

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

○中島 洸平*, 長谷川 勉†, 辻 徳生*, 諸岡 健一*, 倉爪 亮*

Development of Everyday Objects Transportation System with Humanoid Robot by Pushing Wagon in Living Environment

○Kohei NAKASHIMA*, Tsutomu HASEGAWA†, Tokuo TSUJI*, Ken'ichi MOROOKA*, Ryo KURAZUME*

Abstract: This paper describes a method for planning of robot by pushing cart to transport daily objects, and detecting environmental change for replanning based on fixed sensor information in the executing phase. Motion planning includes plans for object transfer position, catching a wagon position, base path, and arm trajectory. Our experimental results validate the effectiveness of the proposed method.

1 序論

高齢社会において、介護や医療の現場を中心に人手不足が懸念される。その解決策の一つとしてサービスロボットによるサポートが期待される。物品取り寄せのような簡単なサービスをロボットにより実現すれば、介護士や看護師の負担を軽減できる。そこで、本研究ではロボットによる生活環境における日用物品の運搬システムの開発に取り組んでいる。同時に複数の物品を運搬することを想定し、ロボットがワゴンを利用して物品取り寄せを行うための動作計画システムの実現を目指す。

想定するサービスシナリオの手順を示す。ただし、ワゴンにはあらかじめ物品が載せてあるものとする。

1. 人から物品の取り寄せが依頼される。
2. ワゴンを取りに行く。
3. 依頼者のそばまでワゴンを移動させる。
4. 物品をつかみ、依頼者に手渡す。

手順2では、ワゴンをつかむ時のロボットの位置と、そこまでの移動経路を計画する必要がある。手順3では、どこまで近づくのか、その位置と、どのようにワゴンを移動させるかを計画する必要がある。手順4では、物品をどこに差し出すかを計画する必要がある。これは、手順3の近づく位置の計画と関連する。以上をまとめると、シナリオの実現には以下が必要となる。

作業位置計画

ワゴン把持位置 (手順 2)。

物品受け渡し位置 (手順 3,4)。

移動経路計画

ロボット移動経路 (手順 2)。

ワゴン移動経路 (手順 3)。

アーム計画

アーム軌道 (手順 4)。

これらの計画には、環境地図と、物品やワゴン、手渡し対象者の位置情報が必要となる。しかし、ロボット単体でそれらすべての情報を取得するのは困難である。その解決策として、我々はこれまでに環境側に固定センサを配置して情報を

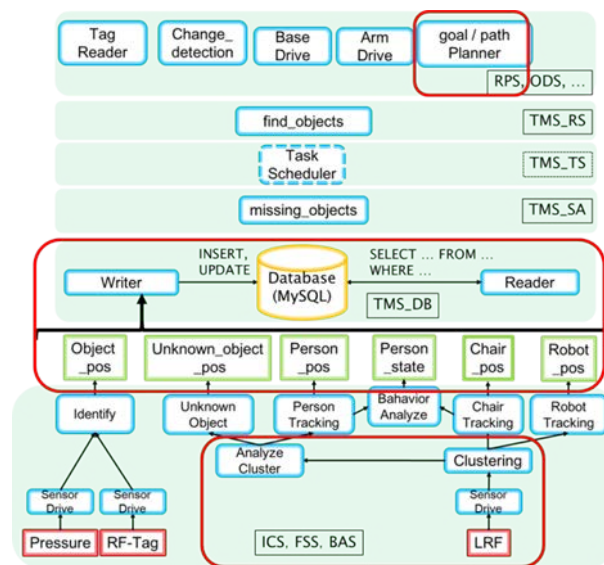


Fig.1 TMS structure

取得・管理する環境情報構造化 (TMS : Town Management System) [1] [2] を提案している。TMS を利用し、作業位置計画と、移動経路計画、アーム軌道計画とをまとめて一連の動作計画を行う。一方、サービス実行時には、環境が動的に変化すると計画動作の安全性が保証できないことがある。これを避けるために、動作時には環境の変化を検出し再計画を行う。

本論文では、システムを構成する動作計画手法と環境変化検出・再計画手法を提案する。動作計画手法では、作業位置や移動経路それぞれの計画を個別に行い、その結果を組み合わせると一つの動作を決定する。得られる複数計画動作の候補に対して、動作全体の良さの評価値を求める。変化検出では、床面に LRF (Laser Range Finder) を設置し、床上の物体を検出する FSS (Floor Sensing System) [3] を利用する。

本章では、本研究の背景と目的に関して述べた。続く 2 章ではシステム構成について述べる。3 章では動作計画について、4 章では環境変化検出と再計画について、それぞれ手法の詳細を述べる。5 章では結論と今後の課題を述べる。

*九州大学 (Kyushu University)

†熊本高専 (Kumamoto Technical College)

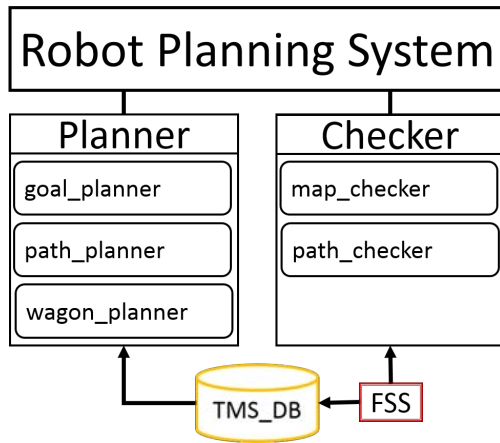


Fig.2 RPS structure

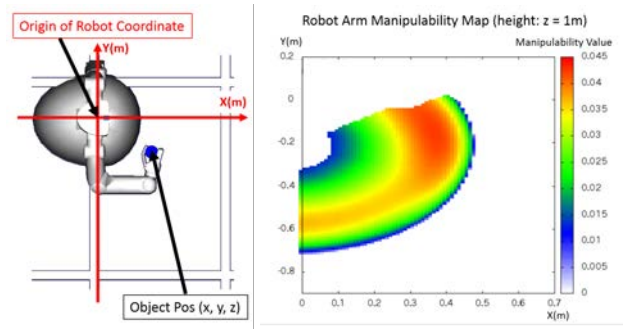


Fig.3 Manipulability map

2 システム構成

TMS 全体の構成を Fig.1 に示す。最下段に示している各種センサにより取得されたデータを集約・解析し、それにより得られた人や家具、物品の情報を中央に示したデータベースにより管理する。データベースより上段に示している各モジュールは、集約された情報をもとにタスクのスケジューリングやロボットへの司令を行う。動作計画システム (RPS : Robot Planning System) は TMS の一部として実装している。ユーザから物品運搬が依頼されると、TMS_TS (TS : Task Scheduler), TMS_RS (RS : Robot Service) によって、サービスを実行するのに最適なタイミング、最適なロボットが判断される。RPS は計画に必要な情報を DB から取得し、その情報をもとに動作計画を行う。

RPS は Fig.2 に示すように、計画部 (planner)、監視部 (checker) から構成される。planner は、DB の情報に基づいて計画を行うモジュールで、移動目標位置を計画する goal_planner、ロボット経路を計画する path_planner、path_planner の結果を基に、ワゴン経路を計画する wagon_planner から成る。checker は、FSS から得られる環境情報を常時監視し、環境変化検出や経路の再計画を行うモジュールで、変化を検出し環境地図を更新する map_checker、実行経路と環境変化箇所とを比較し、再計画を判断する path_checker から成る。

ロボットは株式会社安川電機の SmartPal (各腕 7 自由度の双腕型) を利用する。ワゴンは一般的なキッチンワゴンを利用する。ロボット、ワゴンともに全方向へ移動できる。

3 動作計画手法

3.1 作業位置計画

3.1.1 ワゴン把持位置計画

ロボットはワゴンの同一辺上に属する 2 本のポールをつかめば、安定してワゴンを押すことができる (Fig.6 参照)。そこで、ワゴンをつかむロボット位置候補を 4 点に限定する。ワゴンの位置姿勢およびサイズは TMS のデータベースにより管理されており、この情報をもとに候補点を求める。ワゴンをつかんだ状態におけるロボットとワゴンとの距離 (CD : control distance) を与えておき、長辺方向をワゴン姿勢の基準とすると、候補点は以下の式 (1)~(3) により与えられる ($i = 0, 1, 2, 3$)。R はロボットを、W はワゴン

をそれぞれ表す。

$$R_{x_i} = W_x + \left(\frac{W_{size_i}}{2} + CD \right) \cos(W_\theta + \frac{i}{2}\pi) \quad (1)$$

$$R_{y_i} = W_y + \left(\frac{W_{size_i}}{2} + CD \right) \sin(W_\theta + \frac{i}{2}\pi) \quad (2)$$

$$R_{\theta_i} = W_\theta + \pi + \frac{i}{2}\pi \quad (3)$$

$$W_{size_i} = \begin{cases} \text{wagon's long side length} & (i = 0, 2) \\ \text{wagon's short side length} & (i = 1, 3) \end{cases}$$

3.1.2 物品受け渡し位置計画

物品受け渡し位置計画の指標として、手先の可操作度 (Manipulability) [4] を用いる。可操作度とは、各関節角を変化させた際に、手先をどの程度動かすことができるかを表したものである。可操作度の高い姿勢で手渡しを行うと、人やロボットに少々位置ずれが生じたとしても容易に修正できる。手先位置に対応する速度ベクトルを \mathbf{v} 、関節角ベクトルを \mathbf{q} とすると、その関係は式 (4) により表され、 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ を用いて、可操作度は式 (5) で与えられる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

$$\omega = \sqrt{\det \mathbf{J}(\mathbf{q}) \mathbf{J}^T(\mathbf{q})} \quad (5)$$

このとき、腕に冗長自由度があると、ひとつの手先位置に対応する関節角ベクトルが無数に存在し、可操作度を一意に求めることができない。そこで、逆運動学を解く際には、関節角の可動範囲内で可操作度が最も高くなる姿勢を解とする。

Fig.7 に示す環境に対して、(b) の左下隅を原点とし、水平軸を x 軸、垂直軸を y 軸、床面からの高さ方向を z 軸としたものをワールド座標系とする。ロボットのローカル座標系は、Fig.3 (a) に示すように、正面方向を x 軸、側面方向を y 軸、高さ方向を z 軸とする。x, y 軸の原点はロボットの中心とし、z 軸の原点はワールド座標系と同じとする。人のローカル座標系も同様に定義するが、z 軸の原点を顔の中心の高さとする。これは、人が立っている場合と座っている場合との差を容易に扱えるようにするためである。これらの座標系に対し可操作度を求めて、以下の手順により受け渡し作業位置を決定する。

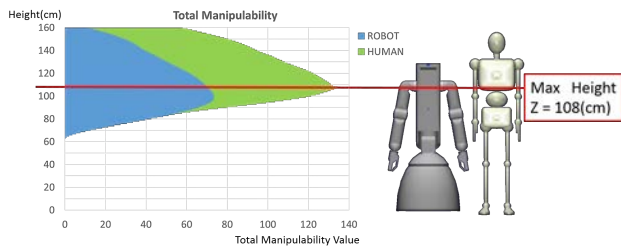
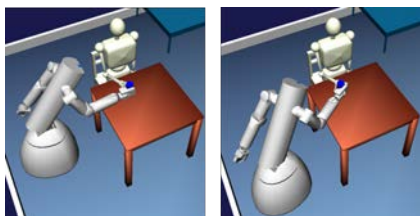


Fig.4 Total manipulability



(a) Human standing



(b) Human sitting on chair

Fig.5 Object transfer position from robot to human

1. ロボット、人それぞれの座標系で、物品位置に対する可操作度マップ (Fig.3 (b) 参照) を作成する。
2. 顔の位置を基準に、人の可操作度マップをワールド座標系に合わせる。
3. ロボットと人のマップを統合し、Fig.4 に示すように各高さの可操作度の総和を求める。総和が最大となるところを、受け渡し時の物品の z 座標とする。
4. この z 平面中で、人の可操作度が最大となる点を物品の x, y 座標とする。
5. x, y 座標がテーブルなど、上に物品を置ける家具がある領域内であれば、家具の高さに合わせて z 座標を変更する。
6. 求めた物品位置に対して、可操作度が最大となるロボット位置 (物品位置に対する相対関係) を求める。物品位置を中心とした円周上の点となる。
7. 円周を n 分割し、各領域で障害物に接触しない位置を取り出す。障害物からの距離、人の視野内の位置であるかどうかを評価指標として、領域毎に最高評価となる位置を受け渡し位置候補とする。
8. 6. での候補点が全て接触領域に含まれた場合、ロボットアームの逆運動学が解ける範囲で円の半径を拡大して、5~6 を繰り返す。

手順 6 で評価として障害物からの距離を用いるのは接触の

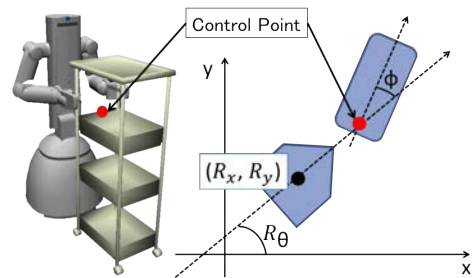


Fig.6 Wagon model (Left : 3D model Right : 2D model)

危険性を下げるためである。視野を考慮するのは、見えない位置での動作への恐怖心を抑え、受け渡し時にロボットの動きに対応しやすくするためである。また、円周を n 分割するのは、アーム軌道の計画時間が長く、動作全体の計画時間への影響が大きいためである。本システムでは $n=4$ とし、1~4 点を候補として得る。人が立っている場合とテーブル横の椅子に座っている場合の出力結果をそれぞれ Fig.5 (a), (b) に示す。

3.2 移動経路計画

ワゴンを押すロボットの移動経路計画では、状態を表すコンフィギュレーション空間が最大で 6 次元となり計画に時間がかかる。そこで、移動姿勢を限定して次元削減を行う手法が提案されている [5]。この手法では、姿勢が限定されることにより、場合によっては障害物に近い経路が計画される問題がある。一般的に生活環境におけるロボットの移動計画では、人との接触を避けるために高い安全性が求められる。その上で計算時間の削減を行う必要がある。そこで、本システムではボロノイ図を利用する。さらに、ロボット経路とワゴン経路を段階的に計画し、探索空間の次元を削減する。

3.2.1 ロボット経路計画

二次元平面においてロボットを内包する円を考えると、ロボットの占める空間は位置情報のみで表せ、ロボットの C 自由空間を 3 次元から 2 次元に削減できる。この空間において、ボロノイ図を求める。2 次元平面では、ボロノイ領域の境界線は、各々の母点の二等分線の一部となる。障害物を母点とした場合のボロノイ境界線は、直近の 2 つの障害物から最大限離れた位置を示す。始点と終点をボロノイ線に接続し、これを辿ることにより経路を得る。

3.2.2 ワゴン経路計画

Fig.6 のようにワゴンの制御点を設定し、ロボットに対する相対位置を固定とする。ロボットによる操作は、制御点を回転軸とした相対姿勢 (ϕ) の変更のみとする。これにより、ワゴンとロボットと一体として 4 次元で表現する。

ロボット経路を基にロボット姿勢とワゴンの相対姿勢を計画する。姿勢を求める基準として、経路の各ロボット位置に対するワゴン制御点の位置を利用する。制御点が経路上に位置するように、ロボット姿勢を決定する。その後、ワゴン上の制御点とは反対側の端点が経路上に位置するように、ワゴンの相対姿勢を変更する。これらの処理により、ボロノイ図の特性による経路の安全性を維持したまま探索次元を削減できる。

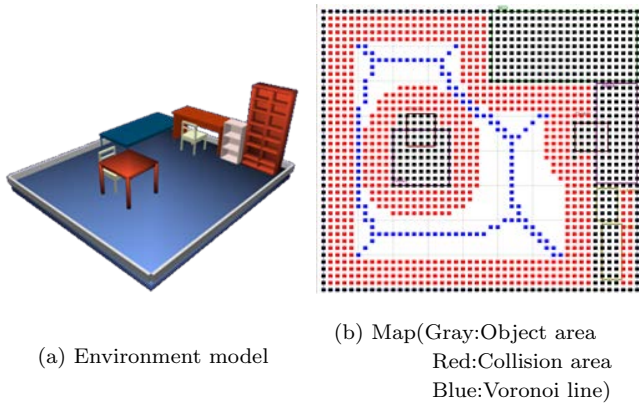


Fig.7 Environment map for path planning

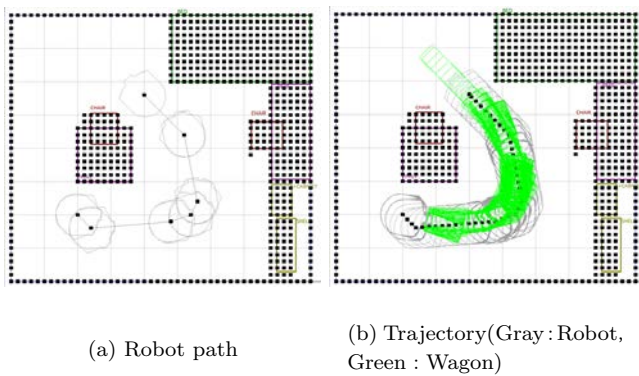


Fig.8 Path planning result

Table 1 Characteristic value of planned path

Planning Time for Robot Path	1.10(msec)
Planning Time for Wagon Path	6.41(msec)
Total Path Length	3.90(m)
Total Rotation Angle	2.64(rad)
Average Distance from Obstacles	0.79(m)

3.2.3 経路計画結果

Fig.7に示す環境に対して、経路計画を行った結果を Fig.8に示す。環境の広さは 4.5m × 4.0m とし、2次元環境モデルは 10cm × 10cm のセルに分割し、ワゴン経路計画における角度の離散化間隔は 1° として計画を行った。グレーの領域が障害物領域を、赤の領域が接触領域を、白の領域が自由領域を、青で示したラインがボロノイ線図をそれぞれ表している。ワールド座標系で、始点を (x, y)=(1m, 1m)、終点を (2m, 2.3m) として経路計画を行った。ワゴンの移動軌跡はロボットの移動軌跡に収まっている (Fig.8(b) 参照)。そのため、ボロノイ図の特性による経路の安全性は保たれている。計画に要した時間、移動距離、回転角、最近傍の障害物までの距離平均を求め、表 1 にその結果を示す。ロボット経路計画と、ワゴン経路計画を合計しても 10msec 未満で完了しており、動的な環境変化に対してオンラインで再計画

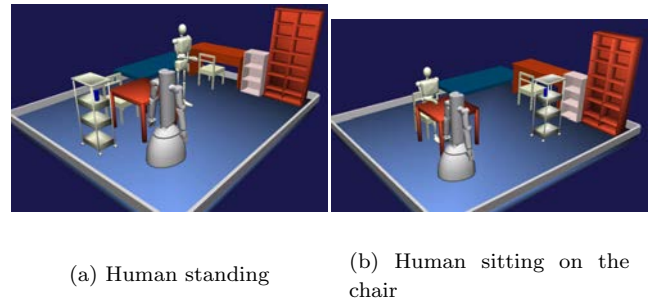


Fig.9 Simulation pattern

できる。ロボットを内包する円モデルの半径を 40cm としているため、障害物から平均して 40cm 弱離れており、移動誤差による接触の危険性は低く、安全性の高い経路である。

3.3 計画の統合

3.3.1 評価値設定

目標位置計画と、移動経路計画、アーム計画とを統合し、ワゴンを用いた物品運搬動作全体の動作計画を行う。ただし、アーム計画については Choreonoid^{*1}の graspPlugin^{*2}によって得られる結果を利用する。ロボットの初期位置からワゴン把持位置を中間目標位置として、最終目標位置である手渡し位置までの経路をすべての組み合わせに対して求める。出力されたそれぞれの計画動作に対して式 (6) により評価値を求める。

$$E_{value} = \frac{length_{min}}{length} + \frac{rotation_{min}}{rotation} + ViewRatio \quad (6)$$

length は総移動距離、rotation は総回転角を表しており、min は全出力におけるそれぞれの最小値を表す。ViewRatio は計画経路上の点のうち、物品受け渡し対象者の視野内に存在する点の割合とする。これにより、距離、回転角、視野それぞれに対する評価を 0~1 の範囲で与え、和が最大となる計画動作を実行動作としてロボットに出力する。できる限り少ない動きで、動きの大部分を視野内で実行する動作が出力される。

3.3.2 シミュレーション結果

Fig.9 (a)(b) の 2 つの状況に対し計画を行った結果を Table.2, 3 にそれぞれ示す。(a) では、2 点のワゴン把持位置候補と、3 点の受け渡し位置候補 (Fig.5 (a) 参照) が得られ、計 6 パターンの動作計画が得られた。(b) では、2 点のワゴン把持位置候補と、2 点の受け渡し位置候補 (Fig.5 (b) 参照) が得られ、計 4 パターンの動作計画が得られた。距離と回転角は、上段に合計値を、下段に評価値を示している。(a) の 1, 2 の計画のように、全評価が総合的に良い計画が高評価となっている。(a) の 6 では、移動距離だけに注目すると 4 や 5 より高評価だが、最終評価は最低となっており、計画全体のバランスが重視されている。

*1 中岡氏 (産業技術総合研究所) らが開発しているロボット動作シミュレータ <http://choreonoid.org/ja/index.html>

*2 辻氏 (九州大学) と原田氏 (産業技術総合研究所) が開発している Choreonoid のロボットアーム動作計画プラグイン <http://choreonoid.org/GraspPlugin/i/?q=ja>

Table 2 Estimation of planned motion : (a)Human standing

Plan No.		1	2	3	4	5	6
Length	(m)	1.66	1.54	2.70	4.04	4.14	3.02
	estimation	0.94	1.00	0.57	0.38	0.37	0.51
Rotation	(rad)	5.24	6.19	28.24	16.12	16.06	33.14
	estimation	1.00	0.85	0.19	0.32	0.32	0.16
View Ratio		1.00	1.00	1.00	0.88	0.88	0.87
E _{value}		2.94	2.85	1.76	1.59	1.58	1.54

Table 3 Estimation of planned motion : (b)Human sitting on the chair

Plan No.		1	2	3	4
Length	(m)	3.49	3.59	4.25	4.35
	estimation	1.00	0.97	0.82	0.80
Rotation	(rad)	9.88	16.36	36.41	42.13
	estimation	1.00	0.61	0.27	0.24
View Ratio		0.46	0.46	0.47	0.45
E _{value}		2.46	2.04	1.56	1.49

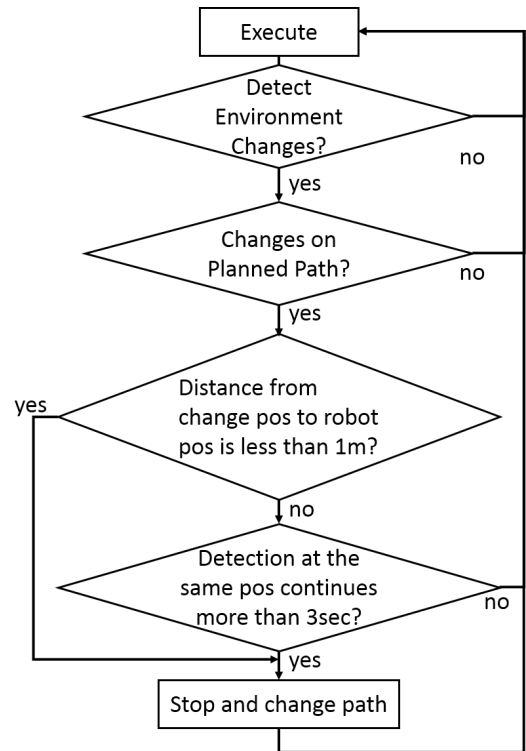


Fig.10 Flow chart of replanning

4 環境変化の検出と早期再計画手法

4.1 概要

環境の変化を検出し、再計画を行う手法としてロボット搭載センサを利用したもの [6] がある。しかし、ロボット搭載センサのみでは、経路が塞がれた場合でも、そこに近づくまで通行可能かどうかを判断できない。特に、幅が狭い場所で通行不可能だった場合、引き返すしかなく、その間の動作は無駄となる。このように、センサ範囲外の計画の実現性が不確定となり、変化検出から再計画開始までに非効率的な動作が生じやすい。[5] の手法でも同様に、ロボットの搭載センサにより環境変化に対応している。ロボット前方にワゴンがあるために、センサの走査範囲が遮られ、さらに検出範囲が限定される。この問題を解決するために FSS を利用して、運搬作業中の床上の環境変化を検出し、接触回避を行うための早期再計画手法を提案する。FSS により、環境中の床上にある物体を検出でき、検出された位置や大きさから、ロボットは経路上に障害物があるかどうかを確認できる。計画経路上に障害物があると判断できた場合に限り経路を変更し、接触回避のための再計画を効率的に行う。

4.2 変化検出

FSS では、環境内の固定家具の検出データと、環境中に現れた物体とのデータとを区別できる。本手法では、初期環境の検出点群を背景データとして処理し、それ以外に検出された点群を環境の変化箇所として扱う。変化が検出された場合、環境地図上のその位置を障害物領域に変更する。それに対応して、変化箇所周辺の接触領域と、環境全体のボロノイ図を更新する。環境情報の更新は、FSS により新たな物体が検出されるたび実行する。また、更新された環境情報は前述した動作計画部と後述の経路監視部に送られ、動作計画システム全体で常に最新の環境情報が利用できる。

4.3 早期再計画

FSS により環境全体の変化を検出できるが、移動経路とは無関係な変化に対して経路の切り替えを行うのは非効率的である。そこで、移動経路と環境情報とを比較し、変化箇所に応じて切り替えを判断する経路監視部を設け、これを用いて効率的な切り替えを行う。

経路監視部では常に以下の 3 つの情報を保持し、経路の切り替えを判断する。

環境情報

変化検出により得られる最新の環境情報。

実行経路

ロボットへ実行命令として送られ、追従中の移動経路。

代替経路

最新の環境情報に対しての計画経路。計画のみ行い、ロボットには送らない。実行経路の追従が不可能な場合、この経路を実行経路に切り替える。

ロボットが経路を切り替える必要があるのは、実行経路上に障害物が現れ、接触の危険性が生じたときのみである。その判断基準として、検出された接触位置における、ロボット位置からの距離と、連続検出時間の 2 つを用いる。一定距離内で検出された場合、接触の危険性が高いため、即座に停止命令を送り経路の切り替えを行う。離れていても、一定時間同一位置で検出が続いた場合、時間経過により通行可能となる可能性は低いので経路の切り替えを行う。距離と時間の閾値は、それぞれ 1m, 3sec とする。これらの基準により、遠くを歩いている人は接触の危険がないと判断し、過度な動作中断を避ける。経路切替判断処理フローを Fig.10 に示す。判断と同時に経路を切り替え、環境全体の変化に対し効率的な再計画とする。

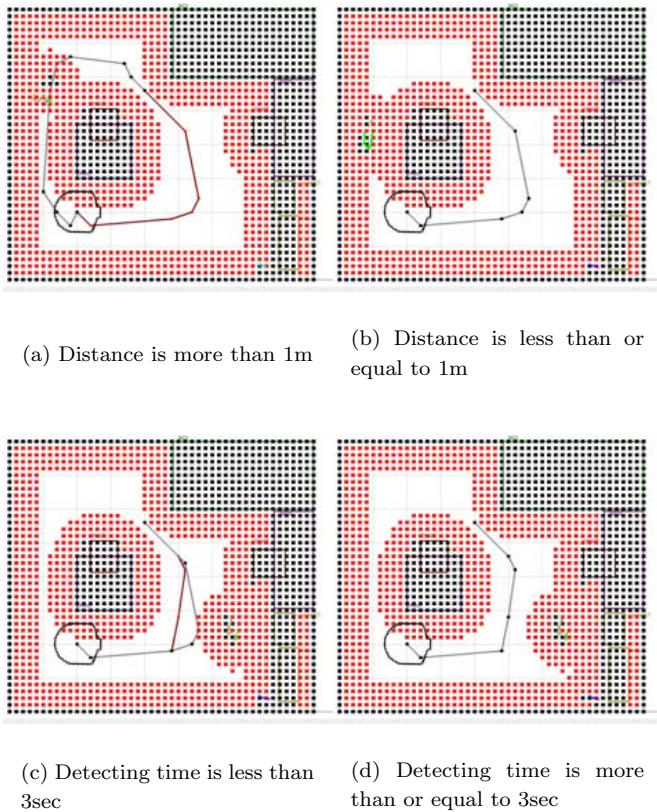


Fig.11 Result of replanning (Gray path : original planned path , Red path : replanned path)

4.4 実験

経路切り替え実験の結果を Fig.11 に示す。計画の始点、終点は Fig.8 と同条件とする。実行経路を灰色の線で、代替経路を赤色の線でそれぞれ示している。

まず、検出位置までの距離による判断の違いを確認する。比較のため、ロボットは実行経路の始点 $(x, y) = (1m, 1m)$ の位置で固定とし、黒枠で示している。(a) は、ロボットからの距離が 1m 以上の位置で実行経路が塞がれた様子を示す。距離が十分あり、到達するまでに障害物がなくなる可能性が高い。そのため、実行経路の追従を続けており、実行経路と代替経路を別に保持する。一方 (b) は、1m 未満の位置で実行経路が塞がれた直後の様子を示す。この場合、接触の危険が高いため即座に動作を停止し、経路の切り替えを行う。その結果、実行経路と代替経路が重なっている。

次に、同一箇所での連続検出時間の違いによる対応の変化を確認する。(c) は (a) 同様、1m 以上離れた位置が塞がれているため経路は切り替えられない。一方 (d) は、(c) の状態のまま 3 秒以上経過した状態を示している。この場合、塞がれた位置は今後も塞がれたままである可能性が高い。そのため、実行経路の追従は不可能だと判断し、経路を切り替える。その結果、(b) 同様に経路が重なっている。

5 結論

本研究では、ロボットがワゴンを利用して物品運搬サービスを行うための動作計画システムを構築している。システムの構成要素として以下の 2 つの手法を提案し、シミュ

レーションや実験によりその有効性を示した。

1. サービス実現の為に必要な一連の動作計画の統合手法。
2. 環境変化検出、再計画手法。

1. では、可操作度の利用により、位置ずれに対応しやすい受け渡し位置決定手法を提案した。経路計画では、ボロノイ図を利用して、ワゴンを押すロボットの安全な移動経路を短時間で行う手法とした。それらの計画結果を統合した一連の動作に対して評価値を設定し、総合的に良い動作の導出を可能とした。

2. では、FSS の利用により広範囲の変化検出を可能とした。検出状況に応じて、経路の切り替え判断を行い効率的な再計画手法とした。

今後の課題として、再計画手法の拡張が考えられる。経路の塞がれ方によって保持している計画の評価を動的に変化させ、動作全体の切り替えを目指す。また、実機実験により誤差への対応範囲や、再計画の有効性の確認を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24700194 の助成を受けたものです。

文献

- [1] 村上剛司, 長谷川勉, 木室義彦, 千田陽介, 家永貴史, 有田大作, 倉爪亮: “情報構造化環境における情報管理の一手法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 2, pp.192-199, (2008).
- [2] 永田晃洋, 長谷川勉, 表允, 辻徳生, 諸岡健一, 倉爪亮: “生活支援のための環境分散センサ情報統合アーキテクチャ”, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 111-04, (2013).
- [3] 長谷川勉, 田中真英, 表允, 辻徳生, 諸岡健一, 倉爪亮: “床上センシングシステムと室内生活行動モデルにもとづく居住者の行動推定”, 第 18 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, 3D2, pp.330-336, (2013).
- [4] 吉川恒夫: “ロボットアームの可操作度”, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.1, pp63-67, (1984).
- [5] Jonathan Scholz, Sachin Chitta, Bhaskara Marthi, Maxim Likhachev: “Cart Pushing with a Mobile Manipulation System: Towards Navigation with Movable Objects”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.6115 - 6120, (2011).
- [6] A. Nakhaei, F. Lamiraux: “Motion planning for humanoid robots in environments modeled by vision”, Proc. 8th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.197-204, (2008).