

マニピュレータを用いたマーカ追従によるキャリブレーションの提案

猪野又 涼 生産システム工学専攻 2年 144001
指導教員 前田 弘文

Proposal of Calibration by Marker Tracking with a Manipulator

Ryo Inomata and Hirofumi Maeda (Adviser)

ABSTRACT

The study of search and rescue robots in Japan started after the Great Hanshin-Awaji Earthquake in 1995. Since then, it has been developed greatly through the "Special Project for Earthquake Disaster Mitigation in Urban Areas" by the Ministry of Education, Sports, Culture, Science and Technology. In the development, researchers has pointed out that there is a limit to what a single robot can do in a search and rescue operation. Hence, it has become necessary to form groups of robots with a system structure which enables a few operators to operate the groups and improves efficiency. However, in order to form the groups of robots, it is necessary for each robot to recognize the relative positions to the other robots. In previous studies, the marker tracking type of relative position measurement system using a camera has already been built and evaluated. As a precondition, the preliminarily calibration of the camera is required. Without it, the system cannot work properly at disaster sites where the situation changes from moment to moment. This study aims to achieve semi-autonomous recalibration at disaster sites, and this paper describes a method of marker position adjustment by inverse kinematics of the manipulator.

1. 緒言

我が国は非常に災害の多い国である。中でもひととき大きい被害を及ぼすのが震災である。日本における地震数は、2000年から2009年に世界で起こった大地震（マグニチュード6.0以上）の約20%（約200回）を占め、4つの大陸プレートが集まる特殊な地形を有することがその原因となっている。特に1995年に発生した阪神淡路大震災では、同時多発的に広範囲で発生した建物の倒壊により被災者の多くが瓦礫内に閉じ込められ、約70%（約4500名）の人が圧死、窒息死により命を落とした。この背景には「72時間の壁」が大いに関係あるとされている。72時間の壁とは、救助時間と生存率の関係を表したもので、災害発生から72時間後（3日後）に救助された被災者の生存率が急激に下がるというものである。事実、震災発生当日に救助された人の生存率が約80%に対し、3日後には約20%、それ以降は5%以下にまで減少している。こうした背景から、

災害時において迅速な救助活動が最優先されることとなった。しかし、災害発生直後という特殊な状況下には得てして多くの危険が潜み、救助する者が二次災害に巻き込まれる可能性が大きいことも事実である。加えて豪雨などの悪天候が重なると、作業自体中断せざるを得なくなる。特に、山間部では土砂崩れが起こりやすく、道路が寸断され、場合によっては土砂に巻き込まれることもありえる。さらに、震災に関する調査報告書では倒壊家屋を対象に行われる被災者探索が最も危険であると記されており、救助作業が中断した場合の対応も含めて、大きな課題となっている。

そこで、災害発生時における探査活動を目的としたレスキューロボットに注目が集まっている。レスキューロボットは人が立ち入ると危険を伴うような場所であっても安全に探査活動を行うことができる。また、探査活動だけにとどまらず現況の情報収集にも活用でき、得た情報から予め戦略を立てることでより安全性の高い迅速な救助が行

える。こうした利点から阪神淡路大震災を契機に研究開発が活発化し、文部科学省による「大都市大震災軽減化プロジェクト」や NEDO による「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」を経てロボット技術は大きな発展を遂げた^{[1]-[4]}。結果、「Quince」や「UMRS」,「KOHGA」など日本を代表する探査ロボットが開発された^{[5]-[7]}。

我々はこれらのロボットを用い、消防関係者との実証実験などを通して、災害時に必要となる探査ロボットには"遠隔操縦を基本とした半自律制御系"が最も重要であるという結論に至った。これは災害時における探査で、迅速かつ正確であることに加え、人命が掛かった失敗が許されない過酷な条件下では、環境認識技術等のレベルが低いロボットに全ての判断を委ねることができないことが上げられる。また一方で、ロボットの全行動判断に対して、人間が全てに介在することは大きな負担になることが挙げられる。さらに災害現場において1台のロボットで探査活動を行うには限界がある。そこで、ロボット群を少数のオペレータにより操作できる探査効率の高いシステム構造へ拡張する必要がある。探査ロボットを群として制御することの利点はこの他にも、ロボット単体での離散的な点としての探査に比べ集団としての戦略的探査が可能なこと、ロボット間メッシュネットが破れにくい隊列を組んでの探査行動が可能であることなどが挙げられる。

しかし、ロボット群を形成するためには、他のロボットとの相対位置を認識する必要がある、これまでの研究ですでにカメラによるマーカ追従型の相対位置計測システムの構築および評価が行われた^{[8]-[10]}。ただし前提条件として、事前のカメラキャリブレーションが必要で、そのままでは時々刻々と環境が変化する災害現場で適用することができない。そこで本研究では、実環境に対応するため、災害現場における半自律再キャリブレーションの実現を目指す。本論文では、半自律再キャリブレーションの一部であるハードウェアキャリブレーションの自動化に必要な、マニピュレータの逆運動学によるカメラ前へのマーカ位置補正について述べる。

2. レスキューロボットと共通マニピュレータ

2.1 災害現場の環境

災害現場において、災害の規模や内容、時間帯などによって時々刻々と環境は変化していく。また、環境の変化によってモバイルロボット群の行動自体も臨機応変に対応する必要があり、時にはモバイルロボットの指揮権を受託することもある。さらにこれらの環境の変化によって、モバイルロボットのソフトウェア自体も逐次変化させる必要が生じる。Figure 1 にモバイルロボットのソフトウェアの切り替えポイントを示す。

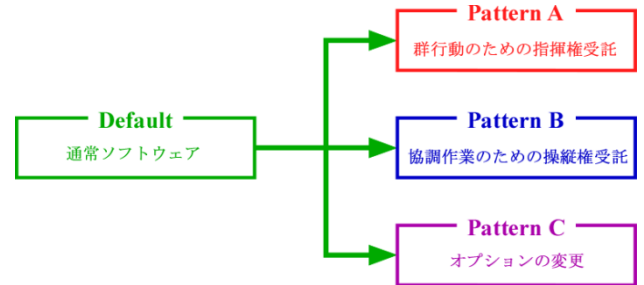


Fig. 1 ソフトウェア切り替え

2.1.1 群行動のための指揮権受託

モバイルロボット群が探査ポイントまで移動する際、個々のロボットを個別に操作することは操縦者にとって大きな負担となる。そこで、隊長機に操縦権限を譲渡することで、隊長機1台の操縦によって探査ポイントまでスムーズに移動を行える (Figure 2)。

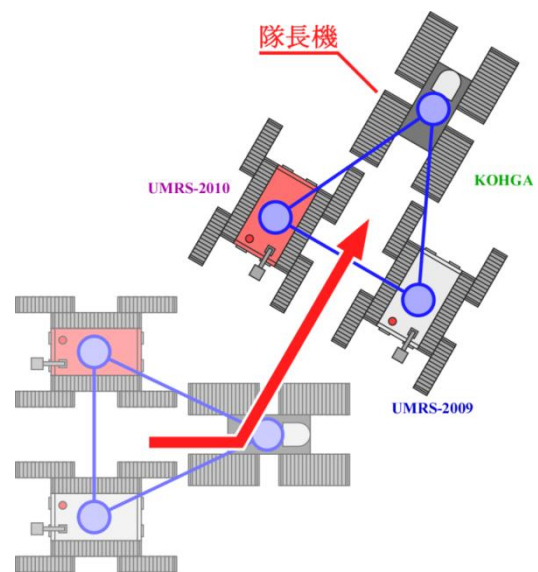


Fig. 2 モバイルロボットの群行動

また、状況によってはモバイルロボット群を2つ、もしくはそれ以上に分隊し、探索範囲を広げるなどの場合も考えられる。そのような場合は新たに分隊長機を設け、指揮権を受託する必要がある (Figure 3)。

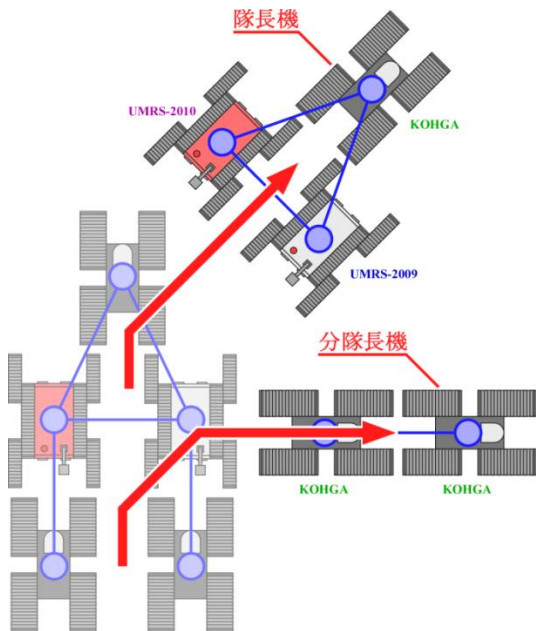


Fig. 3 モバイルロボット群の分隊

2. 1. 2 協調作業のための操縦権委託

災害現場の状況によっては、瓦礫や危険物の撤去など2台以上のモバイルロボットで協調作業を行う場合がある (Figure 4)。このようなとき、オプションのマニピュレータなどを使用して作業する必要がある。

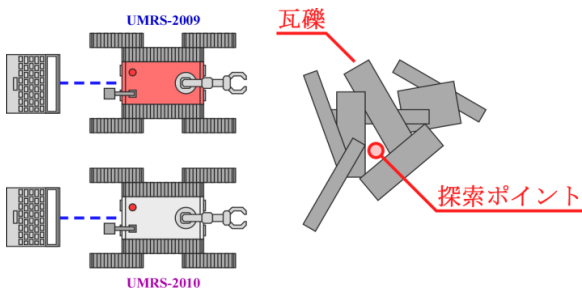


Fig. 4 モバイルロボットの協調作業

例えば、2台のモバイルロボットに搭載されているマニピュレータを1人のオペレータがどちらも操縦することが可能であれば、短時間でスムーズに作業を行うことができる場合も多々存在する (Figure 5)。

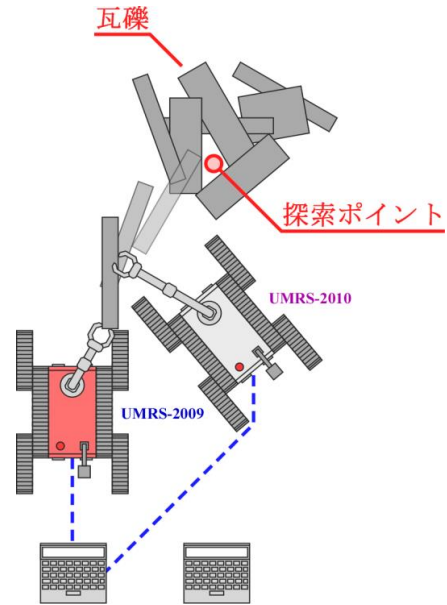


Fig. 5 マニピュレータの協調作業

また、1台のモバイルロボットからは見えないカメラの死角も別のモバイルロボットからのカメラ映像を共有することで把握することが可能である (Figure 6)。

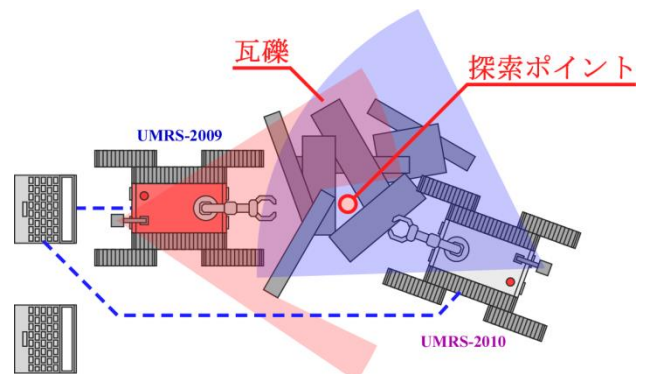


Fig. 6 カメラ画像の共有

2. 1. 3 オプションの変更

災害現場の状況によっては、モバイルロボットに搭載するオプションを変える必要がある。例えば、災害現場にガスが発生している場合はガスの成分を検知するセンサを搭載し、瓦礫が多い災害現場で救助者を探す場合にはマニピュレータを搭載する必要がある (Figure 7)。また、マニピュレータ1つを取り上げた場合においても、先端のエンドエフェクタを状況に応じて変更する場合が考えられる (Figure 8)。

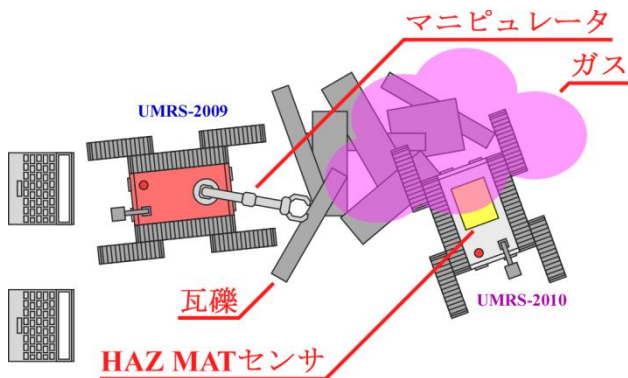


Fig. 7 オプションの取替え

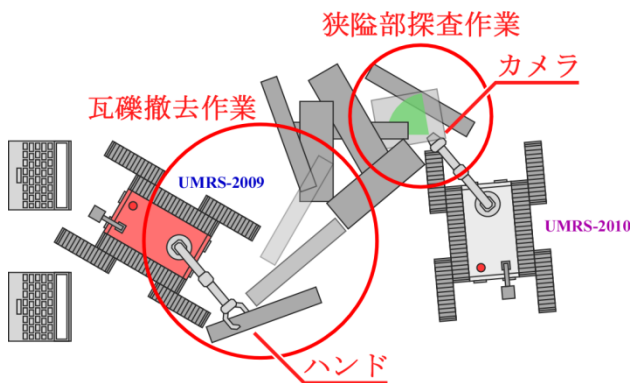


Fig. 8 エンドエフェクタの取替え

2. 2 対象のレスキューロボット

現時点で共通マニピュレータの対象となるレスキューロボットは、UMRS-2009、UMRS-2010、KOHGA3、FRIGOの4種類である。ここで例としてUMRS-2009とUMRS-2010の外観をそれぞれFigure 9、Figure 10に示す。

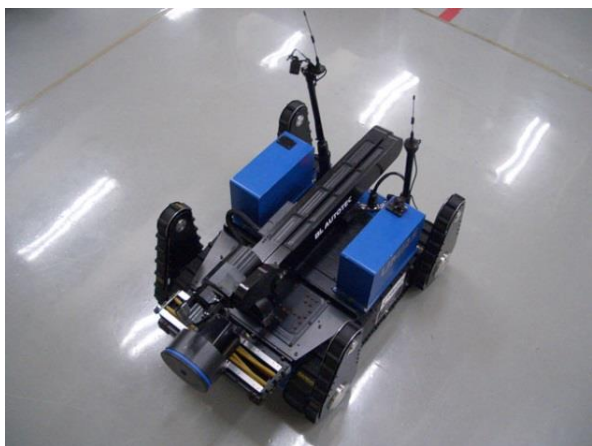


Fig. 9 UMRS-2009

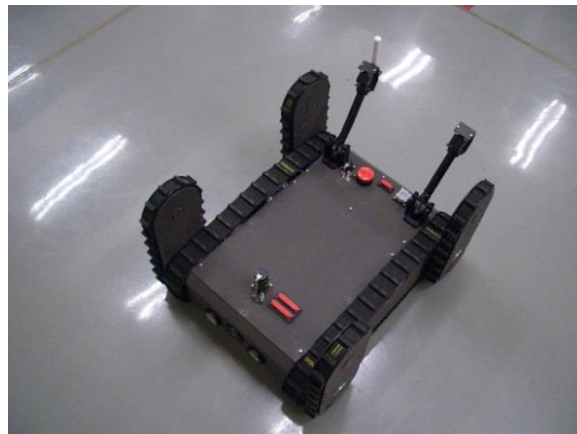


Fig. 10 UMRS-2010

我々が取り扱うレスキューロボットは、Figure 11に示すように本体を動かすためのクローラと段差や瓦礫などを乗り越えるための足がかりとなるフリッパーから構成される。このクローラとフリッパーに取り付けられているベルトを回すことで前進や後進、旋回などの動作を行うことができる。

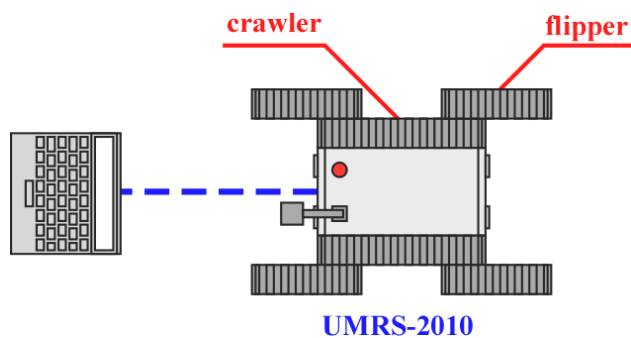


Fig. 11 レスキューロボットの構造

これら4種類のロボットは、ハードウェア的な点においては共通化することが容易であるが、中の制御基板を含むソフトウェアについてはそれぞれが独自の構造を形成している。Table 1にそれぞれのロボットの内部ハードウェア構成を示す。

Table 1 内部ハードウェア構成

ロボット名	搭載制御ボード	ソフトウェア
UMRS-2009	TPIP2	購入時組み込み済み
UMRS-2010	VDX-6314D-512	自作プログラム
FRIGO	Raspberry Pi	自作プログラム
KOHGA3	Zotac Nano-AD10-J	自作モジュール (OpenRTM-aist)

UMRS-2009については、サンリツオートメーション株式会社製の TPiP2 を使用しており、購入時に組み込まれているプログラムを利用して、直接操縦者へデータが送信される。また、UMRS-2010 と FRIGO については組み込み PC が使用されており、KOHGA3 に至っては、UMRS-2009 と FRIGO 同様に組み込み PC を用いているが、ロボットの制御にはミドルウェアである OpenRTM-aist を使用している。このため、オプションである共通マニピュレータとの接続に関しては、共通化するための仕組みが必要となる。

そこで、共通化するにあたって、KOHGA3 に準拠する形を取り、KOHGA3 同様 OpenRTM-aist を使用することとした。OpenRTM-aist とは、独立行政法人産業技術総合研究所より配布されている RT ミドルウェア実装の一つである。RT ミドルウェアは、ロボット機能要素のソフトウェアを一つのモジュールとし、複数のモジュールを組み合わせることでロボットシステムを構築するためのソフトウェアプラットフォームである (Figure 12)。ここでの RT 機能要素とは、あるまとまった機能を提供するロボット構成要素で、Fig. 12 の Tpip や GyroScope などがそれにあたる。また、ハードウェアに結び付くドライバ的役割のソフトウェアだけではなく、制御や画像処理といったソフトウェアのみで構成されるものも RT 機能要素に含まれる。

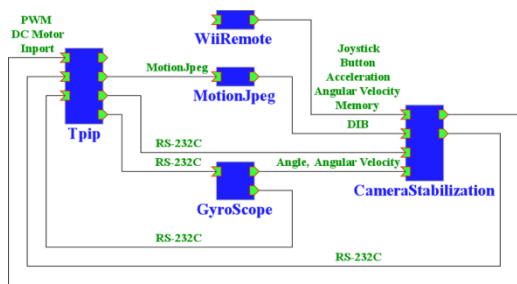


Fig. 12 モジュールの構成

災害現場の環境の変化に対応するためには、双方向の情報（入出力データ）を一つのモジュールに一度集約する必要がある (Figure 13)。そうすることで、モジュールを柔軟に変化させた場合であっても、情報送信場所を切り替えることで容易に対応することができる。

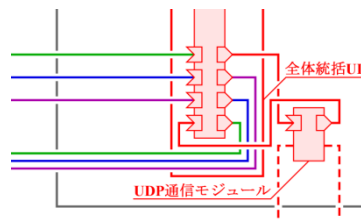


Fig. 13 データの収集

Figure 14 にシステム全体の概略図を示す。

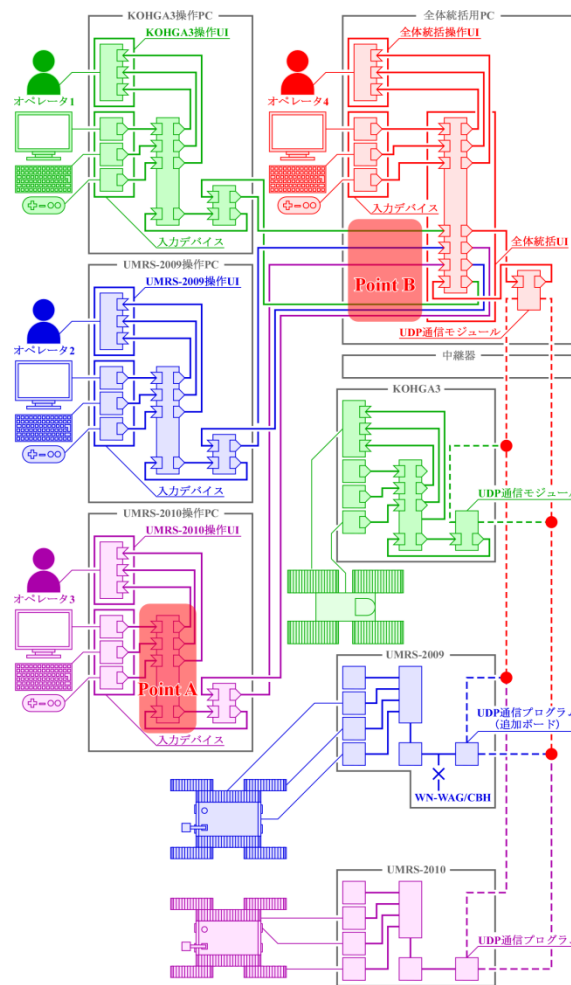


Fig. 14 モジュールを用いたシステム全体の概略図

Fig. 14 は基本的なモジュール構成で、災害現場でもっともよく使用されると考えられる群行動を想定している。指揮官であるオペレータ4が全体を統括しながら探索ポイントまで各モバイルロボットを誘導し、探索ポイントのエリアまで入ると指揮官の指示の下、それぞれのオペレータ1から3までが探索などを開始する。

また、それぞれのモバイルロボットのオプションを変更した場合も、各操縦 PC 内モジュールを交換することで対応でき (Fig. 14 の Point A)、協調作業における操縦権受託であっても、全体統括用 PC から各操作 PC にセンサ情報を提供したり、操縦権限を与えたりすることで対応できる (Fig. 14 の Point B)。

2. 3 共通マニピュレータ

マニピュレータは、災害現場でレスキューロボットのオプションとして搭載し、遠隔操縦によって操作される。また、各マニピュレータの指揮権を相手に受託することでスムーズに協調作業が行えることを前提としている。さらに将来的には、エンドエフェクタをアタッチメントとして、災害現場の規模や状況などによって即座に付け替え、環境に対応する予定である。

2. 3. 1 リンク構成

共通マニピュレータの使用用途として、協調作業による瓦礫や危険物の撤去が上げられる。そのためリンク機構としては、人間の代替作業が容易で、設置面積に対して可動範囲が広く、スピードが出せる一般的な産業用ロボットと同じ 6 軸垂直多関節型を採用した (Figure 15)。

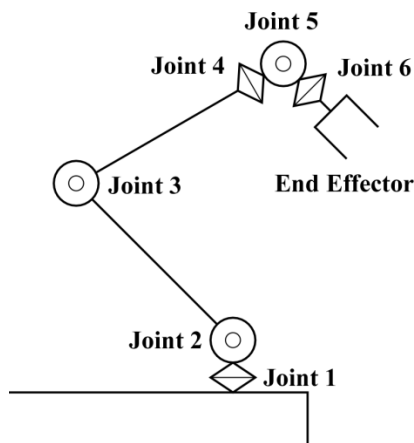


Fig. 15 共通マニピュレータのリンク機構

マニピュレータのジョイント部分には ROBOTIS 社製の Dynamixel MX シリーズを使用している (Figure 16)。



Fig. 16 Dynamixed MX-64R (SolidWorks)

Dynamixel MX シリーズは減速ギア、アンプ、ネットワークを一体化したスマートアクチュエータである。また、温度、電圧、電流などの状態監視が可能で、安定したアプリケーションを実現している。さらに RS-485 によって高速通信とマルチドロップ接続を実現しており、RS-485 と電源の 4 線からなるコネクタを 2 つ搭載していることで、デジチェーンが可能となり多関節機構におけるケーブルリングが容易となる。

Figure 17 と Figure 18 に Dynamixel MX シリーズを用いて設計した共通マニピュレータの 3D データ (SolidWorks) を示す。

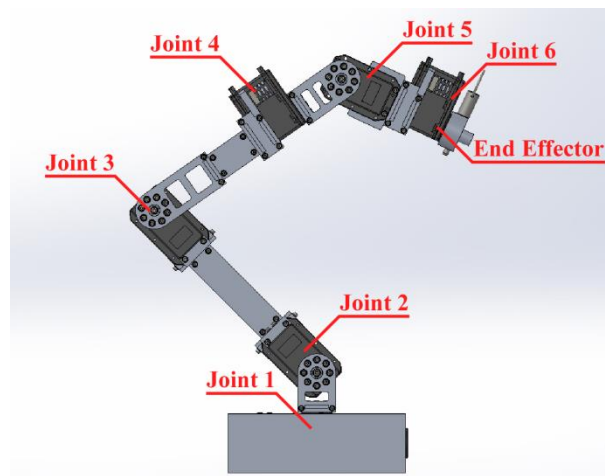


Fig. 17 共通マニピュレータのリンク機構 (SolidWorks)

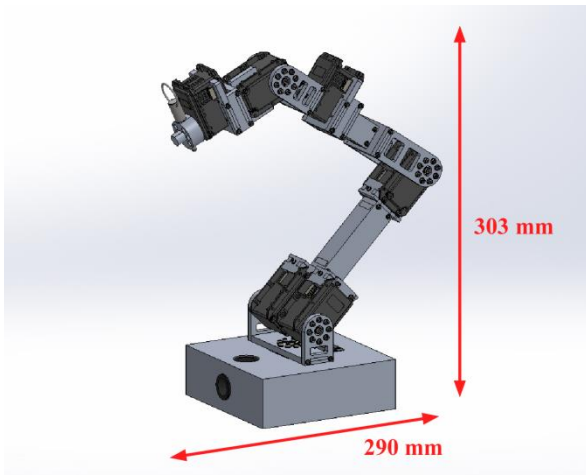


Fig. 18 共通マニピュレータ (SolidWorks)

今回、もっとも負荷が強い第2関節部分については、ダブルモータにすることによってトルクを補った (Figure 19)。

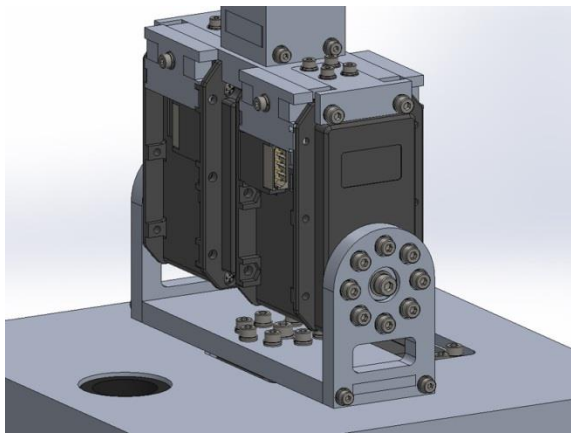


Fig. 19 ダブルモータ (SolidWorks)

2. 3. 2 システム構成

Figure 20 に共通マニピュレータのシステム構成図を示す。システム構成には大きく分けて2つの方法が考えられる。1つはロボット本体を介さず、直接遠隔操作をする方法である。もう1つはロボット本体を介して、間接的に遠隔操作を行う方法である。そのため、Fig. 20 に示すようにシリアル通信 (RS-232C) によって入出力できる形を取る。これにより、Figure 21 に示すように RS-232C から FT232RL (USB), XPort (LAN), WiPort (WLAN) の変換モジュールを使うことで、汎用性を高め2つのシステム構成を実現するだけでなく、4種類のロボットに対応することができる。また、エンドエフェクタは、先端の Dynamixed MX-64R

にデジチェーンで接続することにより、取替えが容易に行える。

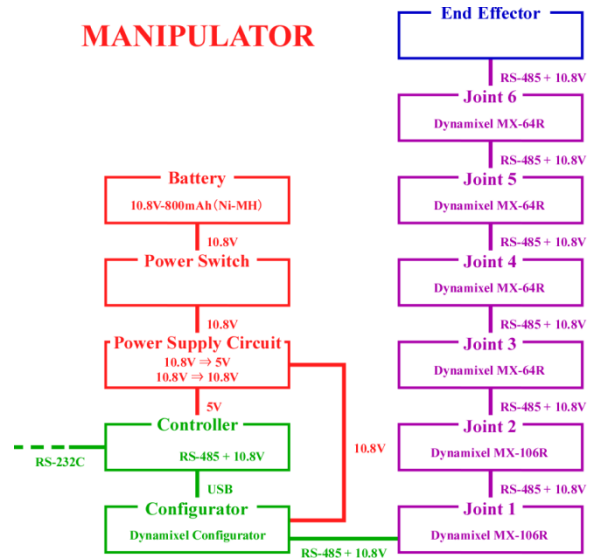


Fig. 20 システム構成図

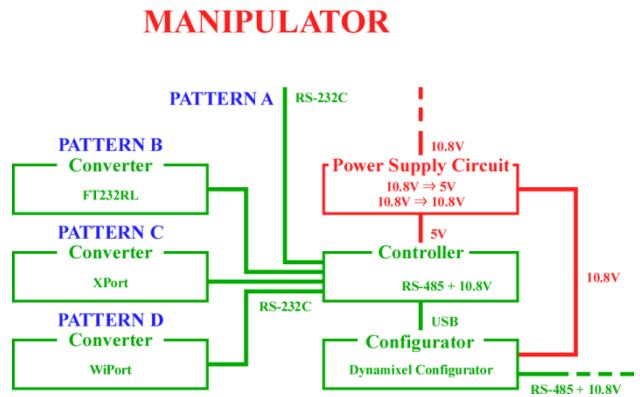


Fig. 21 通信方式切り替え部分

3. 相対位置計測

ロボット群を形成するために必要な相対位置計測システムは、小型のレスキューロボットに搭載することから、できるだけ小型・コンパクトかつ軽量であること、またその計算処理負荷もできるだけ軽いことが求められる。通常ロボットには操縦者が遠隔操作するとき、ロボットの周囲の環境をモニタするためのカメラが搭載されている。このモニタ用カメラを相対位置計測用に用いることでスペース的、また系統的にコンパクトになっている。このシステムの計測には ARTToolkit を用いており、各ロボットの上部に設置した立方体の側面 (4面) にマーカを貼り付

け、それをカメラで認識することでロボットの3次元位置を計測する。また、マークはARマークを用いているためIDを取得することができ、そのIDから各ロボットの機体番号、ロボットの向き、姿勢を検知することができる。このシステムにより群行動の際、ロボットの相対位置を計測することで、追従行動を可能となる。ここで5つのロボットに見立てたマークを設置した例を Figure 22 に示す。また、この状態で相対位置計測システムによって、相対位置関係を計測した際のモニタ画面を Figure 23 示す。



Fig. 22 5つのマークの設置例

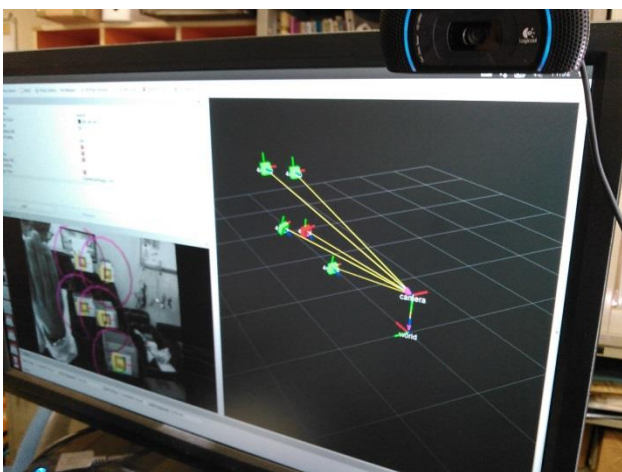


Fig. 23 相対位置計測システム

4. 手法の提案

4.1 キャリブレーション

3章では相対位置計測について述べたが、このシステムを災害現場の実環境に対応させるためには事前に以下の3つのキャリブレーションを行う必要がある。

- ①カメラキャリブレーション
- ②ソフトウェアの再帰的補正
- ③ハードウェアの組み付けおよび加工誤差のキャリブレーション

今回は③の一部自動化のために必要となるマニピュレータ制御として、基準ARマーク（エンドエフェクタに取り付けられたキャリブレーションに使用するマーク）をカメラの真下の目標位置へ移動させる手法について述べる。カメラの真下の目標位置の算出には、仮想9軸のマニピュレータ（マニピュレータ+カメラから見た基準ARマークの3次元座標）として順運動学を用いる。また、基準ARマークをカメラの真下の目標位置へ移動させるために、カメラの真下の目標位置に対するマニピュレータ（現実の6軸）の逆運動学を解き、各関節目標値の算出および追従させる（Figure 24, Figure 25）。

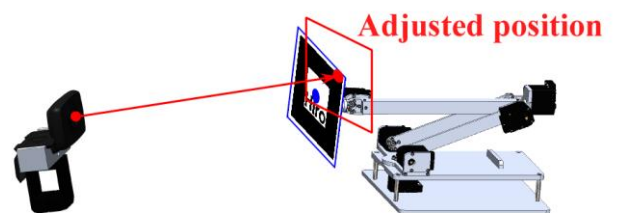


Fig. 24 補正前



Fig. 25 補正後

4. 2 手法の式導出

4. 2. 1 対象となる概略図

本手法の導出にあたり、以下および Figure 26, Figure 27 のように変数を定義する。なお、Fig. 26 の $q_2 \sim q_6$ は相対角度を表す。

- l_1 : 関節 1 から関節 2 までの長さ [m]
- l_2 : 関節 2 から関節 3 までの長さ [m]
- l_3 : 関節 3 から関節 4 までの長さ [m]
- l_4 : 関節 4 から関節 5 までの長さ [m]
- l_5 : 関節 5 から関節 6 までの長さ [m]
- l_6 : 関節 6 からエンドエフェクタ先端までの長さ [m]
- x_p : エンドエフェクタの x 成分 [m]
- y_p : エンドエフェクタの y 成分 [m]
- z_p : エンドエフェクタの z 成分 [m]
- α_p : エンドエフェクタの x 軸周りの角度成分 [rad]
- β_p : エンドエフェクタの y 軸周りの角度成分 [rad]
- γ_p : エンドエフェクタの z 軸周りの角度成分 [rad]

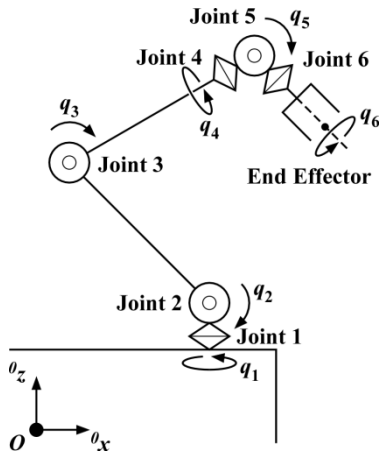


Fig. 26 マニピュレータの概略図

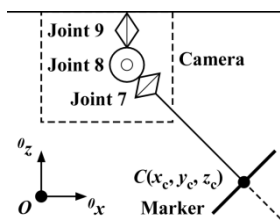


Fig. 27 カメラから見た基準 AR マーカの概略図

ここで、上記の変数を用いて仮想 9 軸のマニピュレータの順運動学 (位置座標) を表現すると式 (1) となる。なお、式 (1) で使用されている変数は以下のように定義している。

- 0R_1 : 関節 1 の回転行列 (絶対座標系)
- 1R_2 : 関節 2 の回転行列 (関節 1 の相対座標系)
- 2R_3 : 関節 3 の回転行列 (関節 2 の相対座標系)
- 3R_4 : 関節 4 の回転行列 (関節 3 の相対座標系)
- 4R_5 : 関節 5 の回転行列 (関節 4 の相対座標系)
- 5R_6 : 関節 6 の回転行列 (関節 5 の相対座標系)
- 6R_7 : 関節 7 の回転行列 (関節 6 の相対座標系)
- 7R_8 : 関節 8 の回転行列 (関節 7 の相対座標系)
- 8R_9 : 関節 9 の回転行列 (関節 8 の相対座標系)

- l_{10} : l_1 のベクトル表記 (関節 1 の相対座標系)
- l_{20} : l_2 のベクトル表記 (関節 2 の相対座標系)
- l_{30} : l_3 のベクトル表記 (関節 3 の相対座標系)
- l_{40} : l_4 のベクトル表記 (関節 4 の相対座標系)
- l_{50} : l_5 のベクトル表記 (関節 5 の相対座標系)
- l_{60} : l_6 のベクトル表記 (関節 6 の相対座標系)
- 0C : 絶対座標系における C
- pC : エンドエフェクタの相対座標系における C

$$\begin{aligned} {}^0C &= {}^0R_1(l_{10} + {}^1R_2(l_{20} + {}^2R_3(l_{30} + {}^3R_4(l_{40} + {}^4R_5(l_{50} \\ &\quad + {}^5R_6(l_{60} + {}^6R_7({}^7R_8({}^8R_9({}^pC))))))))) \\ &= {}^0R_1 l_{10} + {}^0R_1 {}^1R_2 l_{20} + {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 l_{30} \\ &\quad + {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_4 l_{40} + {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_4 {}^4R_5 l_{50} \\ &\quad + {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^4R_5 {}^5R_6 l_{60} \\ &\quad + {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_4 {}^4R_5 {}^5R_6 {}^6R_7 {}^7R_8 {}^8R_9 {}^pC \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} {}^0x_c \\ {}^0y_c \\ {}^0z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_4 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_5 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_6 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \cos \gamma_p & -\sin \gamma_p & 0 \\ \sin \gamma_p & \cos \gamma_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_p & 0 & -\sin \beta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_p & 0 & \cos \beta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_p & -\sin \alpha_p \\ 0 & \sin \alpha_p & \cos \alpha_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (1)
\end{aligned}$$

また、仮想エンドエフェクタ（仮想9軸マニピュレータの先端）の姿勢については、カメラから見た基準ARマーカの3次元姿勢と6軸マニピュレータのエンドエフェクタ姿勢の比較によって導出する。

次に、6軸のマニピュレータの逆運動学（位置座標）は式(2)で表現でき、 0P 絶対座標系におけるエンドエフェクタの位置座標を意味する。

$$\begin{aligned}
{}^0P = & {}^0R_1(l_{10} + {}^1R_2(l_{20} + {}^2R_3(l_{30} + {}^3R_4(l_{40} \\
& + {}^4R_5(l_{50} + {}^5R_6(l_{60})))))) \quad (2)
\end{aligned}$$

なお、マニピュレータの姿勢における関係式は、オイラ一角によるエンドエフェクタの姿勢（=カメラから見た基準ARマーカの3次元姿勢）と各関節角から導き出した姿勢の比較によって導出する。

5. 結言

本論文では、最初に相対位置計測システムを使用する上で災害現場における再キャリブレーションの必要性について述べた。次に2章では、災害現場の環境を想定した際の、ロボットの役割について述べるとともに実際に開発されたレスキューロボットについても触れた。3章、4章で

は、相対位置計測システムを災害現場の実環境に対応する上で極めて重要となるキャリブレーションについて述べた。とりわけ今回は、半自律再キャリブレーションの一部であるハードウェアキャリブレーションの自動化に必要なとなるマニピュレータのカメラ画像の中心への位置追従を中心に述べた。その追従手法には2つの工程が必要で、第1工程として、マニピュレータに搭載したカメラから見た基準ARマーカの三次元座標を仮想9軸マニピュレータとし、順運動学を用いることでマニピュレータの先端（エンドエフェクタ）の目標位置を算出した。第2工程では、算出したエンドエフェクタの目標位置へ基準ARマーカを移動させるために、マニピュレータの逆運動学を解くことで各関節の目標値を算出した。

今後はシミュレーションを用いて検証を行い、その結果を基に実際にマニピュレータによる自動化を行っていく予定である。

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP25282108の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 田所 諭, “文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト: ロボット等次世代防災基盤技術の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5(2005), pp.541~543.
- [2] 国際レスキューシステム研究機構, “レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 H14~17 報告書”, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト, (2003-2006).
- [3] 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト, “レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発”, 総括成果報告書, (2007).
- [4] 横小路 泰義, “レスキューロボットの操縦インタフェース - 大特「ヒューマンインタフェースグループ」の研究紹介 -, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5(2004), pp.566-569.
- [5] 田所 諭, “閉鎖空間内高速走行探査群ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.10(2009), pp.1107-1110.

- [6] 佐藤 徳孝, 松野 文俊, “レスキューロボット遠隔操縦インタフェース技術”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2(2010), pp.156-159.
- [7] 大野 和則, 城間 直司, “レスキューロボットの遠隔操縦支援技術”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2(2010), pp.160-163.
- [8] 小林 滋, 黒住 亮太, 前田 弘文, 高森 年, 辻井 祐, “単眼カメラ画像による群ロボット相対位置計測”, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2014)
- [9] 黒住 亮太, 前田 弘文, 小林 滋, 大坪 義一, 高森 年, “UMRS2010 を用いた群制御のための追尾システムの検証”, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会(SI2014)
- [10] 小林 滋, 前田 弘文, 黒住 亮太, 高森 年, “ロボット認識トラッキングと相対位置計測システムの開発”, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2015)