による記述

遠隔作業中のスレーブマニピュレータ各関節エンコーダの関節角度信号を読み取り、マニピュレータ各部が占有あるいは掃引した三次元空間を記録蓄積する。掃引空間の補空間がマニピュレータの進入できない禁止空間とみなされる。経路計画段階でのマニピュレータの衝突チェックはこの禁止空間における占有チェックとなる。

実際の遠隔操縦中にリアルタイムで占有・掃引空間の記述を生成したい。しかしマニピュレータが掃引する空間は複雑な形状を持つので、その表面形状を正確に陽に記述するのは非常に難しい。そこで、三次元実空間を Octree で表現し、空間の再帰分割と階層的干渉チェックとの組み合わせにより、掃引空間を記述する。さらにマニピュレータの形状近似により空間セルとマニピュレータの干渉チェックの高速化を図った。

レベル0で1辺 2.0m の立方体で表現された作業空間が再帰的に分割され、レベル7では1辺が約 1.6cm の立方体 2,097,152 個となる。マニピュレータの占有空間の計算は、自由空間が蓄積されるにつれて Octree の上位の階層で処理が終わるようになるので、2/3 程度に短縮される(Fig.2)。

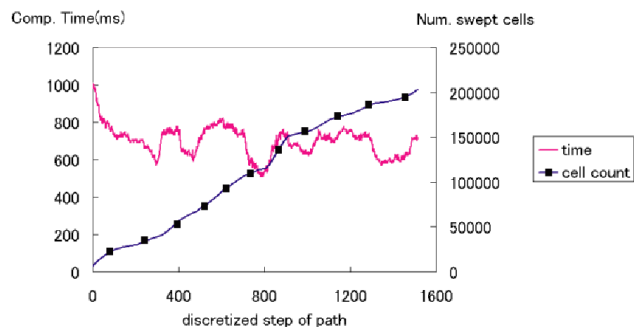


Fig.2 自由空間の蓄積と占有空間計算時間

さらにマニピュレータを多面体モデルでなく単純形状の体積モデルで近似することにより、1コンフィギュレーションにつき平均 5.5ms に短縮できた。

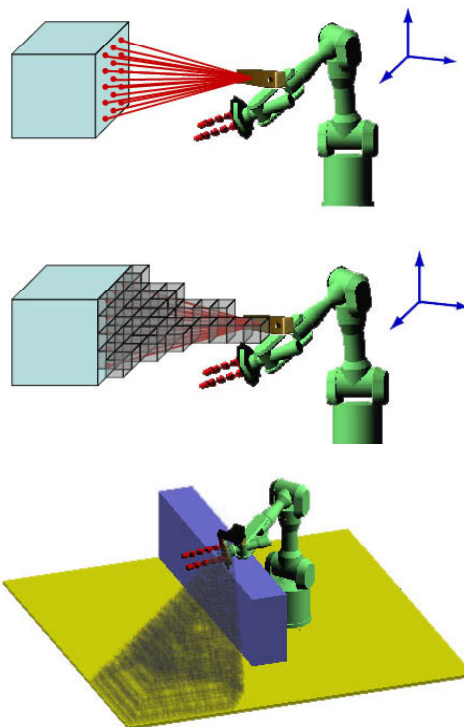


Fig.3 マニピュレータ搭載ステレオカメラ

3.2 マニピュレータ搭載ステレオカメラによるスキャン空間の獲得

非整備環境でのコンピュータビジョンによる物体認識は困難だが、奥行き地図なら容易に得られる。これを利用して、物体に占有されていない空間の記述範囲の拡大と記述生成の高速化をはかる。

カメラ視野の各画素について被写体表面までの距離がわかれば、視点からその距離までは物体に占有されていない。そこで、スレーブマニピュレータ手先近傍に小型ステレオカメラを搭載し、奥行きマップを生成し、これに基づいて自由空間の記述蓄積を行う。オペレータによるマニピュレータ操作により、カメラ視野が空間内を走査するので、マニピュレータが掃引・占有しない領域からも自由空間が得られる。

4. 空間記述を用いたオペレータ支援機能

遠隔操縦作業の進行に伴って、自由空間が蓄積されはじめたら、これを利用してオペレータの支援を行う。マニピュレータ各部が、それ以前に掃引された空間内にある限り、環境内で衝突することはない。マニピュレータの一部が既掃引空間の外に出たときは、オペレータに注意を喚起する警告を発する。また、自由空間の蓄積が進んだあとは、マニピュレー

タから再近傍の自由空間境界までの距離を計算し、境界に接近したときは同様に警告を発する。また現在は未実装であるが、必要に応じて、遠隔スレーブマニピュレータの動作速度を強制的に下げて安全度を高めることもできる。

マニピュレータの自由空間内外判定に要する計算時間は約 30ms 秒であった。また自由空間記述境界までの距離計算は、ハンド中心と肘関節中心について実装しており、オクツリーを用いた最近点探索アルゴリズム[4]を利用して、計算時間約 50ms で最近傍境界までの距離を計算できている(Pentium4, 2.4GHz)。



Fig.4 注目点

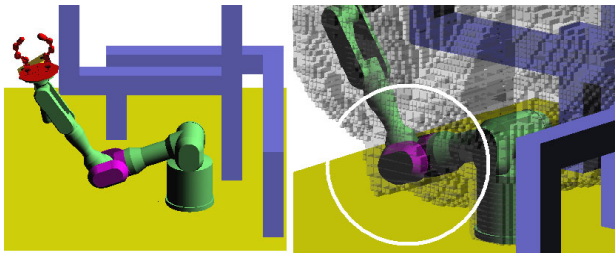


Fig.5 オペレータへの警報(左)と空間境界までの距離計算

5. 空間記述を用いた障害物回避動作計画

5.1 ロードマップの生成

3次元実空間での自由空間の構造が記述されると、それに対応した C-空間での構造特徴を抽出することにより、障害物回避動作が効率的に計画できるようになる。この目的で我々はランダム化ロードマップ[5]を導入する。本論文で扱う3次元実空間での自由空間は、複雑で不規則な形状をしているうえ、遠隔操作の追加によりその領域が増加することもあるが、ランダム化ロードマップはそのまま自然に対応できる。また特に遠隔マニピュレータが作業環境内で多数の異なった動きを実行して作業する場合に有効である。

ロードマップは確率的な手法で構成されたグラフ $R = (N, E)$ である。頂点 N は、マニピュレータが衝突していないコンフィギュレーションの集合であり、辺 E は、 N における2つの頂点を連結する衝突のない経路である。ロードマップの生成ではまず、ランダムに衝突のないコンフィギュレーション c を選択し、 N に加え

る。ついで c と N に含まれる n との連結を試みる。 c と n が連結されると衝突回避経路である辺 (c, n) が E に加えられる。以上の作業を繰り返すことによりロードマップが生成される。

5.2 衝突回避経路の探索

マニピュレータの初期コンフィギュレーション Ic と目標コンフィギュレーション Gc が与えられると、衝突回避経路は次の3つのステップで計画される。

- (1) Ic からロードマップ上の近傍の頂点 Ni までの経路を探索する。
- (2) Gc からロードマップ上の近傍の頂点 Ng までの経路を探索する。
- (3) ロードマップ上で Ni, Ng を繋ぐ経路を計画する。

6. シミュレーション

6.1 自由空間の記述

マニピュレータを Fig.6 上段で示す作業環境でマスタスレーブ操作したとき、得られた掃引空間を中段に、また手先に装着されたステレオカメラが走査して得られた自由空間を加えたものを下段に示す。

マニピュレータが掃引したレベル7のボクセル総数は226,556個で全体の約11%である。カメラが走査した空間を加えると、ボクセル総数は431,467個で約21%である。1つのコンフィギュレーションあたりのボクセル計算に要する時間は、最大で94ms 平均で32ms であった。

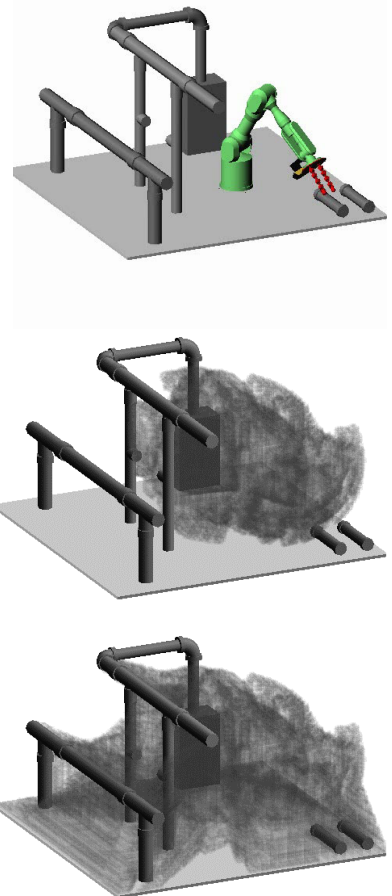


Fig.6 作業環境と獲得自由空間

6.2 障害物回避動作の計画

獲得された自由空間記述を用いて、指定された動作開始点から動作目標点までの経路を計画した例を Fig.7 に示す。

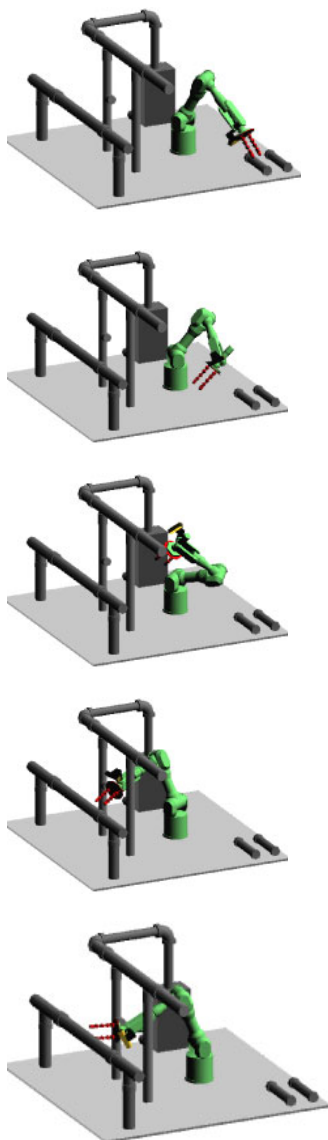


Fig.7 計画された障害物回避動作

7. むすび

遠隔ロボット作業環境中の自由空間記述を生成する新しいアプローチを提案した。これは環境内の物体モデルを陽に生成する代わりに、オペレータが注意深く遠隔操作するスレーブアームが占有・掃引する空間と、スレーブアーム先端に装備したステレオカメラが走査する空間とを計算し、三次元実空間の自由空間として再構成するものである。

本報告では特に、自由空間の再構成の高速化と、生成された自由空間記述に基づいてオペレータを支援する方法について述べた。マニピュレータの遠隔操縦

中にリアルタイムで自由空間が再構成でき、オペレータ支援も即座に実行できる。十分に自由空間の記述がなされた後は、オペレータが操縦した動き以外の動作を自動計画できた。これらより、遠隔操縦から自律制御へのオンライン移行の見通しを得た。

参考文献

- [1] T. Hasegawa, K. Nakagawa, K. Murakami, "Collision-free path planning of a telerobotic manipulator based on swept volume of teleoperated manipulator", Proc. 5th IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, pp.259-263, Besancon, 2003
- [2] T. Hasegawa, K. Nakagawa, K. Murakami, "Toward On-line Transition to Autonomous Teleoperation from Master-slave Manipulation", Proc. IEEE ICRA, Apr. 2004
- [3] 長谷川勉、中川公輔、村上剛司, "遠隔マニピュレータの作業空間構造獲得と障害物回避動作計画", 日本ロボット学会誌、Vol.22, No.4, pp.515-518 (2004)
- [4] 登尾啓史、有本卓, "オクトツリーを利用したロボットと障害物近接2点決定アルゴリズム" 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.3, pp.39-48, 1989
- [5] L.E.Kavraki et.al., "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces," IEEE Trans. RA., Vo.12, No.4, pp.566-579, 1996