研究速報

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

長谷川 勉* 中川 公輔* 村上 剛司*

Collision-Free Path Planning of a Telerobotic Manipulator based on Swept Volume of Teleoperated Manipulator

Tsutomu Hasegawa*, Kousuke Nakagawa* and Kouji Murakami*

A new approach to collision-free path planning for a telerobotic manipulator is proposed. Using swept volume of a slave manipulator tele-operated by a human operator, on-line transition to autonomous tele-operation from master-slave manipulation is achieved without any geometric model of an environment. This feature enables wider application to unstructured environment.

Key Words: Teleoperation, Collision Avoidance, Roadmap, Swept Volume

1. はじめに

マスタスレーブ方式の遠隔操作は、危険な非整備環境で、事前知識が何とも与えられていないときに種々の作業を実施できる唯一の方法であった。しかし、初めての遠隔作業環境で障害物に囲まれたスレーブアームが作業を遂行できるように、マスタアームを注意深く操作するのはオペレータにとって非常に煩わしく困難である。仮想現実の種々の手法を使えば、オペレータの負担を軽減することはできるだろうが、それでもマニピュレータのすべての動作を決定しなければならない[1]。本論文では、遠隔スレーブマニピュレータの動作の自動計画への新しいアプローチを提案する。

障害物回避動作計画についてはこれまでに多くの手法が提案されている[2][3]。いずれの手法も環境内の障害物の幾何形状や配置を表現した環境モデルが不可欠である。しかし、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難しい。環境内の物体の表面光学的特性が金属表面の全反射から暗黒色塗装面のほぼ無反射まで極めて多様であること、照明による影の存在、物体による隠蔽、物体の動的位置変化など、視覚画像処理によって困難な状況が存在するからである。

本論文では、コンピュータビジョンで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、そ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手法を提案する。これは遠隔作業システムにおけるスレーブマニピュレータの動作軌跡が、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たものである。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。以下、第2章では、遠隔作業環境の三次元自由空間の生成原理を提案し、第3章では障害物回避動作計画手法について述べる。第4章では、開発された遠隔作業システムについて述べたのち、第5章でシミュレーション結果を示す。第6章は結論である。

2. 三次元自由空間の再構成

2.1 空間再構成の原理

マスタスレーブ方式の遠隔作業過程では、操作員は、映像モニタを通して環境内の障害物や作業対象の配置を知る。そして作業手順を計画し、障害物に衝突しないよう注意しながらマニピュレータを操縦して作業を実行する。遠隔のマニピュレータ全体と把握運搬物体の衝突回避は、操作員の目視によってなされる。この過程で、関節角度空間におけるマニピュレータの動作軌跡は、関節エンコーダの出力から直接得ることができる。実空間ではマニピュレータの各部は一定の体積を占有し、さらに動作軌跡にそって三次元の自由空間内を掃引することになる。

マスタスレーブマニピュレータで、いくつかのタスクを実行すると、関節空間（コンフィギュレーション空間：C-空間）における衝突のない軌跡の記録が蓄積される。関節空間ではそれらは直線や曲線で構成される一次元セグメントであり、連続領域を覆うことはない。しかしそれらが三次元作業空間の掃引領域に変換されると、三次元の連続領域を覆うことになり、その連続空間領域には元のマニピュレータ動作軌跡と異なる新たな軌跡の掃引空間が含まれるようになる。

マニピュレータが、二つの類似してはいるが異なる動きを、近接した領域で実行したとしよう。三次元実空間で二つの軌跡に

原稿受付 2003年4月7日

*九州大学

*Kyushu University

沿った掃引空間の多くが重なっていたとしても、C-空間（関節角度空間）では二つの軌跡は分離している。実空間では、これら二つの動作軌跡をつなぐ経路を多数発見することは容易であるが、C-空間では経路を一つも発見できないことになる。このことが、関節空間での動作軌跡を実空間の掃引空間領域に変換することの意義を説明している。三次元の掃引空間から、さらにC-空間での自由空間領域を再構成することができる。

遠隔の三次元実作業環境は、障害物に占有された空間と物体に占有されていない自由空間とで構成されているが、本論文で提案する手法では、操作員が目視監視しながら遠隔操縦するスレーブマニピュレータにより掃引される空間領域の集合として、自由空間が得られる。したがって、実環境でスレーブマニピュレータを色々動かすほど、自由空間構造がよりよく獲得される。

2.2 空間表現と実装

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、その境界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、三次元実空間を立方体のボクセルで表現し、ボクセル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、掃引空間を効率的に記述する方法を開発した。立方体のボクセルは $3 \times 3 \times 3$ に再帰的に分割され、所望の分解能を得る。

操作員が操縦した遠隔スレーブマニピュレータの動作軌跡は、関節センサ出力を記録して得られる。この軌跡はC-空間で離散量子化された一連の点に変換され、各点においてマニピュレータに占有されたボクセルが干渉チェック計算により得られるので、それらが統合されて掃引空間となる。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。

遠隔操作の過程で、操作員の操縦操作によって自由空間がどの程度再構成されたかを知ることができれば有益である。この目的で、自由空間の獲得率を導入した。これは、マニピュレータに実際に掃引された空ボクセルの数を数え上げて得られる。マニピュレータの動作範囲に障害物がない場合の動作空間全体を構成するボクセル数を数え上げることができるので、その値と獲得率を比較することで、遠隔操縦から自律制御への移行時期の判断の目安となるからである。

3. 衝突回避動作計画

3.1 ロードマップの生成

三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。この目的でランダム化ロードマップ[4]を導入する。本論文で扱う三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の動作計画に特に有効である。

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。ノード 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、エッジ E は N における二

つのノード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、まずランダムにコンフィギュレーション c を生成し、それが実空間で衝突していないものであれば、 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エッジ (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。

3.2 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 I_c と目標コンフィギュレーション G_c が与えられると、衝突回避経路は次の三つのステップで計画される。

- (1) I_c からロードマップ上の近傍のノード N_i までの経路を探索する。
- (2) G_c からロードマップ上の近傍のノード N_g までの経路を探索する。
- (3) ロードマップ上で N_i, N_g を繋ぐ経路を計画する。

4. システム構成

提案手法の正当性と可能性を検証するため、遠隔作業システムを開発した。現在の実装では、遠隔スレーブマニピュレータと作業環境は幾何シミュレータで置き換えている。**Fig. 1** はシステム構成を示し、以下の要素で構成されている。

- (1) 遠隔操作系：Master manipulation system

操作員のための遠隔マニピュレータ操縦桿と監視用映像提示機能を有する操作卓である。遠隔スレーブマニピュレータの先端位置姿勢を制御するための三次元マウス（位置姿勢の6軸入力）とマニピュレータの動作を監視するディスプレイで構成される。

- (2) 作業実行系：Tele-manipulation site

環境モデルやマニピュレータで構成されるシミュレータで作業動作シミュレーションを行う。スレーブマニピュレータには7自由度マニピュレータ（PA-10、三菱重工）を用いる。このマニピュレータの全長は1,365 [mm] である。**Fig. 2** にスレーブマニピュレータとその基準座標系を示す。

- (3) 自由空間モデル：3D free space model

遠隔作業空間は一辺の長さが2,000 [mm] の立方体空間として定義している。立方体の各辺は基準座標系軸と平行

Fig. 1 System architecture

で、その中心座標は(300,0,1000)である。作業空間は再帰的に $3 \times 3 \times 3$ のボクセルに分割され、レベル 0 の一つの立方体からレベル 4 の 531,441 のボクセルまで階層的に構成される。レベル 4 のボクセルの大きさは一辺の長さが約 25 [mm] である。マニピュレータが実際に動作可能な有効領域は、環境内に何も障害物がない状態でレベル 4 の 531441 ボクセルのうち 221303 ボクセルである。

(4) ロードマップ生成系：Randomized Roadmap generator

C-空間（関節角度空間）でランダムにコンフィギュレーション（関節角度ベクトル）を生成する generator および、生成されたコンフィギュレーションをその時点での作成途中のロードマップに接続する local planner で構成される。ロードマップ生成の手続きは以下のとおりである。新しいコンフィギュレーションが生成されるたびに、ロードマップから関節角度空間でのユークリッド距離のしきい値（80 度）以内にあるすべてのノードが拾い出される。local planner は、各ノードに対し、新たに生成されたコンフィギュレーションから衝突なく接続できるかどうか調べる。現在の実装では、接続経路は C-空間での直線に限定し、この直線上で 2 点間距離が 10 度以下になるまで、2 分法による干渉チェックを繰り返している。この干渉チェックは、マニピュレータの三次元幾何モデルと、階層型禁止空間モデル（自由空間モデルの補空間）との間で行う。こうして得られたすべての干渉のない経路がロードマップに加えられる。

(5) 経路計画系：Collision Free Path Planner

与えられた初期コンフィギュレーションおよび目標コンフィギュレーションのそれぞれをロードマップに連結し、ついで、ロードマップ内でそれら連結点同士を接続する経路の探索を行う。前者にはロードマップ生成に使用したのと同じ local planner を用いる。後者のロードマップ内経路探索は A*アルゴリズムを用いている。

なお、ソフトウェアパッケージとして、ロボットや環境の表示には OpenGL を、また、物体パーツ間の幾何学的な干渉チェック計算には米国ノースカロライナ大学から公開されている V-Collide を使用した [5]。

Fig. 2 PA-10 manipulator

5. シミュレーション

まず、基本的な考えを視覚的に説明するための単純な実験を示す。操作員はコンフィギュレーション $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7) = (90, -45, 0, 0, 0, 0, 0)$ から $(90, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ を通り、 $(90, 45, 0, 0, 0, 0, 0)$ までマニピュレータを線形に動かす。Fig. 3 はこのときの掃引空間を表している。

次に作業システムに初期コンフィギュレーション $(90, -45, 0, 0, 0, 0, 0)$ および目標コンフィギュレーション $(90, 45, 0, -120, 0, -90, 0)$ を与えると、オペレータによる作業では通ったことのない経路 (Fig. 4) を自律的に計画した。このときレベル 4 の掃引空間ボクセルは約 15,000 であった。

次に、複雑な環境下における作業のシミュレーション実験を行った。Fig. 5 はスレーブマニピュレータによる掃引空間を表し、レベル 4 では約 67,000 ボクセルであった。このとき空間獲得率は 30.3% (67,000 掃引空間ボクセル / 221,303 動作可能ボクセル) である。

作業システムは、掃引空間 (Fig. 5) に基づいてロードマップを作成した。衝突のない 5,000 個のコンフィギュレーションのランダム選択に 6.3 [s]、それらを繋ぐ 20,000 のエッジで構成されるロードマップ作成に 138.6 [s] かかった。作業システムには、中央の障害物の左手前下方をハンドの初期位置姿勢とし、右手前下方を目標位置姿勢として与えた。これに対し、システムが

(a) Oblique view (b) Top view

Fig. 3 Swept volume (1)

Fig. 4 New trajectory

(a) (b)

Fig. 5 Swept volume (2)

Fig. 6 Planned path (1)

Fig. 7 Planned path (2)

Fig. 8 Swept volume (3)

Fig. 9 Planned path (3)

計画した経路を Fig. 6 に示す。計画には 6.9[s] かかった。実験は Pentium III 1 GHz CPU を使い、時間は 50 回の平均である。

Fig. 7 は計画された異なる動作を示す。また環境を変え、操縦操作を行って得られた掃引空間を Fig. 8 に、これに基づいてロードマップを生成し、計画された経路の例を Fig. 9 に示す。

この例では、図中左上のコマが表わす初期位置姿勢に対し、二つの異なる目標位置姿勢（右上のコマと右下のコマ）を与え、それらを順次つなぐ経路が得られている。

6. まとめと考察

遠隔操縦されるロボットマニピュレータの掃引空間を記述することにより、コンピュータビジョンなしで作業環境のグローバルな構造が獲得でき、これに基づいて自律的な障害物回避動作計画が可能となることを明らかにした。これによりロボットを作業現場に配置したのち、操作員の操縦により直ちに作業を開始でき、作業環境が十分に蓄積された後には、ロボットの自律制御に逐次移行できる見通しを得た。

本手法により可能となる応用シナリオの例として、化学プラントや原子力発電プラントのような人工環境における緊急危険作業の実施があげられる。複雑な配管中のバルブの故障修理は、その開閉、分解、部品交換、再組み立てなどのタスクが含まれ、マニピュレータはバルブ取り付け箇所近傍に何度も接近を繰り返してそれらタスクを遂行することになる。これに対し、作業開始当初は操作員がマニピュレータを注意深く遠隔操作することになるが、空間構造情報が蓄積された後は、自律制御による自動遠隔作業に切り替えることが可能になる。自律制御段階では、視覚システムも必要となるかもしれないが、グローバルな作業空間構造は分かっているの、操作対象の近傍やロボット手先周辺を監視・認識する局所的な視覚システムで十分であると考えられる。

本提案手法は動的変化のない作業環境への応用を対象としたものであるが、アームが移動ロボットに搭載されている場合でも、移動動作が正確に計測できれば、アームの掃引空間が得られるので適用可能である。一方、実用化システムとするうえで解決すべき問題も残されている。

- (1) 動作目標とすべき手先の位置姿勢をどのように指示・指定するか？
  - (2) ロボット自身の作業による環境内物体配置の変化を織り込んで、空間記述とロードマップにどのように更新するか？
- これらについては、実施すべき作業に関する事前情報、自然言語による対話型教示、あるいは遠隔実作業環境へのレーザポイント [6] などが解決に役立つと思われる。

参考文献

- [1] Y. Tsumaki, M. Takahashi, W.K. Yoon and M. Uchiyama: "Virtual Rader: An Obstacle Information Display System for Teleoperation," Proc. 2002 IEEE ICRA, pp.1185-1190, 2002.
- [2] J-C. Latombe: Robot Motion Planning. Kluwer, 1991.
- [3] Y.K. Hwang and N. Ahuja: "Gross Motion Planning - A Survey," ACM Computing Surveys, vol.24, no.3, pp.219-291, 1992.
- [4] L.E. Kavraki, P. Svestka, J-C. Latombe and M.H. Overmars: "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces," IEEE Trans. RA, vol.12, no.4, pp.566-579, 1996.
- [5] <http://www.cs.unc.edu/~dm/>
- [6] T. Hasegawa, T. Suehiro and K. Takase: "A Robot System in Unstructured Environment Based on an Environment model and Manipulation Skills," Proc. 1991 IEEE ICRA, pp.916-923, 1991.