「ロボット制御基礎論」（第 28 刷）加筆訂正内容

コロナ社から出版している「ロボット制御基礎論」の第 28 刷発行に際して、8 ページにわたる加筆訂正を行いました。その内容を以下に記述します。赤字部分が訂正箇所です。　吉川恒夫、2018 年 9 月 29 日

(0)「まえがき」の最後に追加

今回の重版に際して，第 2·5 節内の「表現上の特異姿勢」に関する記述の誤りを訂正するとともに，特異姿勢全般に関する記述をよりわかりやすくするために，計 8 ページ（49～ 51, 58～ 60, 67 および 110 ページ）にわたる加筆訂正を行った。これらの修正は，読者の方から式 (2·118) に関する記述の誤りをご指摘いただいたことに端を発したものである。記して感謝の意を表する。

2018 年 8 月　著者

(1) p.49, 4 行目から 9 行目までを訂正

をとった場合には、${}^{A}\dot{\boldsymbol{\phi}}_B$ と ${}^{A}\boldsymbol{\omega}_B$ の間には

$$
{}^{A}\boldsymbol{\omega}_B = \boldsymbol{T}_\omega({}^{A}\boldsymbol{\phi}_B)\,{}^{A}\dot{\boldsymbol{\phi}}_B, \quad \boldsymbol{T}_\omega({}^{A}\boldsymbol{\phi}_B) = \begin{bmatrix} 0 & -S_\phi & C_\phi S_\theta \\ 0 & C_\phi & S_\phi S_\theta \\ 1 & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \qquad (2\cdot 77)
$$

という関係が成立する。ただし係数行列 $\boldsymbol{T}_\omega$ の行列式の値が $-S_\theta$ であることから，$S_\theta = 0$ となる姿勢においては $\boldsymbol{T}_\omega$ が逆行列を持たないため，${}^{A}\boldsymbol{\omega}_B$ で表現できても ${}^{A}\dot{\boldsymbol{\phi}}_B$ では表現できない姿勢変化速度の方向が存在することに注意されたい。このような手先姿勢を ${}^{A}\boldsymbol{\phi}_B$ による表現上の特異姿勢とよぶ。

(2) p.50, ↑ 6 行目の前に挿入

上の例では手先姿勢が角度 α のみで表現できた。しかし一般的な多自由度マニピュレータでは手先が 3 次元空間で任意の姿勢を取り得る場合を扱う必要があり，手先姿勢ないし姿勢変化速度の表現の容易さを目的として，前項で述べた方法 I ないし II を用いることが多い。

(3) p.51, ↓ 8 行目から ↑ 3 行目までを訂正

ら，$\boldsymbol{J}_v(\boldsymbol{q})$ もまたヤコビ行列とよぶ。以下では $\boldsymbol{J}_v(\boldsymbol{q})$ を $\boldsymbol{J}_v$ とも書く。

$\boldsymbol{J}_r$ と $\boldsymbol{J}_v$ との関係は，たとえば ${}^R\phi_E$ としてオイラー角をとった場合には $S_\theta \neq 0$ のもとでは（すなわち表現上の特異姿勢にない場合には）式 **(2·77)** より

$$\boldsymbol{J}_r = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{T}_\omega^{-1}({}^R\phi_E) \end{bmatrix} \boldsymbol{J}_v \qquad (2\cdot86)$$

で与えられる。ただし

$$\boldsymbol{T}_\omega^{-1}({}^R\phi_E) = \begin{bmatrix} -C_\phi C_\theta/S_\theta & -S_\phi C_\theta/S_\theta & 1 \\ -S_\phi & C_\phi & 0 \\ C_\phi/S_\theta & S_\phi/S_\theta & 0 \end{bmatrix}$$

である。しかし表現上の特異姿勢においては $\boldsymbol{J}_r$ が存在しない（表現上の特異姿勢に近づくにつれて $\boldsymbol{J}_r$ のいくつかの要素が $\pm\infty$ に発散する)。この点で $\boldsymbol{J}_r$ と $\boldsymbol{J}_v$ は異なる。なお，マニピュレータの手先位置のみを問題とすればよい場合や手先の回転軸の方向が不変な場合などには表現上の特異姿勢の問題が生じず，$\boldsymbol{J}_r$ は $\boldsymbol{J}_v$ と本質的に同じと考えてよい。たとえば例 **2·16** の場合，Z 軸方向を考慮すると角速度ベクトルが $\boldsymbol{\omega} = [0, 0, \dot{\alpha}]^T$ なので，$\boldsymbol{v} = [\dot{x}, \dot{y}, 0, 0, 0, \dot{\alpha}]^T$ となり，ゆえに $\boldsymbol{J}_v$ は $\boldsymbol{J}_r$ の第 **2** 行目の後に **3**×**3** の **0** 行列を挿入した **6**×**3** 行列で与えられる。

(4) p.58, ↓ **10** 行目から ↓ **13** 行目までを修正

を用いればよい。ただし，アームが表現上の特異姿勢にある場合には $\boldsymbol{J}_r$ が存在しないため，$\dot{\boldsymbol{r}}$ に対応する $\boldsymbol{v}$ と式 **(2·111)** を用いれば $\dot{\boldsymbol{q}}$ が得られるにもかかわらず、式 **(2·113)** では計算できないということになるので注意を要する *。

(5) p.58, 最下行に脚注を追加

---

* ここで表現上の特異姿勢の問題を回避するための方法について述べる。表現上の特異姿勢は、$\dot{\psi}$ の軸（Z_B 軸）が $\dot{\phi}$ の軸（オイラー角を定義するための基準座標系 Σ_A の Z_A 軸）と平行になり手先の回転を表現するための自由度が 1 つ減少した時に生じる。したがって与えられた手先姿勢の可動範囲内で Z_B 軸が Z_A 軸と平行にならないように Σ_A を設定できるのであれば，表現上の特異姿勢を回避できる。また、オイラー角の代わりにロール・ピッチ・ヨー角を用いた場合には表現上の特異姿勢の生じる方向が異なってくるので、どちらか便利な方を選ぶこともできる。さらに姿勢表現の最少次元性にこだわらない場合には、四元数や回転行列など **4** 次元以上の姿勢表現を用いることも考えられる。

(6) p.59, ↑ **8** 行目から **p.60,** ↓ **3** 行目までを修正

なお，表現上の特異姿勢が存在しないことが分かっている場合には $\boldsymbol{J}_v$ の代わりに $\boldsymbol{J}_r$ を用いて特異姿勢を知ることができる。すなわち

$$n' = \max_{\boldsymbol{q}} \ \mathrm{rank} \ \boldsymbol{J}_r(\boldsymbol{q}) \qquad (2 \cdot 117)$$

とおくとき

$$\mathrm{rank} \ \boldsymbol{J}_r(\boldsymbol{q}) < n' \qquad (2 \cdot 118)$$

を満たす $\boldsymbol{q}$ が特異姿勢である。$n = n' \leq 6$ で $\boldsymbol{J}_r$ が正方行列の場合には式 $(2 \cdot 118)$ より，特異姿勢であるための 1 つの必要十分条件として次式を得る。

$$\det \ \boldsymbol{J}_r(\boldsymbol{q}) = 0 \qquad (2 \cdot 119)$$

(7) p.60, ↓ 10 行目から↓ 13 行目を修正

となる。この場合明らかに表現上の特異姿勢は存在しないので式 **(2·119)** より $\theta_2 = 0^\circ$ および $\theta_2 = 180^\circ$ がこのアームの特異姿勢であることがわかる。[]

(8) p.60, ↑ 6 行目から↑ 1 行目までを修正

【例 **2·19**】オフセットのない **PUMA** 形マニピュレータ（すなわち，図 **2·23** において $l_b = l_d = l_e = 0$ ）で $l_g = 0$ とした場合を考える。例 **2·17** から $\det \boldsymbol{J}_v = -(l_c C_2 - l_f S_{23}) l_c l_f C_3 C_5$ が得られるので，式 **(2·116)** より図 **2·39(a)** $\sim$ **(c)** の **3** 種類の特異姿勢が存在することがわかる。**(a)** は肩特異姿勢（$l_c C_2 - l_f S_{23} = 0$，肩の真上に手首がある状態），**(b)** はひじ特異姿勢（$C_3 = 0$，ひじが一直線にのびた状態），**(c)** は手首特異姿勢（$C_5 = 0$，手首が一直線にのびた状態）とよばれる [10)]。**(b)** は作動領域の境界上の点に対応するが，**(a)** および **(c)** は作動領域内でも存在し得る特異姿勢である。[]

(9) p67, ↑ 1 行目「を示せ。」を訂正

の，物理的な意味を説明せよ。

(10) p110, ↓ 7 行目から↓ 9 行目までを修正

とすれば良い場合や手先の回転軸の方向が不変な場合など，表現上の特異姿勢の問題が生じない場合には，式 **(4·2)** の代わりに $\dot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{J}_r(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}$ を用いてもよ

く，その場合には以下の議論において $\boldsymbol{v}$ を $\dot{\boldsymbol{r}}$ で，$\boldsymbol{J}$ を $\boldsymbol{J}_r$ で置きかえればよい。

(11) p111, ↓ 12 行目を訂正

$||\dot{\boldsymbol{q}}^*||^2 = \boldsymbol{v}^{*T}(\boldsymbol{J}^+)^T\boldsymbol{J}^+\boldsymbol{v}^* \leqq 1$

(12) p235, 右欄↑ **8** 行目を訂正

シミュレーション