学術・技術論文

移動マニピュレータによる建設作業システムに関する研究 —実システムによる基本ブロック組積作業と精度—

見 浪 護^{*1} 羽多野 正 俊^{*2} 朝 倉 俊 行^{*1}

A Study of Construction Operation System Using Mobile Manipulators —Experiments of Piling Up Blocks with Real System and Accuracy—

Mamoru Minami^{*1}, Masatoshi Hatano^{*2} and Toshiyuki Asakura^{*1}

This research is concerned with a construction operation system to make a long fence with piling up blocks by a mobile manipulator. The long fence can not be built by a floor-fixed robot manipulator. Then a kind of moving mechanism is essential to the manipulator. A mobile manipulator having the moving mechanism has an ability to build a huge structure like the long fence, because it can move around in an operation area by itself. One of problems to pile up blocks accurately by the mobile manipulator is errors between a desired position/orientation at destination and an actual one of a mobile robot which is a body of the mobile manipulator. The errors disturb accurate construction operations. A purpose of this research is to build the mobile manipulator system to be able to construct the huge structure. In this paper, a mobile manipulator system having a recognition system to detect the position/orientation errors of the mobile manipulator is proposed. First, a hand-eye camera system is constructed to recognize the position/orientation errors caused by traveling. Second, a fixation control method of the hand-eye camera is utilized to recognize the errors precisely. Third, the real construction operation system with the above recognition system is constructed. Then, the accuracy of piled blocks is discussed by experiments using our real mobile manipulator system, as one of operations to construct the huge structure. Finally, influences caused by changes of yaw and pitch angle of the body of the mobile manipulator are evaluated with real experiments.

Key Words: Mobile Manipulator, Construction Operation, Hand-eye Camera, Landmark, Fixation Control

1. ま え が き

現在、3K（きつい、きたない、きけん）作業を人間の代わりに行うロボットマニピュレータが広く普及し、産業界の発展の一翼を担っている。しかしそれらのマニピュレータのほとんどは床、壁等に固定されており、作業範囲はアームの到達可能距離内に限定されている。そのため、広範囲な作業や巨大構造物の構築には巨大なアームや複数台のマニピュレータが必要であった。これに対し、本質的に可動範囲の制約を受けない移動機構を持つマニピュレータを用いれば、これらの問題を解決できる。そのため近年、移動機構を有し自ら作業場所へ移動して作業を行うことができる移動マニピュレータの研究が行われている。人間とロボットが協調して作業を行う、マン・ロボット協調作業型マニピュレータに関する研究[1]、ハンドが作業を行う場合の車載マニピュレータと移動ロボットの動的干渉に対する制御法を検討した研究[2]、与えられた手先の目標軌道から移動ロボットの目標軌道を生成し制御を行う研究[3]などがある。

筆者らも、走行中に移動マニピュレータが外界に置かれた物を取り上げる作業を行うことを試みた研究[4]や、一定の傾斜角を持つ斜面を走行する移動マニピュレータについて、ころがり摩擦抵抗を含めた重力による影響に対する補償法を提案した研究[5]などを行ってきた。

3K作業の一つに、土木・建築作業現場においてコンクリートブロックを積み上げて塀を作るブロック塀製作作業があり、労働者不足が深刻な問題となっている。重労働かつ熟練作業であるブロック塀製作作業を広範囲にわたって行うためには、可動範囲の制約を受けない移動マニピュレータが必要であると考えられる。現在、キャタピラーによる移動機構を有し、人間が搭乗または遠隔操作で作業を行う石積ロボット[6][7]は実用化されているが、自律的に作業を行うロボットはまだ実現されていない。

本研究は、移動マニピュレータを用いた建設作業システムを構築することを目的とする。従来の地上固定型マニピュレータが実用上要求される作業は、作業対象物を掴み上げ、目標位置へ正確に置くことであった。これに対し、移動マニピュレータが要求される基本作業には大別して、(1)作業対象物を掴み上げ積み荷する積載作業、(2)積載物の搬送作業、(3)搬送後に荷下ろしを行い目標位置へ置く設置作業、がある。本論文ではこれらの基本作業を基本ブロック組積作業と呼ぶ。特に、本研究

原稿受付 1997年12月19日

^{*1}福井大学工学部

^{*2}富山大学工学部

^{*1}Faculty of Engineering, Fukui University

^{*2}Faculty of Engineering, Toyama University

で取り扱う基本ブロック組積作業には設置作業後の対象物の位置精度が重要な問題となる。また(2)の搬送作業時に、移動マニピュレータを目標位置へ正確に誘導することは、非ホロノム性により難しいことは一般的に知られており[8][9]、実システムにおいて走行誤差のない正確な走行は困難である[10]~[13]。筆者らは文献[4]において、ハンドアイビジュアルフィードバック制御を用いて、水平路面上を走行中の移動マニピュレータのハンドと、走行面と平行な面に置かれた対象物の相対位置誤差を減少させることができることを実証した。これにより、移動マニピュレータの走行誤差によって生じる基準座標系におけるハンドの位置誤差を車載マニピュレータの動作により減少させることができることを示した。しかし前述の(1)~(3)の作業後の対象物の位置精度についてはまったく検証を行っていない。

本報は、ランドマークとハンドアイビジュアルフィードバック手法を用いて移動マニピュレータの走行誤差に対する補償を行い、実移動マニピュレータモデルを用いて(1)~(3)の作業を行ったときの設置されたブロックの位置精度を評価する。

ここで、カメラのレンズ周辺の歪み等の影響を減少させることにより走行誤差を精度よく認識するために、注視動作を利用する。従来の注視動作に関する研究[14]はカメラ位置を固定し、カメラの視線軸のみを動かす手法であり、ハンドによる対象物体の把持動作とは別の機能として取り扱われていた。しかしハンドにカメラを設置し、かつランドマークを把持対象物の近傍に配置することにより注視動作が把持動作の一部となり、物体を見る動作と把持する動作を一連の動作として扱うことができ、作業効率の向上を図ることができる。また、対象物体とカメラの距離が離れていて物体を撮影しにくい場合においても、ハンドを動かすことにより物体を撮影しやすい位置にカメラを移動させることができる。

構築した実システムを用いて前述の(1)~(3)の作業を行い、車載マニピュレータと移動ロボットの動的干渉や車載マニピュレータの姿勢変化に依存した重心位置の変化により生じる移動マニピュレータの姿勢変化と積載、設置誤差の相関関係を実験により検証する。

2. 基本ブロック組積システムの構成

2.1 幾何学的関係の定義

Fig. 1 に移動マニピュレータ、ランドマーク、目標ブロック設置位置の幾何学的関係を示す。図中の記号は、

Σ_W : 基準座標系

Σ_M : 移動マニピュレータ座標系

Σ_6 : ハンド座標系

Σ_C : カメラ座標系

Σ_{P0} : ランドマーク座標系

Σ_{B0} : 目標ブロック設置位置座標系

であり、 Σ_M , Σ_6 , Σ_C は移動マニピュレータと共に動く動座標系であり、 Σ_W , Σ_{P0} , Σ_{B0} は固定座標系である。また、以下の運動学の定式化に用いる ${}^i T_j$, ($i = W, M, 6, C : j = M, 6, C, P0, B0$) は、 Σ_i を基準に表した Σ_j の位置姿勢を表す同次変換行列である。特に、 ${}^W T_{P0}$ はランドマーク設置位置、 ${}^W T_{B0}$ は目標ブロック設置位置を表す。また図には示していな

Fig. 1 Kinematics of mobile manipulator system

いが、 Σ_W を基準に表した実際のブロック設置位置 Σ_B を表す同次変換行列を ${}^W T_B$ と表し、6章で述べる移動マニピュレータ上の搬送台の座標系を Σ_{MC} とする。移動マニピュレータが目標の移動位置に位置姿勢誤差なく停止し、車載マニピュレータが、ある目標の形状を実現するときのハンドとカメラの位置姿勢関係と車載マニピュレータの形状を基準マニピュレータ形状と呼ぶ。このときの移動マニピュレータとランドマークの位置姿勢関係を基準位置姿勢関係と呼び、この関係を目標の関係として Fig. 1 の A に示し次式により表される。

$${}^W T_{P0} = {}^W T_{M0} {}^{M0} T_{60} {}^{60} T_{C0} {}^{C0} T_{P0} \quad (1)$$

座標系および同次変換行列の添字 0 は基準位置姿勢関係であることを表し、これらの同次変換行列はあらかじめ目標として設定し既知である。

A の目標の関係に対し、実際には移動マニピュレータは Fig. 1 の B に破線で示される走行誤差を含んだ位置に停止する。この移動マニピュレータとランドマークの位置姿勢関係を実際位置姿勢関係と呼び、ハンドとカメラの位置姿勢関係と車載マニピュレータの形状を基準位置姿勢関係 ${}^{M0} T_{60} {}^{60} T_{C0}$ と同じ形状を与えるとき、B に示す幾何学的関係は次式で表される。

$${}^W T_{P0} = {}^W T_M {}^{M0} T_{60} {}^{60} T_{C0} {}^C T_{P0} \quad (2)$$

基準位置姿勢関係において、移動マニピュレータが ${}^W T_{M0}$ に位置していることを仮定したブロック設置のための車載マニピュレータの形状 ${}^{M0} T_{B0}$ は、移動マニピュレータが走行誤差を持った ${}^W T_M$ に位置するときには ${}^W T_{B0}$ にブロックを設置することができない。そのため、 ${}^W T_M$ に位置する移動マニピュレータが ${}^W T_{B0}$ にブロックを設置するための車載マニピュレータの形状 ${}^M T_{B0}$ を求める必要がある。そこでまず、移動マニピュレータの位置姿勢誤差を次式に示す同次変換行列 ΔT_M で定義する。

$${}^W T_M = {}^W T_{M0} \Delta T_M \quad (3)$$

さらに、 ${}^{C0} T_{P0}$ と ${}^C T_{P0}$ の位置姿勢誤差を次式に示す同次変換行列 ΔT_C で定義する。

$${}^{C0} T_{P0} = \Delta T_C {}^C T_{P0} \quad (4)$$

移動誤差 ΔT_M は式(1)~(4)より次式で求められる。

$$\Delta T_M = {}^{M0} T_{60} {}^{60} T_{C0} \Delta T_C {}^{60} T_{C0}^{-1} {}^{M0} T_{60}^{-1} \quad (5)$$

以上、式(4)より ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ をカメラ画像情報から検出することによりカメラの位置姿勢誤差 $\Delta\mathbf{T}_C$ が計算でき、式(5)より $\Delta\mathbf{T}_M$ を算出できることが分かる。

式(1)~(3)において、 ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ を ${}^{C_0}\mathbf{T}_{P_0}$ に変化させるための車載マニピュレータの形状を ${}^M\mathbf{T}_{60}$ とすると、

$${}^M\mathbf{T}_{60} = \Delta\mathbf{T}_M^{-1} {}^{M_0}\mathbf{T}_{60} \quad (6)$$

が成り立ち、式(6)と ${}^M\mathbf{T}_{B_0} = {}^M\mathbf{T}_{60} {}^{60}\mathbf{T}_{B_0}$ の関係より ${}^M\mathbf{T}_{B_0}$ は、

$${}^M\mathbf{T}_{B_0} = \Delta\mathbf{T}_M^{-1} {}^{M_0}\mathbf{T}_{B_0} \quad (7)$$

と求められる。 ${}^W\mathbf{T}_M$ に停止後、車載マニピュレータの形状を式(6)で与えるとき式(3)および式(7)より、

$${}^W\mathbf{T}_M {}^M\mathbf{T}_{B_0} = {}^W\mathbf{T}_{M_0} \Delta\mathbf{T}_M \Delta\mathbf{T}_M^{-1} {}^{M_0}\mathbf{T}_{B_0} = {}^W\mathbf{T}_{B_0} \quad (8)$$

が導かれることから、 ${}^W\mathbf{T}_{B_0}$ にブロックを設置することができる。

2.2 注視制御法の適用

前節で示した移動マニピュレータの停止後の動作を以下にまとめる。

- (1) ハンドアイカメラによりランドマークを撮像し、 ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ を算出する。
- (2) 式(4)より $\Delta\mathbf{T}_C$ を計算する。
- (3) 車載マニピュレータ形状を式(6)より得られた形状 ${}^M\mathbf{T}_{60}$ に変化させる。

レンズ周辺部の歪みがなく車載マニピュレータに運動学的誤差がないときには $\Delta\mathbf{T}_C$ は正確に検出され、式(8)より ${}^W\mathbf{T}_{B_0}$ にブロックを設置することができる。ここで、 $\Delta\mathbf{T}_C$ の検出範囲を広く取るため、 ${}^{C_0}\mathbf{T}_{P_0}$ の関係においてランドマークをカメラ画像中央で撮像するよう設定すると ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ の関係ではカメラがランドマークを画像中央で検出することができず、レンズ歪みに起因する誤差が含まれる。レンズ歪みの補正法については、ニューラルネットワークを用いた方法[15]が提案されているが、この文献[15]中でレンズ周辺部の歪みは中央部に比べ大きいことが示されている。したがって ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ より計算される $\Delta\mathbf{T}_C$ は誤差を含むことが問題となる。この誤差を取り除くために注視制御法を用いる。注視制御法は、カメラが取り付けられたハンドを動かしてレンズ中央でランドマークを撮像することにより前述の影響による誤差を減少させる手法であり、この車載マニピュレータの形状変更を注視動作と呼ぶ。

本節で述べた(1)、(2)による $\Delta\mathbf{T}_C$ の検出は計測工学では偏位法と呼ばれ、開ループである。これに対し注視制御法は零位法であり、フィードバックを伴うため車載マニピュレータの運動学的誤差も吸収することができる。ここで注視動作させる回数を k を用いて表すと、注視動作時に変化するのは車載マニピュレータの形状 ${}^M\mathbf{T}_{60}$ とカメラとランドマークの関係 ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ であるから、これらの同次変換行列の右肩に添え字 k を付けて ${}^M\mathbf{T}_{60}^k$ 、 ${}^C\mathbf{T}_{P_0}^k$ と表す。すると式(1)と式(2)により次式が得られる。

$${}^W\mathbf{T}_{M_0} {}^{M_0}\mathbf{T}_{60} {}^{60}\mathbf{T}_{C_0} {}^{C_0}\mathbf{T}_{P_0} = {}^W\mathbf{T}_M {}^M\mathbf{T}_{60}^k {}^{60}\mathbf{T}_{C_0} {}^C\mathbf{T}_{P_0}^k \quad (9)$$

また ${}^C\mathbf{T}_{P_0}^k$ より式(4)で定義される $\Delta\mathbf{T}_C$ についても添え字 k を付けて $\Delta\mathbf{T}_C^k$ と表す。添え字 k を用いて書き直した式(4)を式(9)に代入すると次式が得られる。

$${}^W\mathbf{T}_{M_0} {}^{M_0}\mathbf{T}_{60} {}^{60}\mathbf{T}_{C_0} \Delta\mathbf{T}_C^k = {}^W\mathbf{T}_M {}^M\mathbf{T}_{60}^k {}^{60}\mathbf{T}_{C_0} \quad (10)$$

$\Delta\mathbf{T}_C^k$ が単位行列 $\mathbf{I}$ となるように、つまり ${}^C\mathbf{T}_{P_0}^k$ が ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ に近づくように繰り返し注視動作を行い、繰り返し動作終了時の車載マニピュレータの形状を ${}^M\tilde{\mathbf{T}}_{60}$ と表すと式(10)は次式となる。

$${}^W\mathbf{T}_{M_0} {}^{M_0}\mathbf{T}_{60} {}^{60}\mathbf{T}_{C_0} = {}^W\mathbf{T}_M {}^M\tilde{\mathbf{T}}_{60} {}^{60}\mathbf{T}_{C_0} \quad (11)$$

式(3)と式(11)より、

$${}^M\tilde{\mathbf{T}}_{60} = \Delta\mathbf{T}_M^{-1} {}^{M_0}\mathbf{T}_{60} \quad (12)$$

が得られ、

$$\Delta\mathbf{T}_M = {}^{M_0}\mathbf{T}_{60} {}^M\tilde{\mathbf{T}}_{60}^{-1} \quad (13)$$

となり、レンズ中央でランドマークを撮像するように設定することでレンズ周辺の歪みによる ${}^C\mathbf{T}_{P_0}$ の検出誤差を取り除いた移動マニピュレータの走行誤差 $\Delta\mathbf{T}_M$ が得られる。また、式(12)の右辺は式(6)の右辺と等しいことから、

$${}^M\mathbf{T}_{60} = {}^M\tilde{\mathbf{T}}_{60} \quad (14)$$

であり、注視動作を繰り返して得られた車載マニピュレータの形状 ${}^M\tilde{\mathbf{T}}_{60}$ は走行誤差 $\Delta\mathbf{T}_M$ を補正した形状であることが分かる。ここで前述のように、従来の注視動作の手法に対し本手法はランドマークを把持対象物の近傍に配置することにより物体を見る動作と把持する動作を一連の動作として扱うため、作業効率の向上を図ることができる。

3. 基本ブロック組積システム

Fig. 2 に提案する基本ブロック組積システムのブロック線図を示す。まず Fig. 2 の左端で、システムへの入力である目標のブロック設置位置 ${}^W\mathbf{T}_{B_0}$ が車載マニピュレータの目標の形状 ${}^{M_0}\mathbf{T}_{B_0}$ と移動マニピュレータの目標の位置姿勢 ${}^W\mathbf{T}_{M_0}$ に分離される。 ${}^W\mathbf{T}_{M_0}$ が入力される(a)の誘導制御部では、移動マニピュレータをブロック設置位置へ移動させるための誘導制御が行われる。誘導制御には文献[11]で提案された制御法と文献[10][12]の推測航法を組み合わせる。この制御方法は、移動ロボットの位置姿勢の推定が誤差なく行える条件のもとで誘導コースが無制限遠方まで続くとき移動ロボットの位置姿勢誘導誤差が零に収束することが保証されている。(a)の制御部の下方に示した位置推定部は左右の駆動輪の回転角速度 $\dot{\theta}_{WR}, \dot{\theta}_{WL}$ から移動マニピュレータの位置姿勢 ${}^W\mathbf{T}_M$ の推定値 ${}^W\hat{\mathbf{T}}_M$ を計算する。誘導制御コントローラは ${}^W\hat{\mathbf{T}}_M$ を用いて誘導制御を行う。(a)の右方に示した積分は、走行路面上に積分された移動マニピュレータの走行結果が ${}^W\mathbf{T}_M$ となって現れることを表している。実際の走行では ${}^W\mathbf{T}_M \neq {}^W\hat{\mathbf{T}}_M$ であり ${}^W\mathbf{T}_{M_0}$ への正確な走行は困難である[10]~[13]。(b)の設置制御部では、式(13)より認識された $\Delta\mathbf{T}_M$ と ${}^{M_0}\mathbf{T}_{B_0}$ を用いて式(7)によりブロッ

Fig. 2 Block diagram of control system

ク設置を行うための車載マニピュレータの目標の形状 $^M T_{B0}$ が求められる。 $^M T_{B0}$ を実現するための車載マニピュレータの目標の関節角度ベクトル θ_{Md} を求める逆運動学変換が行われ、車載マニピュレータ用コントローラは θ_{Md} を用いて車載マニピュレータを動作させる。動作結果である車載マニピュレータの関節角度ベクトル θ_M は順運動学変換を通して車載マニピュレータの形状 $^M T_B$ となって現れる。Fig. 2 の右端は $^W T_M$ と $^M T_B$ により ΣW を基準に表したブロック設置位置が $^W T_B$ となることを表している。

4. ハードウェア構成

Fig. 3 に試作した基本ブロック組積ロボットの写真を示し、Fig. 4 にハードウェアのブロック線図を示す。Fig. 4 に示した (a), (b) の各制御部はFig. 2 の各制御部 (a), (b) に対応している。車載マニピュレータは川崎重工製のロボット (Js-2) を使用し、移動ロボットはアクリル板を用いて試作した。また駆動輪は左右独立駆動であり、DC モータからの出力が金属チェーンを介して駆動輪に伝えられる。移動ロボットの底面の4隅にはサスペンション機構を有した補助輪が取り付けられている。Fig. 4 の (a) の誘導制御部では、左右の駆動輪の回転角速度 $\dot{\theta}_{WR}, \dot{\theta}_{WL}$ がロータリーエンコーダにより検出されカウンタボードを介してコンピュータに入力される。コンピュータは検出された $\dot{\theta}_{WR}, \dot{\theta}_{WL}$ から推定した $^W \dot{T}_M$ より各駆動輪への誘導制御量である指示回転角速度を計算する。計算された指示回転角速度はD/A ボードを介して指示電圧としてサーボシステムに入力されモータが駆動し移動マニピュレータがブロック設置を行うための位置に移動する。(b) の設置制御部では、ブロックを設置するための車載マニピュレータの目標の形状がI/O ボードにより車載マニピュレータ用コントローラに入力され、マニピュレータが動作する。図の最上部ではハンドアイカメラによって撮像されたランドマークがコンピュータに入力されることを表している。ランドマークの画像を取り込む際のカメラのピント合わせには自動焦点機能を用いる。

5. ヨー、ピッチ角の変化によるハンドへの影響

車載マニピュレータと移動ロボットの動的干渉と、車載マニピュレータの姿勢変化に伴う重心の位置の変化により生じる移動ロボット底面に取り付けた補助輪のサスペンション機構のたわみに起因する移動マニピュレータのピッチ角の変化により作業中に移動ロボットのヨー角とピッチ角が変化する。これらの

Fig. 3 Photo of our constructed mobile manipulator

Fig. 4 Block diagram of hardware system

問題点は、移動機構を有したマニピュレータ固有の問題点であるといえる。移動マニピュレータのサスペンションがハンドに及ぼす影響について議論した研究 [16] もあるが、ハンドの目標軌道に対する位置誤差と目標位置での静定時間を議論した研究であり、外界に対して作業を行った場合の作業対象物の位置誤差を検討したものではない。

移動マニピュレータが積載、設置作業を行う位置で注視動作が終了したときの姿勢を基準とし、作業中に生じる ΣM の $^M z$ 軸まわりのヨー角の変化を $\Delta\psi$ 、 $^M x$ 軸まわりのピッチ角の変化を $\Delta\phi$ とし Fig. 5 に示す。これらのヨー、ピッチ角の変化によりハンドの位置が変化する。 $\Delta\psi$ によって生じる ΣM の座標の姿勢変化を同次変換行列 $\Delta\Psi$ を用いて表し、 $\Delta\phi$ による変化を同次変換行列 $\Delta\Phi$ で表す。 $\Delta\Psi$ と $\Delta\Phi$ によって生じる作業時の車載マニピュレータのハンドの位置 $^M T_B$ の変化した位置を $^M T_B$ とすると、 $^M T_B$ は次式で表せる。

$$^M T_B = \Delta\Psi \Delta\Phi ^M T_{B0} \quad (15)$$

Fig. 5 Changes of yaw angle $\Delta\psi$ around Mz axis and pitch angle $\Delta\phi$ around My axis

Fig. 6 Aerial view of experiment equipment

6. 基本ブロック組積実験

6.1 実験概要

提案した基本ブロック組積システムを用いてブロックを実際に組積し、その位置精度を検討する。本実験では、マンション等の部屋の間仕切りをブロックを用いて製作するための基本ブロック組積作業について考え、各作業を行う路面は水平であると仮定する。縦 40 [mm]、横 80 [mm]、幅 25 [mm] の木製のブロックを試作し実験に使用した。Fig. 6 に実験概要図を示す。(a) の位置に示した台はブロックを供給する台、(b) の位置に示した台はブロックを設置する台、移動マニピュレータに取り付けられた台はブロックを搬送するための台である。ランドマークは供給台と設置台に一つずつ配置した。各台上のブロックの番号は積載、設置する順番を表している。2 個目以降のブロックの位置は 1 個目に対し w_y 軸に沿って 90 [mm] ずつ移動させた位置とした。各台上でランドマークの位置とブロックの位置は目標値として与えるため既知である。5 章で述べたヨー、ピッチ角の変化は Fig. 6 に示したレーザポインタを用いて壁に照査されたポイントと、レーザポインタと壁の距離から算出した。基本ブロック組積実験の手順を以下に示す。

- (1) Fig. 6 に示す (a) 点において注視動作を行い、移動マニピュレータの位置の初期誤差として ΔT_M を認識した後、5 個のブロックを供給台から移動マニピュレータの搬送台に積載する。
- (2) 推測航法により (b) 点に移動し停止する。
- (3) 注視動作により走行誤差 ΔT_M が算出される。
- (4) 式 (7) より、目標設置位置 ${}^M T_{B0}$ を算出する。
- (5) 車載マニピュレータは形状 ${}^M T_{B0}$ を実現するように動作し、5 個のブロックを設置する。

Fig. 7 Image of landmark

6.2 ランドマークを用いた移動誤差認識

次に、具体的に ΔT_C を求める手法について述べる。実際位置姿勢関係においてハンドを鉛直下方に向けると Fig. 7 で実線で示す画像が得られる。図中の破線で示されるランドマークは基準位置姿勢関係のときに得られる画像である。移動マニピュレータの走行誤差を認識するためには Σ_W における x, y 方向および z 軸まわりの回転角のみが計測できればよく、これらが計測できるランドマークであれば他のランドマーク形状 [17] でも可能である。ランドマークの位置姿勢認識には、ランドマークの四つの端点を m_1 から m_4 に順番に認識し対角線の交点を算出し、 ${}^C x$ 軸からの角度 θ により姿勢を算出する。これらの算出された値により ${}^C T_{P0}$ が計算できる。 ${}^{C0} T_{P0}$ は既知であるから、カメラ画像から得られる ${}^C T_{P0}$ を用いて ΔT_C を算出する。その際、2.2 節で述べた注視動作を行う。しかし車載マニピュレータの絶対位置決め精度により、 ΔT_C^k が完全に単位行列 I となるまで繰り返し注視動作を行うことは困難である。そこで次式に示す条件を満足したとき注視動作を終了する。 $|\cdot|$ は絶対値、 ϵ_1, ϵ_2 は注視動作の終了条件を決定する定数である。

$$|x_0 - x| \leq \epsilon_1, |y_0 - y| \leq \epsilon_1, |\theta_0 - \theta| \leq \epsilon_2 \quad (16)$$

6.3 積載、設置誤差の評価法

移動マニピュレータに取り付けられた搬送台と Fig. 6 の (b) の位置に示した設置台の拡大図を Fig. 8 の (a), (b) に示す。各台上に図に示す線を引きブロックを置く位置を決める。1 から 5 の番号はブロックを置く順番を表している。図に示すブロックの底面の各辺の中点に印を付け、これらが台上の線と一致したときを誤差零とする。 ${}^M T_{MC}$ と ${}^M T_B$ の x, y 座標をそれぞれ ${}^M x_{MC}, {}^M y_{MC}$ と ${}^M x_B, {}^M y_B$ とする。また積載時の Σ_{MC} 上の ${}^{MC} x, {}^{MC} y$ 軸方向の、5 個のブロックの各目標位置に対する位置誤差を E_{MCx}, E_{MCy} とする。 E_{MCx}, E_{MCy} は ${}^M x_{MC}, {}^M y_{MC}$ と ${}^M x_B, {}^M y_B$ の差により次式で計算する。ここで、1~5 個のそれぞれのブロックに対する位置を明示するために右肩に添え字 l ($l = 1 \sim 5$) を付けて表す。

$$\begin{aligned} E_{MCx}^l &= {}^M x_{MC}^l - {}^M x_B^l \\ E_{MCy}^l &= {}^M y_{MC}^l - {}^M y_B^l \end{aligned} \quad (17)$$

次に、 ${}^W T_{B0}$ と ${}^W T_B$ の ${}^W x, {}^W y$ 座標をそれぞれ ${}^W x_{B0}, {}^W y_{B0}$ と ${}^W x_B, {}^W y_B$ とする。設置時の ${}^{B0} x, {}^{B0} y$

軸方向の位置誤差を E_{Bx}, E_{By} とする. E_{Bx}, E_{By} は, w_{xB0}, w_{yB0} と w_{xB}, w_{yB} の差により次式で計算する. ここで同様に, 右肩に添え字 l ($l = 1 \sim 5$) を付けてそれぞれのブロックの番号を明示する.

$$\begin{aligned} E_{Bx}^l &= w_{xB0}^l - w_{xB}^l \\ E_{By}^l &= w_{yB0}^l - w_{yB}^l \end{aligned} \quad (18)$$

また次節以降の実験において, Fig. 6 の (a) の位置に示したブロックを供給する台にブロックを置く場合にも, ブロックの位置誤差を E_{Bx}^l, E_{By}^l で表す. なお, 式 (17) (18) に示した位置誤差は定規を用いて 0.5 [mm] の分解能で測定した.

6.4 固定型マニピュレータによる積載・設置

予備実験を行った結果, 車載マニピュレータのハンドの絶対位置決め精度は絶対値 0.5 [mm] であった. また, 注視動作の終

了条件である式 (16) の ϵ_1, ϵ_2 は注視動作の収束時間を考え, $\epsilon_1 = 0.5$ [mm], $\epsilon_2 = 0.2$ [rad] とした. よって, 注視動作の終了条件により生じる誤差が 0.5 [mm], ハンドの絶対位置精度によりブロックを把持するときに 0.5 [mm] とブロックを置くときに 0.5 [mm] の計最大 1.5 [mm] の位置誤差が生じる. また注視動作の終了条件の $\epsilon_2 = 0.2$ [rad] により 2 個目から 5 個目まで x 軸方向にそれぞれ 0.3 [mm], 0.6 [mm], 0.9 [mm], 1.2 [mm] ずつ誤差が増大する.

5 章で述べたヨー, ピッチ角の変化の影響が生じないときの積載, 設置精度を検討するために (a) 点で移動ロボットを固定し, 実験を行った. まず, ブロックを供給台から搬送台に積載したときの目標位置との誤差により積載精度を調べ, 同じく (a) 点でブロックを搬送台から供給台に設置したときの目標位置との誤差により設置精度を調べる. 実験は 5 個のブロックを積載, 設置する作業をそれぞれ 1 回の試行とし各 20 試行, それぞれ計 100 個のブロックを積載, 設置した. 前節で述べたように, 供給台に置いたときの位置誤差を E_{Bx}^l, E_{By}^l で表す. Fig. 9 (a-1), (a-2) に積載誤差 E_{MCx}^l, E_{MCy}^l を示し, (b-1), (b-2) に設置誤差 E_{Bx}^l, E_{By}^l を示す. 各図において, x 軸は試行回数, y 軸はブロックの番号を示す. 図より誤差の絶対値は 1.5 [mm] 以内であり, 予備実験により得られた誤差範囲内であることが分かる.

6.5 移動マニピュレータによる積載・設置

次に, 移動ロボットを固定しない移動マニピュレータを用いて前節と同様の実験を行い, ヨー, ピッチ角の変化によるハンドの位置変化に伴う作業精度への影響を調べる. Fig. 10 (a-1), (a-2) に積載誤差 E_{MCx}^l, E_{MCy}^l を示し, Fig. 10 (b-1), (b-2)

Fig. 8 Line on both table for desired positions of blocks

(a-1) Carry on error E_{MCx}^l

(a-2) Carry on error E_{MCy}^l

(b-1) Pile up error E_{Bx}^l

(b-2) Pile up error E_{By}^l

Fig. 9 Relationships among carry on errors E_{MCx}^l, E_{MCy}^l , pile up errors E_{Bx}^l, E_{By}^l , trial number and number of block, when the floor-fixed manipulator operated.

Fig. 10 Relationships among carry on errors E_{MCx}^l, E_{MCy}^l , pile up errors E_{Bx}^l, E_{By}^l , trial number and number of block, when the mobile manipulator operated.

に設置誤差 E_{Bx}^l, E_{By}^l を示す。前節同様、 x 軸は試行回数、 y 軸はブロックの番号、 z 軸は積載、設置誤差を示す。Fig. 9 と比較すると Fig. 10 の方が Fig. 10 (a-1) を除いて誤差が増大していることが分かる。Fig. 10 (a-1) において x 軸方向の積載誤差が Fig. 9 (a-1) と同等であるのは、ハンドが接触センサ等を有さず空気圧による一定幅の開閉を行い、かつブロックの重量に対してハンドの開閉力が大きいため移動ロボットのヨー、ピッチ角の変化によらずハンドの位置にブロックの位置が矯正され、車載マニピュレータが持つハンドの絶対位置決め精度に積載位置誤差が依存するためである。それに対し、Fig. 10 (b-1) の x 軸方向の設置誤差が Fig. 9 (b-1) の誤差より大きくなっているのは、設置作業を行うときはハンドの位置が 5 章で示した移動マニピュレータのヨー、ピッチ角の影響を受けるためである。

6.6 ヨー、ピッチ角の変化と積載、設置精度の相関関係

前節で示した積載、設置誤差と、移動ロボットのヨー角 $\Delta\psi$ 、ピッチ角 $\Delta\phi$ の相関関係を調べるために、Fig. 10 に示した結果を計測した $\Delta\psi, \Delta\phi$ と共に Fig. 11, Fig. 12 に示す。各図において、(a-1), (a-2) は x 軸方向の誤差 E_{MCx}^l 、(b-1), (b-2) は y 軸方向の誤差 E_{MCy}^l を表している。(a-2), (b-2) はそれぞれ (a-1), (b-1) の図を視点を変えて見た図である。ここで、データの存在しない点および誤差が零の点は共に各図の誤差軸において零位置にプロットした。積載誤差を示した Fig. 11 (a-1), (a-2) においてヨー・ピッチ角と誤差の間に相関関係が見られないのは、前述のハンドの開閉によりブロックの位置

が矯正されてしまうためである。それに対し、Fig. 11 (b-1) よりヨー角が零に近づき、ピッチ角が負方向に増大するに従い誤差が正方向に増大していることが分かる。また、(b-2) よりヨー角が減少し、ピッチ角が負方向に増大するに従い誤差が負方向に増大していることが分かる。Fig. 12 (a-1) よりヨー角とピッチ角が共に負方向に増大すると設置誤差が正方向に増大し、(a-2) よりヨー角が負方向に増大しピッチ角が減少すると誤差が負方向に増大していることが分かる。Fig. 12 の y 軸方向の設置誤差については Fig. 11 の y 軸方向の設置誤差と同様の傾向が見られる。Fig. 11, 12 より、移動マニピュレータのヨー、ピッチ角の変化と積載、設置精度の間に相関関係があることが分かった。

6.7 ヨー、ピッチ角の変化の影響を取り除いたときの積載、設置精度の検討

次に、5 章の式 (15) を用いてヨー、ピッチ角の変化によるハンドの目標位置に対する位置変化 ${}^M T_B$ を算出し、積載、設置誤差から除算することによりヨー、ピッチ角の変化の積載、設置精度への影響を取り除く。ただし、積載時の x 軸方向の誤差 E_{MCx}^l についてはハンドの開閉によりブロック位置が矯正されているためヨー、ピッチ角の影響を取り除いた誤差を評価することができないため図示しない。除算した後の $E_{MCy}^l, E_{Bx}^l, E_{By}^l$ をそれぞれ $\bar{E}_{MCy}^l, \bar{E}_{Bx}^l, \bar{E}_{By}^l$ と表し、Fig. 13, 14 に示す。Fig. 13, Fig. 14 の設置誤差は、Fig. 9 に示した設置誤差と同様、絶対値 1.5 [mm] 以内に収まっていることが分かる。よって、Fig. 10, Fig. 11 で表された設置誤差

Fig. 11 Relationships among carry on errors $E_{MCx}^l, E_{MCy}^l, \Delta\psi$ and $\Delta\phi$, when the mobile manipulator operated.

Fig. 12 Relationships among pile up errors $E_{MCx}^l, E_{MCy}^l, \Delta\psi$ and $\Delta\phi$, when the mobile manipulator operated.

Fig. 13 Relationships among processed carry on errors E_{MCx}^l after removing influences of change of yaw and pitch angle, $\Delta\psi$ and $\Delta\phi$

(a) E_{Bx}^l

(b) E_{By}^l

Fig. 14 Relationships among processed pile up errors E_{Bx}^l, E_{By}^l after removing influences of change of yaw and pitch angle, $\Delta\psi$ and $\Delta\phi$

の増大は移動ロボットのヨー、ピッチ角の変化により生じたものであるといえる。

6.8 一連の作業精度

次に、6.1 節の (1)~(5) に示した一連の基本ブロック組積実験を行った後の設置精度を検討する。Fig. 15 に実験結果を示す。x 軸は試行回数, y 軸はブロックの番号, (a) の z 軸は E_{MCx} , (b) の z 軸は E_{MCy} を表す。図より約 5 [mm] 程度の誤差でブロックを設置することができることが分かる。(a) において x 軸方向の誤差が 1 個目から 5 個目になるに従い誤差が増加しているのは、前節で述べたように積載時にはブロックの位置はハンドの開閉によってハンドの位置に矯正され、搬送台上には車載マニピュレータのハンドの位置決め精度により

(a) E_{Bx}^l

(b) E_{By}^l

Fig. 15 Relationships among errors E_{Bx}^l, E_{By}^l , trial number and number of block, when the mobile manipulator carried on, conveyed and piled up.

(a) E_{Bx}^l

(b) E_{By}^l

Fig. 16 Relationships among processed errors E_{Bx}^l, E_{By}^l after removing influences of change of yaw and pitch angle, trial number and number of block, when the mobile manipulator carried on, conveyed and piled up.

0.5 [mm] 以下の精度で積載される。そのため設置台上で計測される設置誤差は設置作業時の移動ロボットのヨー角、ピッチ角の変化に依存する。よって Fig. 10 (a-1), (a-2) と同様の傾向

が現れる。一方 y 軸方向については、ブロックは積載時の誤差を有したまま (c) 点に搬送され、設置時にも誤差を生じる。つまり、積載時と設置時の移動ロボットのヨー角、ピッチ角の影響が干渉しあうため、(b) に示す y 軸方向の作業誤差にはブロックの番号に対する誤差の傾向は見られない。

次に前節同様、5章の式 (15) を用いて積載時と設置時の移動ロボットのヨー角、ピッチ角の影響を取り除いた E_{Bx}^I, E_{By}^I を Fig. 16 に示す。Fig. 13, Fig. 14 に示した結果同様の誤差に収まっていることが分かる。

7. あ と が き

本論文では、

- (1) 走行誤差をハンドアイカメラとランドマークおよび注視動作を用いて認識するシステムを有する移動マニピュレータを用いた建設システムを提案した。
- (2) 建設作業の一例として基本ブロック組積作業について、実機を用いてブロックの積載、搬送、設置実験を行い、設置されたブロックの位置誤差を定量的に示した。
- (3) 移動マニピュレータのヨー角とピッチ角の変化が積載、設置精度に影響を及ぼすことを示し、その影響によるブロックの積載、設置誤差を定量的に示した。

参 考 文 献

- [1] 福田, 新井: “マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎研究 (第3報)”, 日本機械学会論文集 C, vol.58, no.551, pp.2152-2158, 1992.
- [2] Y. Yamamoto and X. Yun: “Modeling and Compensation of the Dynamic Interaction of a Mobile Manipulator,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2187-2192, 1994.
- [3] 栗栖, 吉川: “移動マニピュレータの軌道計画と動的制御”, 日本機械学会論文集 C, vol.62, no.596, pp.1488-1494, 1996.
- [4] 見浪, 藤原, 拓殖: “カメラフィールドバックを用いた自律移動マニピュレータの位置・速度制御”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.2, pp.263-271, 1993.
- [5] 見浪, 富川, 藤原, 西山: “ころがり抵抗を考慮した斜面を走行する移動マニピュレータの重力補償”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.2, pp.262-271, 1994.
- [6] 遠藤: “石積ロボットによる積ブロック工法”, 東急建設技術研究所報, vol.10, no.19, pp.173-178, 1993.
- [7] 鷹巣, 佐藤, 遠藤, 柳原: “建設作業用マニピュレータの遠隔臨場制御について”, 第4回建設ロボットシンポジウム, vol.7, pp.57-64, 1994.
- [8] 中村: “非ホロノミックロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.521-528, 1993.
- [9] 見浪, 朝倉, 藤原, 神原: “PWS 型移動マニピュレータの逆動力学補償法の提案”, 日本機械学会論文集 C, vol.61, no.591, pp.229-236, 1995.
- [10] 見浪, 簾, 上田, 中野: “同次変換を用いた自律型移動ロボットの任意曲線コース誘導方法”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.4, pp.421-430, 1990.
- [11] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi: “A stable tracking control method for an autonomous mobile Robot,” Proc. Int. Conf. on Rob. and Autom., pp.384-389, 1990.
- [12] 見浪, 富川, 簾: “磁石補償式自律誘導方法”, システムと制御, vol.31, no.5, pp.382-391, 1987.
- [13] 簾他: “移動ロボットの自律誘導の一方法”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.3, pp.222-231, 1984.
- [14] 八木他: “生体の注視機構を応用したアクティブビジョンシステム”, 日本機械学会論文集 C, vol.61, no.591, pp.4402-4409, 1995.
- [15] 久米, 高岡, 山田, 塚本, 金出: “ニューラルネットワークによる歪み補正に基づくカメラ校正法”, 日本機械学会論文集 C, vol.61, no.591, pp.4436-4442, 1995.
- [16] N.M. Hootsmans and S.Dubowsky: “Large Motion Control of Mobile Manipulators Including Vehicle Suspension Characteristics,” Proc. of the 1991 IEEE International conf. on Robotics and Automation, pp.2336-2341, 1991.
- [17] 福田他: “自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム (天井のランドマーク認識による自律移動ロボットのナビゲーションと位置補正実験)”, 日本機械学会論文集 C, vol.60, no.573, pp.1743-1752, 1994.

見浪 護 (Mamoru Minami)

1956年4月25日生。1981年大阪府立大学航空工学科修士課程修了。同年(株)椿本チエイン入社。1993年金沢大学大学院自然科学研究科修了。博士(工学)。1994年福井大学工学部助教授、現在に至る。移動マニピュレータの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

朝倉俊行 (Toshiyuki Asakura)

1939年10月10日生。1964年3月京都工芸繊維大学卒業。同年4月京都工芸繊維大学工学部生産機械工学科助手。1982年福井大学工学部機械工学科講師。助教授を経て、1991年福井大学教授(機械工学科)となり現在に至る。工学博士(京都大学)。

制御システムの解析と設計、計測工学の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会および米国 IEEE の会員。

羽多野正俊 (Masatoshi Hatano)

1971年1月11日生。1993年3月福井大学工学部機械工学科卒業。1995年3月同大学大学院博士前期課程機械工学専攻修了。1998年3月同大学大学院博士後期課程システム設計工学専攻修了。博士(工学)。1998年4月同大学大学院研究生、1998年8月より富山大学工学部(機械知能システム工学

科)助手、現在に至る。移動マニピュレータの研究に従事。日本機械学会、IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)