

高速 3 次元距離センサによる計測点群との リアルタイム干渉判定に基づくオンライン回避動作の生成

○稲田大亮 辻徳生 倉爪亮 諸岡健一 (九州大学)

1. 緒言

現在の日本は 65 歳以上の人口が 25 % 以上の超高齢化社会である。更に 20 年後には 33 % を突破し、3 人に 1 人が高齢者になると見込まれている。今後も高齢者人口の割合は増加していくと考えられ、介護現場での人手不足が更に深刻化していくと予想される。

この問題の解決策として、介護者の負担を減らすことができる、サービスロボットによる生活支援システムが期待されている。一般にロボットは事前に計画された動作を実行し、動作中に環境が変化する事を想定していない。例えば産業用ロボットは整備された工場内で作業するため、決められた動作を繰り返せば良い。しかし、サービスロボットの作業環境は人の生活空間であるため、決められた動作だけでは人に危険が及ぶ可能性がある。例えばロボットの移動中に経路上に現れた障害物と衝突したり、サービス動作中に接近してきた人と接触してしまう事が予想される。このように、サービスロボットはサービス動作に加えて、リアルタイムで変化する環境に対応して安全に動作する事が求められる。

ロボットの障害物回避については、点群センサを用いた手法が研究されている。例として、Peasley ら [1] は、RGB-D カメラを用いてリアルタイムで移動ロボットの障害物を回避した経路の生成を行っている。また、人工ポテンシャルを用いた移動ロボットの障害物回避手法 [2] が、提案されている。環境の変化に応じてロボットの動作を変更するシステムとして、中島ら [3] は、床面に設置した Laser Range Finder で人の動きを監視し、移動経路上の人とロボットが衝突する可能性が高いと判断すると経路を切り替えるシステムを構築している。しかし、このシステムが変更できるのはロボットの移動経路のみである。また、接近してくる人を避けることができない。

本研究では高速 3 次元距離センサを用いて、周囲の物体の位置を監視し、接近してくる物体を見つけた場合、その物体をアームの動作で回避する手法を提案する。センサから得られた点群とロボットの間で干渉判定を行う際に、形状を復元せずに、直接点群で干渉判定を行うことにより、高速処理を実現する。回避動作は、測定した点群からロボットの腕に対し仮想的な斥力を発生させ実現する。また、既知の環境地図を利用し、計測範囲外にある障害物からも斥力を発生させこれらの障害物との衝突を回避する。

2. システム構成

本研究では点群センサとして Velodyne HDL-32E を、サービスロボットは SmartPalV を使用する。HDL-32E で取得した点群データと SmartPal のモデルとの干渉判



図 1 SmartPalV と HDL-32E



図 2 HDL-32E の装着状況

定を行い、回避動作を生成する。回避動作を SmartPal を制御するプロセスに送信する。

2.1 Velodyne HDL-32E

距離センサとして、Velodyne 社の HDL-32E[4](以下、Velodyne と記述する) を使用する。このセンサは 32 個のレーザー送受信センサーを内蔵しており、水平全方位 360 度、垂直 41.3 度を 5~15 Hz でスキャンすることが可能である。測定精度は $\pm 2\text{cm}$ 、測定距離は最大 70 m である。測定点数は秒間約 70 万点である。また、高さは 144.2 mm、直径は 85.3 mm、重量は 1.2 kg と、従来のモデルに比べ小型化、軽量化している。したがってロボットや車に積むことができる。レーザークラスはクラス 1 であり、直接目で見ても安全である。

2.2 SmartPalV

サービスロボットは、安川電機の SmartPalV(以下、SmartPal と記述する) を使用する。このロボットは腕部や手部、移動部などの機能単位でユニット化されており、用途に応じて組み合わせることで、様々なニーズに対応できる。本研究では頭上に Velodyne を装着し (図 2) 実験を行う。

2.3 Choreonoid

シミュレーションソフトとして、産業総合研究所の中岡らが中心に開発している Choreonoid を使用する。Choreonoid はロボット用統合 GUI ソフトウェアであり、プラグインで必要な機能を追加実装できる [5]。使用したバージョンは 1.4 である。プラグインとして、九州大学の辻らが開発している graspPlugin を使用する。このプラグインは様々なロボットアームについて把持計画、軌道計画などの計画問題を解くことが出来る。

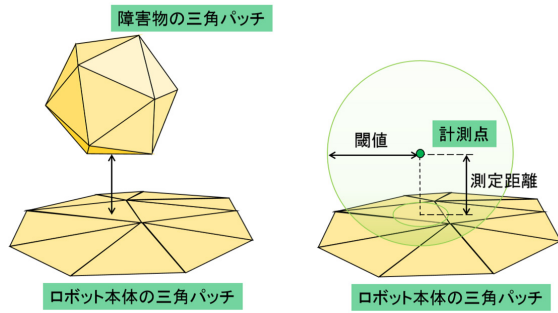


図3 パッチ同士の干渉判定 図4 点とパッチの干渉判定

2.4 ROS

SmartPal, Velodyne, Choreonoid 間の通信に, Open Source Robotics Foundation 社の ROS を使用する. ROS はオープンソースで提供されるロボット用のメタ・オペレーティングシステムであり, ミドルウェアに分類される [6]. 使用したディストリビューションは Indigo Igloo である. Velodyne の生データを ROS の PointCloud2 型に変換し配信する.

3. 回避動作生成

3.1 物体検出

3.1.1 干渉判定

SmartPal と物体の干渉判定は, 点・パッチ干渉判定により行う. これは, 点とロボットの 3D モデルのパッチの距離が閾値以上か以下かを判定するものであり, Velodyne で受信した点群から SmartPal との距離が一定以下の点群を取得できる.

一般的に干渉判定はパッチ同士で行う. パッチ同士の干渉判定を図3に, 本手法の点とパッチの干渉判定を図4に示す. 点とパッチの干渉判定では, 計測点を中心とする球とパッチの干渉をチェックする. 障害物の形状を復元せず直接モデルと干渉判定し, パッチ同士の判定より高速な処理ができる. 点群データに干渉判定を用いた際の流れを図で示す. 図5の環境を受信した点群を図6に, 図6の点群に干渉判定処理を施したものを図7に示す. 緑色の点が点群, 水色で塗られた部分がロボットから一定距離以内の範囲である.

3.1.2 マスキング

SmartPal の腕の可動範囲は Velodyne の測定範囲と重なるため, 腕自身の点群が測定された際, そのままでは干渉点として判定してしまう. そこで, 干渉判定機能を利用しマスキングを行う. マスキングする距離は, ロボットの動作と計測の同期が正確にできないことを考慮して許容値を設定する. 図8は図7にマスキングする範囲(腕の周りの白く塗られた部分)を表示したもの, 図9は, 図7をマスキング処理をした結果である.

3.1.3 環境地図上の障害物

既知の環境地図を用いて, Velodyne の計測範囲外にある障害物に対してもロボットの干渉回避動作を生成する. 例えば机が置いてある場合, Choreonoid のシミュレーション空間に 3D モデルを配置し, パッチの頂点

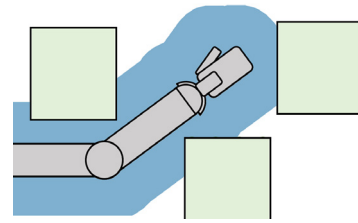


図5 ロボットアームと障害物の位置関係



図6 受信した点群データ

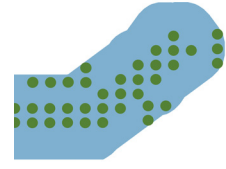


図7 干渉判定の実行後

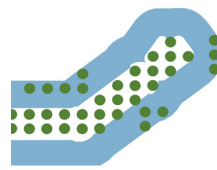


図8 マスキングの範囲設定

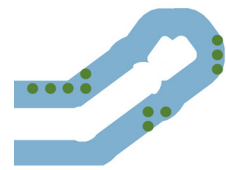


図9 マスキングの実行後

の情報を元に机の表面に点群を配置する. 図10にその様子を示す. それらの点群は, 計測点群と同様に障害物の点群として扱う.

3.2 動作生成

3.2.1 ロボットアームの関節

SmartPal の腕の関節角は 7 つであり, 肩で直交する 3 軸, 肘の 1 軸, 手首で直交する 3 軸がある. 今回は手首軸の 3 つの関節角は固定し, 肩と肘の 4 つの関節角を変化させる. 関節角 $\theta_1 \sim \theta_4$ を図11のように割り当てる.

3.2.2 ヤコビアン

手先速度のパラメータは, 速度 v_x, v_y, v_z とオイラー角の角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ の 6 つがある. 関節速度のパラメータは各関節角ごとの 7 つである. よってヤコビアンは 6 行 7 列の行列となる. 手先速度を $\dot{\mathbf{r}} = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$, ヤコビアンを $J_0 \in \mathbf{R}^{6 \times 7}$, 関節速度を $\dot{\boldsymbol{\theta}} = (\theta_1, \dots, \theta_7)^T$ とおくと

$$\dot{\mathbf{r}} = J_0 \dot{\boldsymbol{\theta}}$$

と表すことが出来る. 姿勢を考慮せず位置のみを制御対象とするため, 計算において $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, 及び固定する手首の関節角 $\theta_4 \sim \theta_7$ は無視する. そこでヤコビアンの (1,1) 成分から (3,4) 成分までを取り出し, $J_1 \in \mathbf{R}^{3 \times 4}$ とする. また同様に肩から肘までのヤコビアンも計算し, $J_2 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ とする.

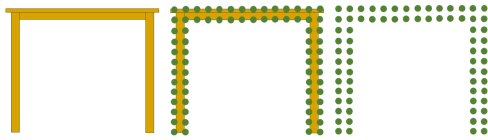


図 10 既知の障害物の点群登録

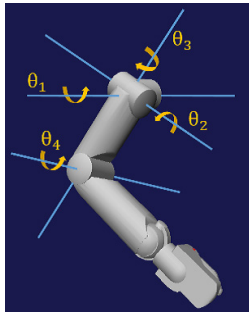


図 11 SmartPal の腕部分と関節角

3.2.3 回避動作生成

τ をアームの各関節にかかるトルク，ヤコビアンを J ，アームの先端に加わる力を F としたとき，

$$\tau = J^T F$$

の式が成り立つ．この関係式を利用して回避動作を生成する．ロボットアームの手先と肘に基準点を置き，障害物の点群全てから 2 つの基準点に対して仮想的な力をかける．力はそれぞれの点群から基準点への向きであり，大きさは点群と基準点の距離の二乗に反比例する．基準点それぞれに対して，全ての点群からの力を合計したものを F とする．係数を q ，基準点の位置を P_0 ，各点群の位置を P_i とすると

$$F = \sum_i \frac{q}{|P_0 - P_i|^3} (P_0 - P_i)$$

と表される． F を J_1, J_2 を用いてトルクに変換し，トルクをそれぞれの関節角の変位とする． θ_1, θ_2 は基準点 2 つからの力の両方の影響を受ける．

さらに，目標姿勢を設定し，目標姿勢での関節角を中心としたねじりばねを考える．アームが目標姿勢に戻ろうとするように，各関節角は，現在角と目標角の差に比例したトルクを受ける．ばね定数を k ，目標角を q_0 ，現在角を q としたとき，

$$\tau = k(q_0 - q)$$

となる．この式を用いて関節角の変位を計算する．

4. シミュレーション

回避動作を，Choreonoid 上でシミュレーションした結果について述べる．

4.1 基本姿勢からの計測点群との接触回避

目標姿勢をとっている状態の SmartPal に，様々な方向から手をアームに近づけ，回避動作を確認した．この場合は目標姿勢を基本の姿勢とした回避行動が行わ



図 12 目標姿勢

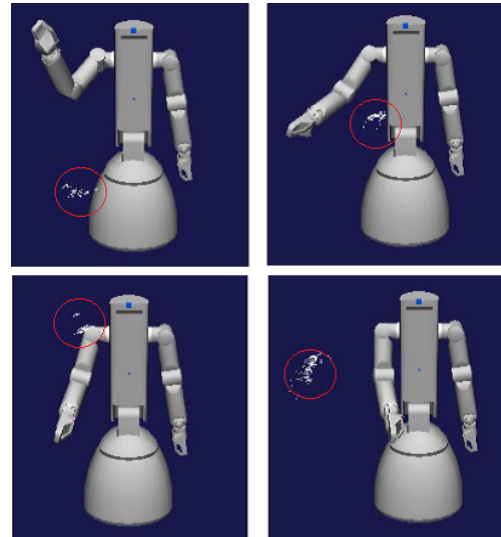


図 13 様々な方向への回避



図 14 机の 3D モデル

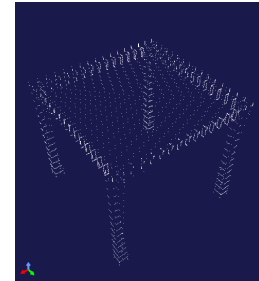


図 15 配置した点群

れる．目標姿勢を図 12 に，結果を図 13 に示す．画像中に赤線で囲んでいる白い点群が，人の手をスキャンした点群の中でロボットとの距離が一定以下の点である．どの方向からでも回避動作を行えていることが分かる．

4.2 動作途中における障害物との接触回避

初期姿勢から目標姿勢へと移行する際の障害物との接触回避を考える．経路中で接触するように机を配置し，干渉判定を行うことにより接触を回避できるかを確認した．机の 3D モデルとそれを元に配置した点群を図 5.，図 5. に，結果を図 16 に示す．干渉判定を行った場合は，元々机と接触していた時点での接触を回避し，目標姿勢へと移行できていることが確認できる．

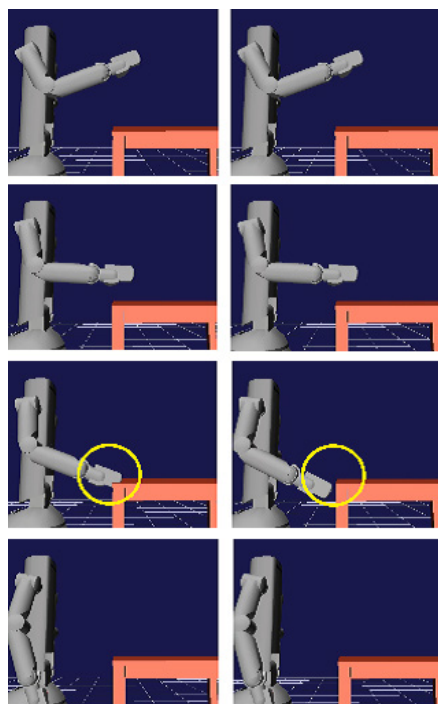


図 16 机の干渉判定を行わなかった場合 (左列) と行った場合 (右列)

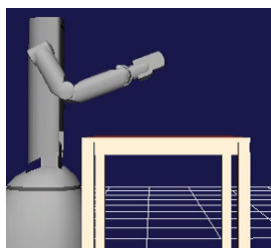


図 17 机の配置と目標姿勢

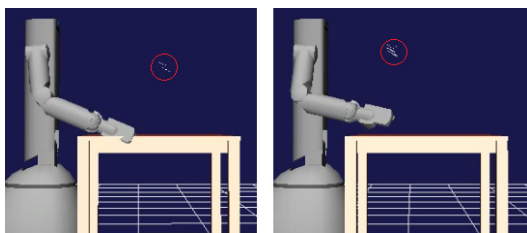


図 18 机の干渉判定を行わなかった場合 (左) と行った場合 (右)

4.3 計測点群と障害物との接触回避

ROS の機能である rosbag を使用して Velodyne の計測点群を記録し、机を障害物として登録して干渉判定を行わなかった場合と行った場合の 2 つの場合について比較した。目標姿勢を図 17, 結果を図 18 に示す。干渉判定を行わなかった場合は手先が机に接触してしまっているが、干渉判定を行った場合は机から反発を受け、接触せずに留まっていることがわかる。

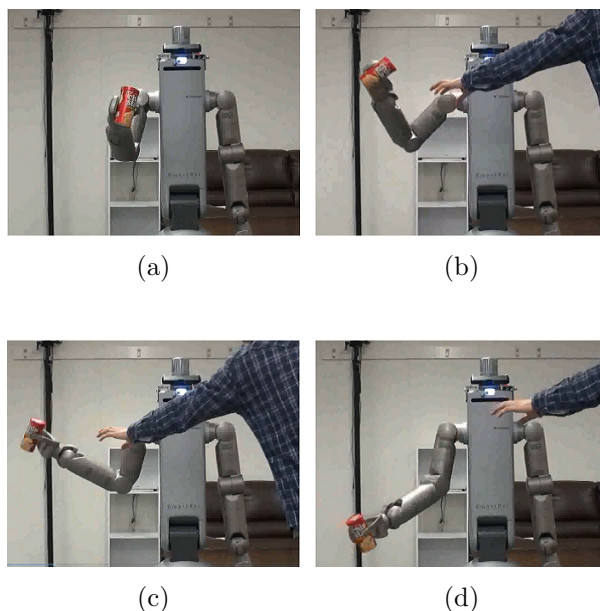


図 19 様々な方向への回避

5. 実機実験

4.1 節のシミュレーションと同様の条件での回避動作を実機で行った。結果を図 19 に示す。実機性能により速度と周期に制限はあるが、実機でも回避動作を行えることが確認できた。

6. 結言

高速 3 次元距離センサとシミュレーションソフトを用いたシステムを構成し、様々な方向から接近してきた物体や登録された障害物に対して、リアルタイムで干渉判定と動作生成を行い、ロボットの腕が回避動作をすることが確認できた。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構の研究成果展開事業センター・オブ・イノベーション (COI) プログラムにより、助成を受けたものである。

参考文献

- [1] B. Peasley, S. Birchfield: "Real-time obstacle detection and avoidance in the presence of specular surfaces using an active 3D sensor", IEEE Workshop on Robot Vision, pp. 197-202, 2013.
- [2] K. Oussama: "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", The international journal of robotics research, 5(1), pp. 90-98, 1985.
- [3] 中島洸平, 長谷川勉, 辻徳生, 諸岡健一, 倉爪亮: "ワゴンを利用した生活環境中の日用物品運搬システムの開発", 第 14 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2M2-3, pp.1819-1824, 2013.
- [4] "Velodyne 社ホームページ HDL-32E", <http://www.velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/hdl32e.aspx>
- [5] "Choreonoid ホームページ", <http://choreonoid.org/ja/>
- [6] "ROS ホームページ", <http://www.ros.org/>