カメラフィードバックを用いた 自律移動マニピュレータの位置・速度制御

見 浪 護* 藤 原 直 史** 柘 植 広 志***

Position-Velocity Control of Autonomous Mobile Manipulator with Camera Feedback

Mamoru MINAMI Naofumi FUJIWARA Hiroshi TSUGE

It is more effective if a manipulator being set on a mobile robot can operate to load or unload while the mobile robot is moving. This paper presents the control method for the moving operations of an autonomous mobile manipulator (AMM). The AMM moving in the horizontal plane produces position errors in the plane and rotation error around the vertical axis, but does not produce the errors concerning with the other directions. Using this relation, we present a hybrid control system which consists of a camera feedback system and a kinematical one. We designed a control system for the AMM by introducing switching matrix to avoid the interactions of the two control systems. The experimental results using our AMM which consists of a power wheeled steering mobile robot and a PUMA-type manipulator show basic data of the control system.

Key Words : Autonomous, Mobile robot, Manipulator, CCD camera, Vision

1. ま え が き

ロボット技術の発展は生産の効率を上げるための自動化・無人化にとどまらず、人間にとって危険な作業の代替という面でも社会に貢献している。半導体の生産工場では人間が工場内のクリーンな環境にはいることが、空気の清浄度を劣化させ、結果として、歩留まりを下げ生産効率を下げる原因になっている。このような環境下で作業するロボットは人間の行う作業のすべてを行うことが望まれ、移動ロボットにマニピュレータを搭載したシステムが用いられている。移動ロボットにマニピュレータを搭載することは、搬送装置としてこれを用いる場合に、載脱荷作業をするための地上側設備を減らす上でも役立っている。

しかしながら現状の使用方法は、移動動作と搭載されたマニピュレータの動作とを同時に行うことはないよう

である。移動中にマニピュレータによる作業ができれば、より効率的である。走行しつつ作業することは時間的な効率を上げるうえでも、停止及び発進に費やされるエネルギーを省くうえでもメリットがある。

移動ロボットとマニピュレータの研究を結び付けようとする試みはまだ余り多くないが、その中でも、移動ロボットの運動学について同次変換行列を用いて表し、マニピュレータと同様に取り扱うことを試みた研究¹⁻³⁾、多様な形態の移動ロボットを平面リンク機構として表現し、さらに車輪の摩擦を含めた動力学についても議論した研究がある⁴⁾。

移動ロボットは非ホロノミックな拘束のもとに運動すること、絶対精度が悪いこと、応答速度が遅いことなどマニピュレータとは異なる多くの問題点を持っている。このため移動ロボットの誘導に関して多くの研究がなされているが、目標コース上を安定して誘導できることを証明したものはなかった。しかし、最近になり以下の三つの仮定のもとに提案された誘導制御系の安定性が示された^{5),6)}、(1) 移動ロボットのダイナミクスを無視すること、(2) 移動ロボットの目標速度・目標角速度は微

原稿受付 1992 年 5 月 15 日

* (株)椿本チエイン

** 金沢大学

*** (株)豊田自動織機製作所

分可能であること、(3) 移動ロボットの目標加速度・角加速度は有界であること、である。実際の移動ロボットは一般的に重くマニピュレータに較べて減速比が小さいので、(1)の仮定は成り立たない。また、直線や円弧の組み合わせで与えられた目標コース上を停止しないで走行させる場合には、(2)、(3)の仮定も成り立たない。従って実際の移動ロボットは目標コース上を正確に走行していないと考えられる。このため自律移動マニピュレータの制御に関し、移動ロボットが自律型かそうでないかにかかわらず、目標コース上を走行していることを前提にして車載マニピュレータのハンドの位置・姿勢制御を行うことはできず、移動ロボットの位置・速度などをフィードバックした制御系を構成すべきである。このような状況の中で、本報ではまず、作業座標系(Σ_w)で表されたハンドの目標位置・姿勢軌道とその微分を移動ロボットに固定した移動座標系での記述に変換することにより、移動ロボットの位置・速度などを車載マニピュレータの制御系にフィードバックする方法について考える。

次に自律型移動ロボットの特徴として、その位置・姿勢の推定精度が悪く、定期的な補正を行う必要があることがあげられる⁷⁻¹¹⁾。推定誤差は車載マニピュレータのハンドの位置・姿勢誤差として現れ、ハンドの作業を害する。この問題に対する解決方法としては、ハンド部にカメラを取り付け、作業対象物を写した画像情報よりハンド部の偏差を検出し、車載マニピュレータの制御系にフィードバックする方法が考えられる。水平面内を走行する自律型移動ロボットでは、水平面内の位置推定誤差と鉛直軸回りの姿勢推定誤差は発生しやすいが、他の方向の誤差は発生しにくい。従ってそのハンド部にカメラセンサーを取り付ければ、 Σ_w の x, y 軸回りの姿勢偏差と z 軸方向の位置偏差が少ないことにより、カメラは鉛直下方を向く。このため、カメラより得られる2次元画像情報よりハンドの水平面内の位置誤差と鉛直軸回りの姿勢誤差が正確に測定できることになる。このような自律型移動マニピュレータの特徴を考慮して、 Σ_w の $x-y$ 平面内の位置誤差と z 軸回りの姿勢誤差をカメラフィードバックにより補償し、その他の方向を運動学計算により行うハイブリッド型の制御方法を提案する。

PUMA型マニピュレータを2軸独立駆動型マニピュレータに搭載した実験システムを構成し、提案した制御系の基本的特性を確認したので報告する。

2. マニピュレータの位置・姿勢制御

2.1 マニピュレータの運動学

作業座標系 Σ_w の $x-y$ 平面(水平面と一致している)

内を2軸独立駆動型式の移動ロボットが走行している状態を考える。移動ロボットを代表するビークル座標系 Σ_v の原点を左右駆動輪の中点に、 x 軸を右車輪方向に、 y 軸を進行方向に定め、移動ロボットに固定する。また、車載マニピュレータのハンドにはハンド座標系 Σ_H を設定する。 Σ_v を基準にした Σ_H の位置・姿勢ベクトル v_{rH} を、位置ベクトル v_{rHP} 、姿勢ベクトル v_{rHO} を用いて $v_{rH}=[v_{rHP}^T, v_{rHO}^T]^T$ と表わす。左上の添え字は基準とする座標系を表し、右下の添え字は対象としている座標系か又は変数の意味の補助として用いる。 v_{rH} を実現する関節角を q と表す。6自由度を持つマニピュレータを想定し、特異姿勢でないことを仮定すると、 v_{rH} と q の間には、

$$v_{rH}=h(q) \quad (1)$$

$$q=h^{-1}(v_{rH}) \quad (2)$$

という関係がある。(1)式を時間で微分すると $\dot{v}_{rH}$ と $\dot{q}$ の関係は、

$$\dot{v}_{rH}=J_H(q)\dot{q} \quad (3)$$

$$J_H(q)=(J_{ij}), \quad J_{ij}=\frac{\partial h_i(q)}{\partial q_j} \quad (4)$$

$$i, j=1, 2, \dots, 6$$

と表される。各座標系と位置・姿勢ベクトルの関係をFig. 1に示す。

2.2 移動ロボットの運動学

移動ロボットは自らの位置・姿勢を左右駆動輪の走行速度を測定することで算出し走行する自律型であることを想定する。 Σ_w を基準にした各軸方向の速度 $\dot{X}_v, \dot{Y}_v$ と旋回角速度 $\dot{\theta}_v$ をまとめて $w_{rV}=[\dot{X}_v, \dot{Y}_v, 0, 0, 0, \dot{\theta}_v]^T=[w_{rVP}^T, w_{rVO}^T]^T$ と表し、左右駆動輪の進行速度を $v=[v_L, v_R]^T$ と表し、移動ロボットは二輪独立駆動型を想定しているため、 w_{rV} は、

$$w_{rV}=w_{J_V}(\theta_v)v \quad (5)$$

ただし、

Fig. 1 Mobile manipulator

$${}^w J_V(\theta_V) = \begin{bmatrix} -(\sin\theta_V)/2 & -(\sin\theta_V)/2 \\ (\cos\theta_V)/2 & (\cos\theta_V)/2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/T & 1/T \end{bmatrix} \quad (6)$$

と表される。\$T\$ はトレッドである。ここで \$\Sigma_W\$ の \$z\$ 軸 \$w_z\$ と \$\Sigma_V\$ の \$z\$ 軸 \$v_z\$ が一致していることに注意し、\$\theta_V\$ は \$\Sigma_W\$ の \$y\$ 軸方向 \$w_y\$ を \$w_z\$ 軸回りに回転させて \$v_y\$ と一致させる角度と定義する。またその符号は \$w_z\$ 軸について反時計回りの回転を正としている。

時刻 \$t\$ における移動ロボットの位置・姿勢 \$w_{r_V}(t)\$ は、\$w_{r_V}(0)\$ を初期値として、(5)式の両辺を積分することにより、

$$w_{r_V}(t) = w_{r_V}(0) + \int_0^t w_{r_V}(\theta_V) v du \quad (7)$$

と表される。(5)式は車輪式移動ロボットの非ホロノミックな拘束条件であり、解析的に積分して幾何学的な拘束にすることはできない。従って、以下に述べる近似を行い、積分する。制御周期 \$\tau\$ を微小時間とし時刻 \$(i-1)\tau\$ より \$\tau\$ 秒間 \$v_R, v_L\$ をサンプルホールドした値を \$v_R^i, v_L^i\$ と表し、これらを用いて、時刻 \$i\tau\$ における移動ロボットの位置・姿勢 \$w_{r_V}^i\$ の推定値 \$w_{\hat{r}_V}^i\$ は、

$$w_{\hat{r}_V}^i = w_{r_V}^{i-1} + \Delta \hat{r}^i \quad (8)$$

$$\Delta \hat{r}^i = \begin{bmatrix} -v^i \tau \sin(\theta_V^{i-1} + \Delta \theta_V^i/2) \\ v^i \tau \cos(\theta_V^{i-1} + \Delta \theta_V^i/2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta \theta_V^i \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$v^i = (v_R^i + v_L^i)/2, \quad \Delta \theta_V^i = (v_R^i - v_L^i)\tau/T \quad (10)$$

と近似的に求められる^{9),12)}。ここで、(8)式には(9)式の近似誤差、路面の凹凸による誤差、車輪のスリップによる誤差等が累積されており、これを明示する意味で変数に \$\wedge\$ を付記した。しかし以下では簡単のため(8)式で得られた推定値を \$w_{r_V}^i\$ と表す。この推定方法は何らかの補正手段を用いて、誤差が許容範囲を越えないように注意する必要がある、その補正方法は種々提案されている^{7~11)}。また、添え字 \$i\$ は以後の議論では意味を持たないので省略することにする。

3. 移動ロボットの目標軌道

移動ロボットの走行を考慮して車載ロボットのハンドの位置・姿勢を制御する方法について考える。\$\Sigma_W\$ で表された目標軌道 \$w_{r_{Hd}} = [w_{r_{HPd}}^T, w_{r_{Hod}}^T]^T\$ とその微分 \$w_{\dot{r}_{Hd}}\$ が与えられている場合を考え、\$w_{r_{HPd}}\$ と \$w_{r_{Hod}}\$ をそれぞれ目標位置・姿勢軌道と呼ぶことにする。移動ロボットに固定された座標系 \$\Sigma_V\$ で表されたハ

ンドの目標位置軌道 \$v_{r_{HPd}}\$ は、\$\Sigma_W\$ より \$\Sigma_V\$ への姿勢変換行列を \$w_{R_V}\$ とすると、次式を満たさなければならない。

$$w_{r_{HPd}} = w_{r_{VP}} + w_{R_V} v_{r_{HPd}} \quad (11)$$

移動ロボットの走行に伴い変化する \$w_{R_V}, w_{r_{VP}}\$ に応じて \$v_{r_{HPd}}\$ が上式を満たしつつ変化すれば、目標位置軌道 \$w_{r_{HPd}}\$ は実現される。これを微分すると、

$$w_{\dot{r}_{HPd}} = w_{\dot{r}_{VP}} + w_{\dot{R}_V} v_{r_{HPd}} + w_{R_V} v_{\dot{r}_{HPd}} \quad (12)$$

が得られる。ここで \$w_{\dot{R}_V}\$ と \$w_{\dot{r}_{V0}}\$ は、\$w_{\dot{R}_V} = w_{\dot{r}_{V0}} \times w_{R_V}\$ と関係づけられる。ただし \$\times\$ は外積を表す。走行している移動ロボットが、\$w_{r_{HPd}}, w_{\dot{r}_{HPd}}\$ を実現するためには \$v_{r_{HPd}}, v_{\dot{r}_{HPd}}\$ は、(11), (12)式より

$$v_{r_{HPd}} = w_{R_V}^{-1}(w_{r_{HPd}} - w_{r_{VP}}) \quad (13)$$

$$v_{\dot{r}_{HPd}} = w_{R_V}^{-1}(w_{\dot{r}_{HPd}} - w_{\dot{R}_V} v_{r_{HPd}} - w_{\dot{r}_{VP}}) \quad (14)$$

を満たす必要があることがわかる。以上で \$\Sigma_W\$ で表されたハンドの目標位置軌道 \$w_{r_{HPd}}\$ とその微分 \$w_{\dot{r}_{HPd}}\$ が移動する座標系 \$\Sigma_V\$ を基準にしたものに变换された。

次に目標姿勢軌道 \$w_{r_{Hod}}\$ とその微分 \$w_{\dot{r}_{Hod}}\$ を変換する。ハンドの姿勢を表わす \$3 \times 3\$ 行列 \$R\$ は、姿勢 \$r_0\$ の定義に従って定まる関数 \$f\$ により \$R = f(r_0)\$ と表わされる。\$\Sigma_W\$ で表されたハンドの姿勢 \$w_{R_H}\$ が \$w_{R_H} = w_{R_V} v_{R_H}\$ であることを考えると、\$\Sigma_V\$ で表されたハンドの目標姿勢軌道は、

$$v_{r_{Hod}} = f^{-1}(w_{R_V}^{-1} f(w_{r_{Hod}})) \quad (15)$$

と求められる。\$w_{\dot{r}_{Hod}}\$ と \$v_{\dot{r}_{Hod}}\$ の間には、\$w_{T_H} w_{\dot{r}_{Hod}} = w_{\dot{r}_{V0}} + w_{R_V} v_{T_H} v_{\dot{r}_{Hod}}\$ という関係がある。これより、

$$v_{\dot{r}_{Hod}} = (w_{R_V} v_{T_H})^{-1}(w_{T_H} w_{\dot{r}_{Hod}} - w_{\dot{r}_{V0}}) \quad (16)$$

と変換される。ここで \$v_{T_H}\$ は \$v_{\dot{r}_{Hod}}\$ を \$\Sigma_V\$ の各軸回りの角速度ベクトルに変換する \$3 \times 3\$ 行列であり、\$w_{T_H}\$ は \$w_{\dot{r}_{Hod}}\$ を \$\Sigma_W\$ で表わされた角速度に変換する行列である。

以上で \$\Sigma_V\$ で表されたハンドの目標位置・姿勢軌道 \$v_{r_{Hd}} = [v_{r_{HPd}}^T, v_{r_{Hod}}^T]^T\$ とその微分 \$v_{\dot{r}_{Hd}} = [v_{\dot{r}_{HPd}}^T, v_{\dot{r}_{Hod}}^T]^T\$ が求められた。

4. 移動ロボットの制御則

前節にて求めた \$v_{r_{Hd}}, v_{\dot{r}_{Hd}}\$ を実現する関節角 \$q_d\$ と関節角速度 \$\dot{q}_d\$ は、(2), (3)式を用いて

$$q_d = h^{-1}(v_{r_{Hd}}) \quad (17)$$

$$\dot{q}_d = {}^V J_H^{-1}(q) v_{\dot{r}_{Hd}} \quad (18)$$

と定まる。これらをもとに、次節で述べるサーボ系へ与える速度指示電圧を次式で求める。

$$V = K_1(q_d - q) + K_2 \dot{q}_d \quad (19)$$

ここで \$q\$ は実測された関節角である。右辺第2項は、(14), (16), (18)式より目標軌道の微分であるフィードフォワードと移動ロボットの走行速度のフィードバックを

Fig. 2 Control block diagram of position and velocity

含んでいる。この制御系のブロック線図を Fig. 2 に示す。

5. 実 験

5.1 ハードウェア構成

Fig. 3 に、実験に使用した PUMA 型マニピュレータのリンク構成と、設定したリンク座標系及び Σ_v, Σ_w

Fig. 3 Manipulator and link frames

Fig. 4 Experiment system

Fig. 5 Block diagram of the experiment system

Fig. 6 Photograph of the autonomous mobile manipulator

Table 1 Specifications of the mobile robot

Dimensions	550W×1140L×702H[mm]
Weight	173[kgf]
Payload	100[kgf]
Max. Speed	40[m/min]
Motor	DC Servo Motor 90[W]×2
Reduction Ratio	1/52
Wheel Diameter	237[mm]
Tread	470[mm]

を示す。また、Fig. 4 に全体の構成図を、Fig. 5 にコントローラを含めた実験システムの構成図を示す。CPU は 80386 であり、制御周期は 35 ms である。Fig. 6 に実験システムの写真を、Table 1 に移動ロボットの仕様を示した。マニピュレータの関節及び移動ロボットの左右車輪にはパルスカウンタが装着され、関節角・回転角が測定される。(19) 式にて算出された指示電圧は D/A コンバータを介してサーボアンプに出力され、すべての回転軸は DC モータにより駆動される。搭載したマニピュレータは、川崎重工業(株)製 PH 560 である。重量は 95 kgf、脚をのばした基本姿勢での全高は 1686 mm であり、移動ロボットに搭載したときの床から手先までの高さは 2110 mm である。

5.2 位置・姿勢偏差の算出

ここで次節の実験において使用する Σ_W に対するハンドの位置・姿勢偏差の算出方法を示しておく。 Σ_W とハンド座標系 Σ_H の関係を表す同次変換行列を ${}^W H_H$ 、目標位置・姿勢を ${}^W H_{Hd}$ とし、それらの列ベクトルを

$${}^W H_H = \begin{bmatrix} {}^W n & {}^W o & {}^W a & {}^W r_{HP} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$${}^W H_{Hd} = \begin{bmatrix} {}^W n_d & {}^W o_d & {}^W a_d & {}^W r_{HPd} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

と定義すると、位置・姿勢偏差 ${}^W e$ は

$$\begin{aligned} {}^W e &= \begin{bmatrix} {}^W e_P \\ {}^W e_O \end{bmatrix} = [e_{PX} \ e_{PY} \ e_{PZ} \ e_{OX} \ e_{OY} \ e_{OZ}]^T \\ &= \begin{bmatrix} {}^W r_{HPd} - {}^W r_{HP} \\ ({}^W n_d \times {}^W n + {}^W o_d \times {}^W o + {}^W a_d \times {}^W a)/2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

と求められる¹³⁾。

5.3 位置・姿勢制御実験

3.4 章で述べた制御系が正しく動作することを確認するために以下の実験を考える。まず、移動ロボットが走行中に、Fig. 3 に示す Σ_W の原点にハンドの位置・姿勢を静止させる実験を行った。Fig. 7(a) に初期位置・姿勢と走行方向を示す。時刻 0 s に移動ロボットに対して Σ_W の y 軸方向にステップ速度入力を与え (40 mm/s, 80 mm/s)、一定速度で直線走行させた後、時刻 4 s に再び停止させた、この間ハンドの位置・姿勢を維持するように制御を行いその結果を (22) 式により観測する。

各関節の比例制御のみの場合について調べるため、 $K_1 = \text{diag}(10, 10, 10, 10, 10, 10)$ [Volt/rad]、 $K_2 = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0)$ [Volt/(rad/s)] と設定した。ゲイン K_1 は次のような予備実験を行って決定した。 K_1 を増加させてゆくと、10 [Volt/rad] を越えた時点でマニピュレータの第一軸が不安定になった。このため全軸について安定な範囲で制御実験を行うため、10 [Volt/rad] と定めた。また、マニピュレータの関節はすべて

Fig. 7(a) Manipulator during straight traveling

Fig. 7(b) Position and orientation errors (without velocity feedback)

Fig. 7(c) Position and orientation errors (with velocity feedback)

1 Volt の電圧に対し 0.5 rad/s で回転するように調節されている。実験結果を Fig. 7(b) に示す。 e_{PY} に定常偏差が移動ロボットの走行速度に比例している。 e_{PY} のみに偏差があるのは、移動ロボットの走行方向が Σ_W の y 軸方向と一致していたからである。

次に他の条件はそのまま $K_2 = \text{diag}(2, 2, 2, 2, 2, 2)$ と設定し速度フィードバックを付加した。結果を Fig. 7(c) に示す。少し振動的であるが定常偏差は減少している。

以上の実験を移動ロボットがスピントーン走行 (0.9 rad/s, 1.8 rad/s) をする場合について繰り返した。初期位置・姿勢とスピンの方向を Fig. 8(a) に、結果を Fig. 8(b), (c) に示す。スピントーンにより e_{PY} と e_{OZ} に

Fig. 8(a) Manipulator during spin traveling

Fig. 8(b) Position and orientation errors (without velocity feedback)

Fig. 8(c) Position and orientation errors (with velocity feedback)

定常偏差が発生し、移動ロボットの旋回各速度のフィードバックを施すことにより減少している。以上の実験により移動ロボットとマニピュレータの間及びマニピュレータのリンク間の動力学的干渉や非線形性が、本報の実験条件においては少なく、本手法の有効性が確認できた。

6. 車載マニピュレータによる移動ロボットの位置・姿勢推定誤差の補償

6.1 移動ロボットの位置・姿勢推定誤差の影響

マニピュレータの制御式(19)式中の $q_d, \dot{q}_d$ は、(13)、(14)式及び(15)、(16)式より得られた ${}^v r_{Ha}, {}^v \dot{r}_{Ha}$ を用い、(17)、(18)式により算出されたものであり、誤差を含んだ移動ロボットの位置・姿勢 ${}^w r_{Vp}, {}^w R_V$ をもとに算出されている。従って(22)式は Σ_w 上の偏差を正

Fig. 9 Relation of work frame and hand frame

確に算出することはできなく、(8)式により累積された誤差に応じたハンドの誤差が残る。移動走行中の載脱荷作業において、この誤差に起因するハンドの位置・姿勢誤差以外は前章にて補償できることが確認されているので、以下に推測演算誤差を車載マニピュレータで取り除くことを考える。この誤差をマニピュレータで補償するためには、 Σ_w で表されたハンドの位置・姿勢誤差を測定する必要がある。また移動ロボットの動きは既知でないため、そのフィードバックはリアルタイム制御系に組み込まなければならない。

6.2 カメラフィードバック制御系と位置・姿勢制御系の協調

Σ_w に対するハンドの位置・姿勢誤差 ${}^w \delta x$ は、 Σ_w に対する位置・姿勢が明かな作業対象物を、ハンドに取り付けられたカメラで観測することで検出される。Fig. 9 は作業対象物が Σ_w の原点に置かれている時に、 Σ_w の x, y 軸の方向に位置偏差が発生している様子を示す。 ${}^w \delta x$ に比例した力またはトルクをハンド部に発生させる関節トルクを求めこれをフィードバックすることで ${}^w \delta x$ をなくす制御系は既に提案され、重力補償とダンピングを付加することでその安定性も示されている¹⁵⁾。しかし、現実的には ${}^w \delta x$ のすべての要素を観測できるセンサーはなく、また逆に Σ_w のすべての座標軸についての位置・姿勢偏差をフィードバックする必要がない場合もある。本報で考えている移動マニピュレータでは移動ロボットの移動は水平面に限られること、路面の凹凸・リンクや減速機のためを無視できること、重力による影響は既に補償されていることを仮定すれば水平面内の位置誤差と鉛直軸回りの姿勢誤差は発生しやすいが、その他の方向の誤差は発生しにくい。従ってそのハンド部にカメラセンサーを取り付ければ、 Σ_w の x, y 軸回りの姿勢偏差と z 軸方向の位置偏差が少ないことによりカメラセンサーは鉛直下方を向く。このためカメラからの2次元画像情報よりハンドの水平面内の位置誤差と

Fig. 10(a) Block diagram of compensation control of estimated errors

Fig. 10(b) Simplified and arranged control system

鉛直軸回りの姿勢誤差が正確に測定できることになる。以上の関係を利用し以下に述べる移動マニピュレータの制御系を提案する。

作業座標系で表されたハンドの位置・姿勢の中でカメラフィードバックにより制御する方向と、運動学計算により制御する方向を分けるために新たな目標位置・姿勢 ${}^w\tilde{\mathbf{r}}_{Hd}$ を ${}^w\mathbf{r}_{Hd}$ と ${}^w\mathbf{r}_H$ を用いて、

$${}^w\tilde{\mathbf{r}}_{Hd} = \begin{bmatrix} {}^w\tilde{\mathbf{r}}_{HPd} \\ {}^w\tilde{\mathbf{r}}_{Hod} \end{bmatrix} = (\mathbf{I} - \mathbf{S}){}^w\mathbf{r}_{Hd} + \mathbf{S}{}^w\mathbf{r}_H \quad (23)$$

と定める。 $\mathbf{I}$ は単位行列であり、 $\mathbf{S}$ はカメラフィードバックによる制御を行う $\sum w$ の方向に対応する対角要素を1としその他をすべて0とするスイッチング行列である。(23)式はカメラフィードバックで制御する方向には、ハンドの現在の位置・姿勢をそのまま目標値として与えることを意味している。これと(13)式より、 $\sum v$ で表された新たな目標値は、

$${}^v\tilde{\mathbf{r}}_{HPd} = {}^w\mathbf{R}_V^{-1}({}^w\tilde{\mathbf{r}}_{HPd} - {}^w\mathbf{r}_{VP}) \quad (24)$$

及び、(15)式より、

$${}^v\tilde{\mathbf{r}}_{Hod} = \mathbf{f}^{-1}({}^w\mathbf{R}_V \mathbf{f}({}^w\tilde{\mathbf{r}}_{Hod})) \quad (25)$$

と求められる。以上により ${}^w\tilde{\mathbf{r}}_{Hd}$ は ${}^v\tilde{\mathbf{r}}_{Hd} = [{}^v\tilde{\mathbf{r}}_{HPd}^T, {}^v\tilde{\mathbf{r}}_{Hod}^T]^T$ に変換される。この結果を(2)式に代入することにより $\hat{\mathbf{q}}_d$ を求める。 $\hat{\mathbf{q}}_d$ は $\mathbf{S}$ の対角要素が1であ

る $\sum w$ 方向にはハンドを動かさない関節角度の指令値である。カメラフィードバックによる制御を(19)式の制御則に付加すると、

$$\mathbf{V} = \mathbf{K}_1(\hat{\mathbf{q}}_d - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_2\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_3 {}^w\mathbf{J}_H^T(\mathbf{q})\mathbf{S}^w\delta\mathbf{x} \quad (26)$$

ただし、

$${}^w\mathbf{J}_H = \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{R}_V & 0 \\ 0 & {}^w\mathbf{R}_V^T\mathbf{T}_H \end{bmatrix} {}^v\mathbf{J}_H(\mathbf{q}) \quad (27)$$

となる。つまり移動ロボットの位置・姿勢推定誤差が発生する作業座標系の方角についてはカメラフィードバックによる制御を行い、その他の方向については位置・姿勢フィードバックで制御する。以上の制御系のブロック図を Fig. 10(a) に示す。

移動ロボットを床に固定し、偏差を検出するカメラセンサを力センサに置き換え、力偏差を ${}^w\mathbf{J}_H^T$ を用いてフィードバックすると、(26)式で表される制御系は、Fig. 10(b) に示す制御系となる。 ${}^w\mathbf{r}_V = \mathbf{0}$, ${}^w\mathbf{R}_V = \mathbf{I}$, $\mathbf{K}_2 = \mathbf{0}$ と仮定して Fig. 10(a) を見直すと分かりやすい。Raibert らが提案した力・位置のハイブリッド制御系¹⁴⁾と Fig. 10(b) の制御系の違いは、制御モードを作業対象物に設定した拘束座標系について割り振るか作業座標系について割り振るかの違い、また制御出力がトルクでなく速度電圧であるという違いがある。しかし、外界に定義した座標系の基底方向に制御モードを割り付けるという基本的な考えは同じである。

7. 移動ロボットの位置・姿勢推定誤差補償実験

7.1 ある方向には制御しない実験

カメラフィードバックによる制御方向と運動学計算に基づく制御方向が $\sum w$ の指定した方向で、 $\mathbf{S}$ により分離されていることを確認するために次のような実験を行った。(26)式において、 $\mathbf{K}_1$ は前実験と同じゲインとし、 $\mathbf{K}_3 = \mathbf{K}_2 = \mathbf{0}$ と設定した。そして、 $\mathbf{S} = \text{diag}(0, 1, 0, 0, 0, 0)$ と定めると、 e_{PY} についてはフィードバックがないので $\sum w$ の y 軸方向には制御を行わない制御系となる。移動

Fig. 11(a) Control result with straight traveling

Fig. 11(b) Position and orientation errors (with no control in concerning with y axis)

ロボットを 7mm/s の速度で Σ_w の y 軸方向に走行させた制御結果を Fig. 11(b) に示す。移動ロボットの走行にともなって、 e_{PY} のみ増加している。

次に、移動ロボットを 0.26 rad/s でスピントーンさせ、前実験と同様に w_e を調べた。結果を Fig. 12(a), (b) に示す。前実験と同様に e_{PY} のみ増加し、他の誤差はほぼゼロに制御されていることがわかる。以上の実験により(26)式の右辺第一項による制御を行うとき Σ_w の指定した方向のみ制御しない制御系となっていることがわかる。

7.2 カメラフィードバックを付加した実験

Σ_w の原点にマニピュレータのハンドで把持すべき対象物を置き、これをハンドにとりつけたカメラで検出する。 $S = \text{diag}(1, 1, 0, 0, 0, 0)$, K_1, K_2 の値は 5 章の実験と同じに、また $K_3 = \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$ [Volt/rad] と設定し Σ_w の x - y 平面内の誤差をカメラからのフィードバックにより取り除く制御系とした。カメラセンサーからは 50ms 周期で作業対象物の重心位置が出力される。Fig. 7(a) に示した初期位置・姿勢をとらせ、 $w\delta x = [100, -100, 0, 0, 0, 0]^T$ を移動ロボットの位置・姿勢推定誤差に起因する誤差として意図的に与えた。

Fig. 12(a) Control result with spin traveling

Fig. 12(b) Position and orientation errors (with no control in concerning with y axis)

Fig. 13(a) Stop response result to compensate the estimated error (X-axis direction)

Fig. 13(b) Stop response result to compensate the estimated error (Y-axis direction)

このときカメラの画像は Fig. 9 のようになる。目標位置・姿勢が一定値であるから $\dot{w}_{Hd}=0$ であり、移動ロボットを停止させて実験を行ったので、(14),(16),(18)より、 $\dot{q}_d=0$ であるから(26)式の右辺第二項は働かない。カメラからフィードバックされた x, y 軸方向の偏差の時間経過を Fig. 13(a),(b) に示す。 x 軸方向は5秒、 y 軸方向は3秒ほどで0に整定しており、移動ロボットの位置・姿勢推定誤差を車載マニピュレータが補償する制御系となっていることがわかる。

8. あとがき

本論文は、自律型移動ロボットにマニピュレータを搭載し、走行しつつ搬送物の載脱荷作業をするための制御系を提案し、実験によりその基本的な性能を確認したものである。提案した内容は次の点にまとめられる。

自律移動マニピュレータのハンドの制御では、 $\sum w$ で表された移動ロボットの推定誤差を車載マニピュレータの制御系が補償する必要がある。推定誤差が発生する作業座標系方向にはカメラフィードバックを行い、その他の方向については位置・姿勢フィードバックを行う制御系とを組み合わせた制御系を提案し、有効に働くことを実験によって確認した。この方法は、双方の制御出力が干渉しないよう分離する必要があるが、位置と力のハイブリッド制御¹⁰⁾で用いられているスイッチング行列を使用して、作業座標系で表された制御方向を分けている。

本報で提案した制御系はダイナミクスを考慮したものではなく、また制御系の安定性については全く考察していないが、今後取り組んで行きたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) P. E. Muir, C. P. Neuman : Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot, Proc. IEEE Int Conf Rob Autom. pp. 1772-1778, 1987.
- 2) P. F. Muir, C. P. Neuman : Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots, Journal of Robotic Systems, pp. 281-340, 1987.
- 3) 見浪, 簾, 上田, 中野 : 同時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.
- 4) 築島, 高野, 佐々木, 井上 : 車輪式移動ロボットの運動学および動力学の一般理論に関する研究, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 6, pp. 699-711, 1990.
- 5) Kanayama, Y., Kimura, Y., Miyazaki, F., and Noguchi, T.: A stable tracking control method for an autonomous mobile robot, Proc. 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 384-389, 1990.
- 6) 中村, シュリカン サバント : 海中ロボットの非ホロノミック運動, 日本ロボット学会講演論文集, pp. 805-808, 1991.
- 7) 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.
- 8) 津村, 藤原, 白川, 唐 : レーザ燈台を用いた二次元移動体の位置・方位測定法, システムと制御, Vol. 29, No. 3, pp. 188-194, 1985.
- 9) 津村, 藤原, 白川, 田中 : レーザとコーナキューブを利用した二次元移動体の位置・方位測定法, システムと制御, Vol. 29, No. 8, pp. 553-560, 1985.
- 10) 津村, 藤原, 橋本, 唐 : レーザ燈台を用いた移動体の位置・方位測定法, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 6, pp. 557-565, 1984.
- 11) 津村, 藤原, 橋本, 唐 : 追尾式レーザ燈台を用いた二次元移動体の位置測定法, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 6, pp. 521-530, 1985.
- 12) 津村, 藤原, 白川, 岡崎 : 移動体の現在位置・進行方位の計測の一方法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 47, No. 421, pp. 1153-1160, 1984.
- 13) J. Y. Luh, M. W. Walker, R. P. Paul : Resolved acceleration control of mechanical manipulators", IEEE Trans. Automatic Control, 25, pp. 468-474, 1980.
- 14) W. H. Raibert and J. J. Craig : Hybrid position/force control of manipulators, ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control 104, No. 1, pp. 65-77, 1981.
- 15) 有本卓著 : “ロボットの力学と制御”, 朝倉書店, 1990.

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。研究開発部勤務。1990年金沢大学工学部博士課程入学。現在在学中。自動搬送車の開発、移動ロボット、移動マニピュレータの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

栢植広志 (Hiroshi TSUGE)

1967年6月5日生。1990年金沢大学工学部生産精密工学科卒業。1992年同大学院修士課程修了。同年豊田自動織機製作所入社。

(日本ロボット学会正会員)

藤原直史

(Naofumi FUJIWARA)

1942年11月22日生。1965年3月大阪府立大学工学部航空工学科卒業。1965年4月大阪府立大学助手として勤務。1989年4月金沢大学教授(機械システム工学科)現在に至る。移動体の位置計測、誘導に関する研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、ビークルオートメーション技術研究会会員。

(日本ロボット学会正会員)