

トリポード, ツェッパ等速継手系の回転角誤差 および動力伝達軸の3次元運動

渡辺克巳*・工藤啓克**・村上勝彦***

山形大学大学院理工学研究科*・山形大学大学院理工学研究科修士課程**・ファナック(株)***

Rotational Angle Errors of the Tripod, Rzeppa CVJ Line and Three Dimensional Motion of the Drive Shaft

Katsumi Watanabe, Norikatsu Kudoh, Katsuhiko Murakami

Yamagata Univ, Yamagata Univ, Fanuc Ltd

Abstract

Constant velocity joint (CVJ) lines of front drive automobiles are composed of the tripod CVJ or the double offset CVJ, the Rzeppa CVJ and the drive shaft. The rotational angle error of the CVJ line and the three dimensional motion of the drive shaft (the whirling motion and the fluctuation of axial direction) were measured and its components were expanded in trigonometric functions. The rotational angle error contains sinusoidal fluctuations with 2π , $2\pi/3$, $2\pi/6$ periods according to joint angles of Tripod and Rzeppa CVJs. The whirling motion has the period of $2\pi/3$ according to the joint angle of Tripod CVJ. The axial direction motion of the drive shaft contains sinusoidal fluctuations of 2π , $2\pi/3$ or $2\pi/6$ periods according to joint angles of Tripod and Rzeppa CVJs. Rotation of the output shaft of Rzeppa CVJ due to its revolution about the drive shaft was analyzed experimentally and analytically.

1. 緒言

前輪駆動乗用車においては, 動力源から前車輪への回転運動とトルクの伝達は入力軸と出力軸が 20° 程度まで屈曲可能で, かつ両軸の交点が移動できるトリポード等速継手¹⁾またはダブルオフセット等速継手, 入力軸と出力軸が 45° 程度まで屈曲可能であるツェッパ等速継手²⁾ および前者の出力軸と後者の入力軸とを一直線上で一体化する駆動伝達軸からなる等速継手系³⁾を用いて行なわれる.

等速継手の構成部品は寸法公差, 加工・組立の誤差をもち, 動力伝達時には変形する. これらが原因して, 入力軸の回転角に対して出力軸の回転角は微小の誤差(遊びおよび等速性の誤差, 以下においては回転角誤差と呼ぶ)をもつ. 他方, 構

成部品間には摩擦が存在するため伝達されるトルクは減少し, 変動する. 特にトリポード等速継手においてはハウジングスラスト力が発生する.

入力軸と出力軸の間の回転角誤差や動力伝達軸の振り回り運動および構成部品間の摩擦による力とモーメントの変動は振動・騒音の原因であり, 乗用車の静粛性, 乗り心地の向上を妨げている. このため, 等速継手の構成部品の相対運動の特性および構成部品間に作用する力とモーメント等の特性に関して研究が行われている. しかし, 2つの等速継手を動力伝達軸と一緒に等速継手系として, 構成部品の相対運動等の特性を明らかにするまでには至っていない. そこで, 著者らはトリポード等速継手およびツェッパ等速継手と動力伝達軸から成る等速継手系の回転軸を水平面内で交差さ



Fig. 1 Tripod constant velocity joint and its inner structure

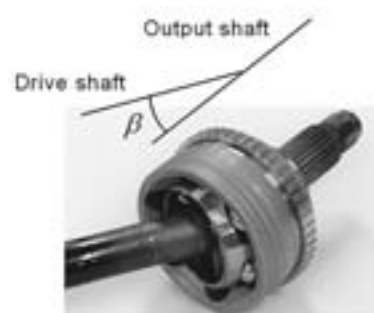


Fig. 2 Rzeppa constant velocity joint

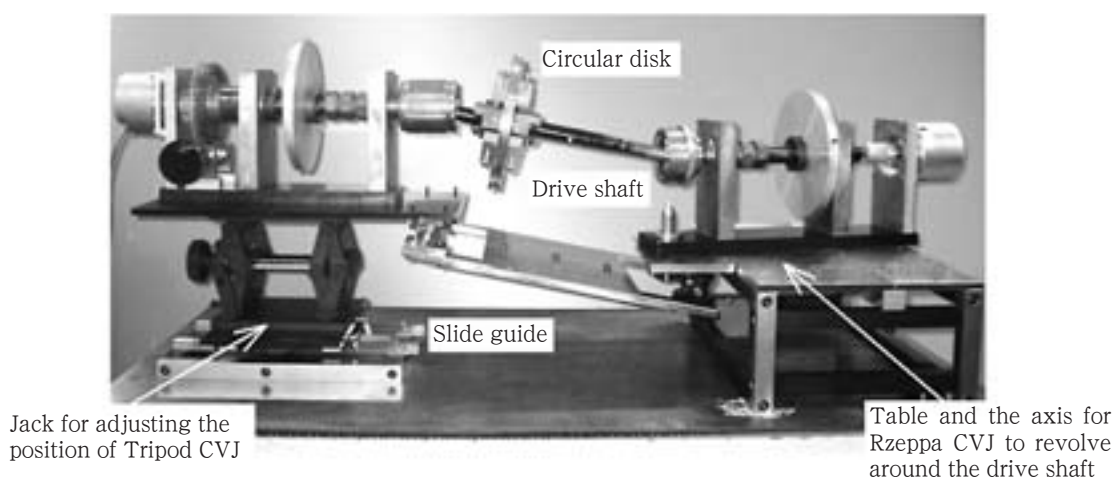


Fig.3 Main part of the experimental equipment of the Tripod, Rzeppa CVJ drive line

せる場合の回転角誤差および動力伝達軸の3回転の振り回り運動とトリポード等速継手の回転角誤差の特性を実験的に解明した⁴⁾。

本研究では等速継手系が前輪駆動車に搭載されている状態に近い状態で、すなわちトリポード等速継手が鉛直平面内で交差し、ツェッパ等速継手の出力軸が水平面内で旋回する実験装置を製作して、等速継手系の回転角誤差および動力伝達軸の3次元運動の特性を解析する。さらに、トリポード等速継手の入力軸を固定した状態でツェッパ等速継手の出力軸を水平面内で旋回させたときに、出力軸の回転角（出力角）が変化する特性を解析する。

2. 実験装置および測定法

実験に使用する等速継手系のトリポード等速継手はスパイダの球形先端が円柱ローラの内筒に球・円筒対偶している形式で、球形先端の直径は18mm、ハウジングのローラ溝のピッチ円半径は

27mmである (Fig.1)。ツェッパ等速継手は六つのボールをもち、ボールの直径が17.5mm、ケージの内球、外球の直径がそれぞれ50, 61mmである (Fig.2)。動力伝達軸に固定されているツェッパ等速継手のインナレースの中心とトリポード等速継手のスパイダ中心の間の距離（動力伝達軸の長さ）は380mmである。

2.1 軸交差角可変フレーム

Fig.3は、前報⁴⁾の実験装置をトリポード等速継手の入力軸、回転角設定ウォーム歯車、入力角測定ロータリーエンコーダの支持台をパンタグラフジャッキで鉛直方向に移動させてトリポード等速継手の軸交差角を設定するように改良した装置である。出力側のツェッパ等速継手の軸交差角は、出力軸、負荷モーメント円板、出力角測定ロータリーエンコーダの支持台を水平板上で旋回し、旋回角と軸交差角より次式で設定する。

$$\beta = \cos^{-1}(\cos \alpha \cos \gamma) \quad (1)$$

支持台、パンタグラフジャッキ案内レール等は

水平鋼板にマグネットで固定することによって静特性実験としての剛性を確保する。

2.2 動力伝達軸の三次元運動の測定

動力伝達軸の三次元運動は，トリポード等速継手のスパイダの中心から100mmの位置でこの軸に垂直に固定された円板（測定円板）の軸直交2方向の変位および円板の面に垂直な変位（軸方向の変位）をデジタル変位計で測定する。さらに，ツェッパ等速継手のインナレースの中心から56mmの位置の動力伝達軸の軸直交2方向の変位をデジタル変位計で測定する。

2.3 回転角誤差の測定

出力軸に9.7Nmの負荷を加えて入力軸を5°刻みで回転させるときの出力軸と入力軸の回転角の差を等速継手系の回転角誤差として算出する。

振れ回り運動（公転）しながら回転（自転）している動力伝達軸の回転角 θ は，Fig.4に示すように半径 R の測定円板の軸直交2方向の変位 x ， y および測定円板に巻き付けられ，直交する2方向に分けて引き出された2本の回転角測定ワイヤの移動長 p ， q と次式で関係付けられる。

$$\left. \begin{aligned} p &= x + R\theta + e\cos(\theta + \xi) \\ q &= y + R\theta + e\sin(\theta + \xi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで， e および ξ はそれぞれ測定円板の偏心量および初期回転角である。ワイヤの移動長 p ， q は，巻き付けたワイヤで駆動される円柱の回転角をレーザーエンコーダで測定して算出する⁴⁾。

この実験装置では，測定円板に巻き付ける回転角測定ワイヤの張力のため等速継手系の負荷トルクは5.6Nmである。また，動力伝達軸が水平面に対して傾くので，測定円板に巻き付けられたワイヤを接線方向に引き出し，移動長測定用円柱に垂直に巻き付けるために，ワイヤ案内プーリを新たに設置した。

3. 実験結果および考察

3.1 等速継手系の回転角誤差

Fig.5は，トリポード等速継手を鉛直方向に移動させて軸交差角 α を0°から20°まで5°刻みに設定し，ツェッパ等速継手の出力軸を水平面内で-40°程度から40°程度まで10°程度の刻みで旋回させる場合の等速継手系の回転角誤差 ε の例で

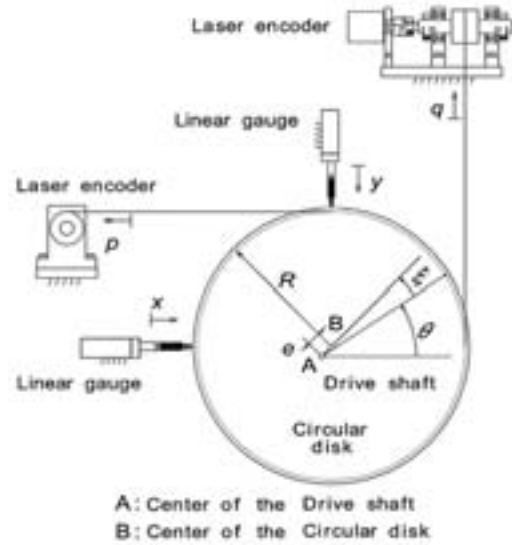


Fig. 4 Measurement of the rotational angle of the drive shaft

ある。この図の横軸 ϕ はトリポード等速継手の入力軸の回転角である。Fig.6は，Fig.5の回転角誤差を三角関数で

$$\varepsilon(\phi) = a_0 + a_1 \cos \phi + b_1 \sin \phi + a_3 \cos 3\phi + b_3 \sin 3\phi + a_6 \cos 6\phi + b_6 \sin 6\phi \quad (3)$$

と近似した場合の定数項 a_0 および1次，3次，6次成分の振幅 A_1 ， A_3 の旋回角 γ の値による変化である（振幅特性）。

トリポード，ツェッパ等速継手と動力伝達軸から成る等速継手系の回転角誤差は，それぞれの等速継手の入力軸と出力軸のインアラインメント等による 2π 周期成分をもつ。回転角誤差の 2π 周期成分は，トリポード等速継手の軸交差角を鉛直平面内で設定した場合の方が水平面内で設定した場合のよりも小さい。回転角誤差の周期成分はツェッパ等速継手の入出力軸の含む平面に関して奇関数であり，軸交差角が大きくなるに従って増加する傾向がある。

等速継手系の回転角誤差の $2\pi/3$ 周期成分は3.5節に示すトリポード等速継手に固有の回転角誤差が重ね合わされたものであると判断された。

3.2 動力伝達軸の軸方向運動

Fig.7は動力伝達軸の軸方向変位の例であり，Fig.8は軸方向変位の成分の振幅特性である。軸交差角 α が小さい場合は動力伝達軸は軸方向に往復運動する。これは入力軸と出力軸のインアライン

メント等が原因していると考えられる。 α が大きい場合は動力伝達軸はトリポード等速継手のスラスト力の影響で3往復運動と往復運動の合成運動を行う。また、旋回角 γ が大きい場合 (軸交差角 β が大きい場合) は約0.05mmの振幅の6往復運動の成分が存在する。

3.3 動力伝達軸の振れ回り運動

Fig.9はスパイダ中心から100mmの位置の動力伝達軸の軸直交2方向変位の例, Fig.10は動力伝達軸の振れ回り運動軌跡の例である。 Fig.11は動力伝達軸の軸直交2方向変位の成分の振幅特性であ

る。

動力伝達軸は等速継手系のインアラインメント等による偏心回転成分ももつので、3回転の振れ回り運動の三重輪は4つの交点をもつ閉曲線となる。トリポード等速継手に固有の $2\pi/3$ 周期の振れ回り運動の振幅は軸交差角が小さくなると放物線的に小さくなり、かつスパイダ中心からの離れるほど (ツェッパ等速継手のインナレースの中心に近づくにしたがって) 小さくなる⁵⁾。

円柱ローラの内筒にスパイダの球形先端が高次対偶しているトリポード等速継手のスパイダの中

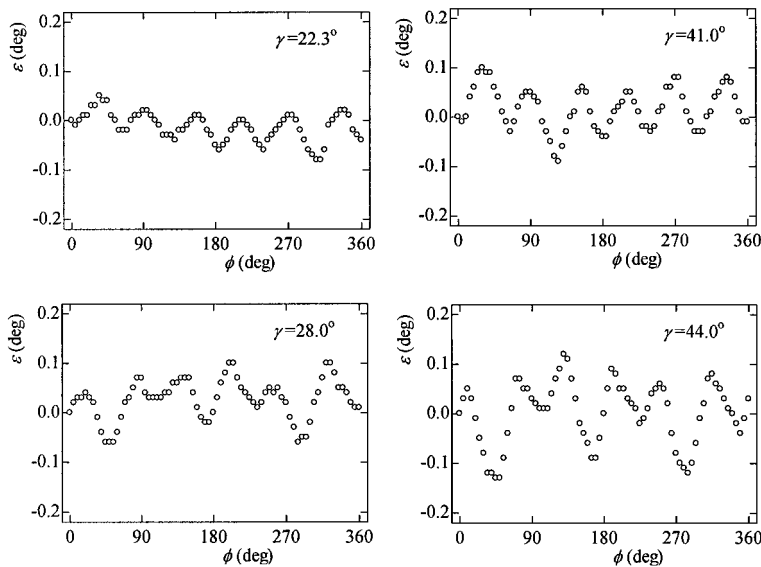


Fig. 5 Rotational angle errors of the CVJ

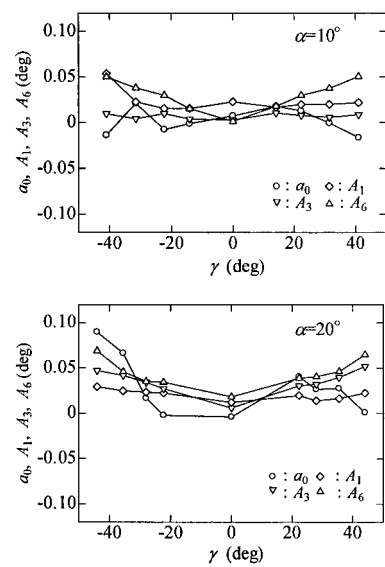


Fig. 6 Amplitudes of components

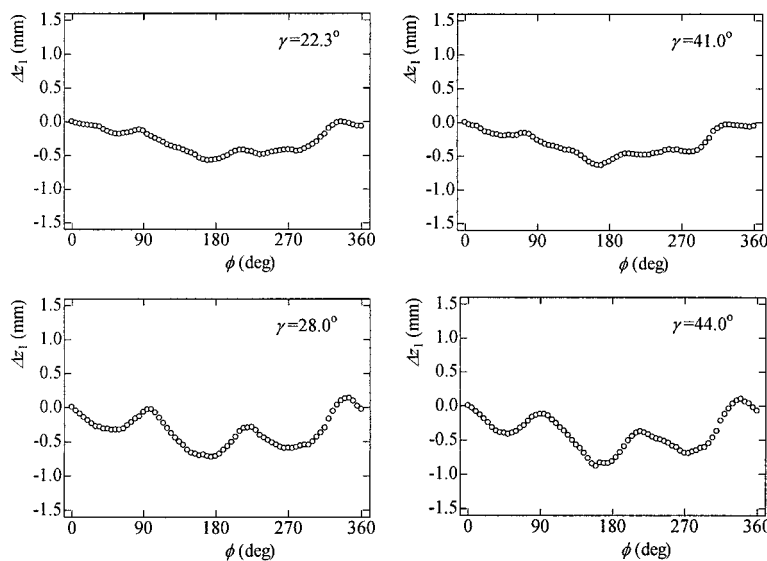


Fig. 7 Displacements of the axial direction of the drive shaft

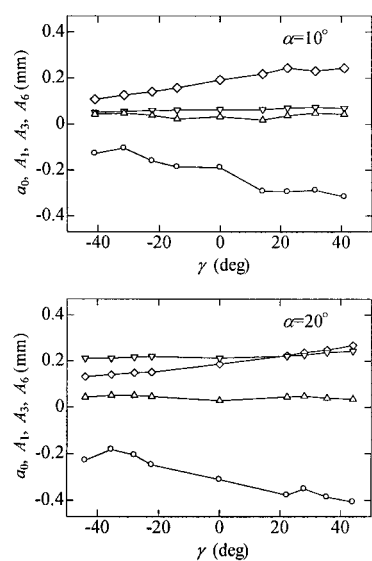


Fig. 8 Amplitudes of components

心は，スパイダ中心から球形先端中心までの距離を r ，軸交差角をと α するとき，入力軸に垂直な平面内で半径が $r(1-\cos\alpha)/2$ の三重円を描くことが解析的に示される．三重円は出力軸に垂直な平面内では長半径が $r(1-\cos\alpha)/2\cos\alpha$ ，短半径が $r(1-\cos\alpha)/2$ の楕円となる．実験で使用したトリポード等速継手の r は28mmなのでスパイダの中心が描く楕円の短半径は $\alpha=20^\circ$ の場合0.84mmである．

動力伝達軸の振れ回り運動はスパイダ中心から離れるに従って直線的に小さくなり，ツェッパ等

速継手の中心で零になる．

測定円板の取付け点の振れ回り運動の $2\pi/3$ 周期成分の振幅0.56mmは解析値 $\frac{280}{380} \times 0.87 = 0.62\text{mm}$ にほぼ等しかった．

3.4 ツェッパ等速継手の入力軸微小運動

ツェッパ等速継手のインナレース中心から約56mmの位置の動力伝達軸の軸直交2方向変位をツェッパ等速継手の入力軸の微小運動として測定した．Fig.12はその例であり，Fig.13はツェッパ継手入力軸の振れ回り運動軌跡の例である．Fig.14はツェッパ継手入力軸の軸直交2方向変位

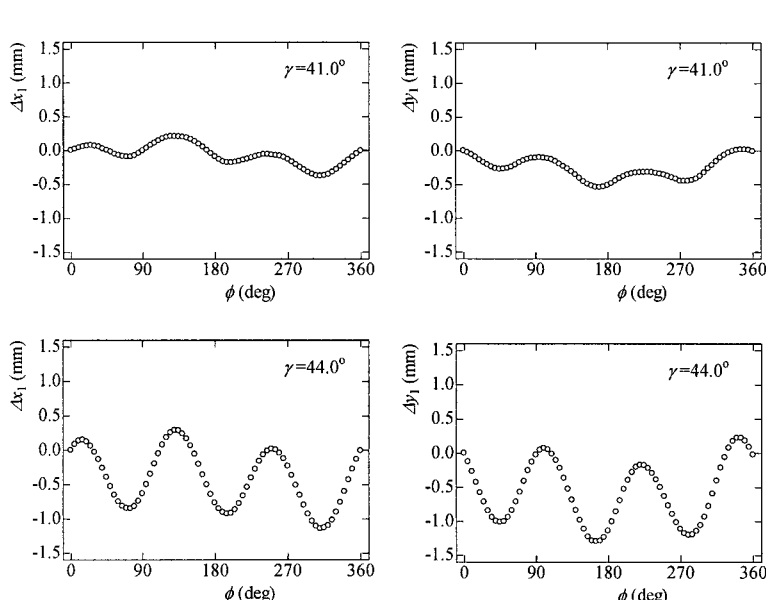


Fig. 9 Displacements of two orthogonal directions of the drive shaft

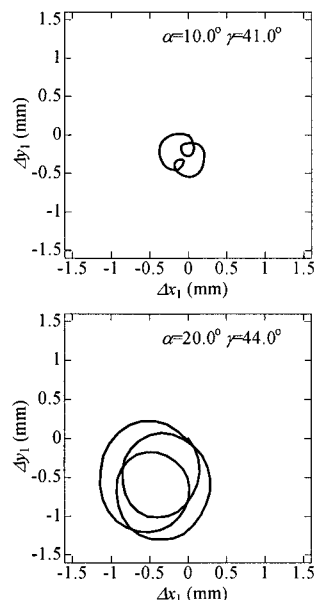


Fig. 10 Whirling motion of the drive shaft

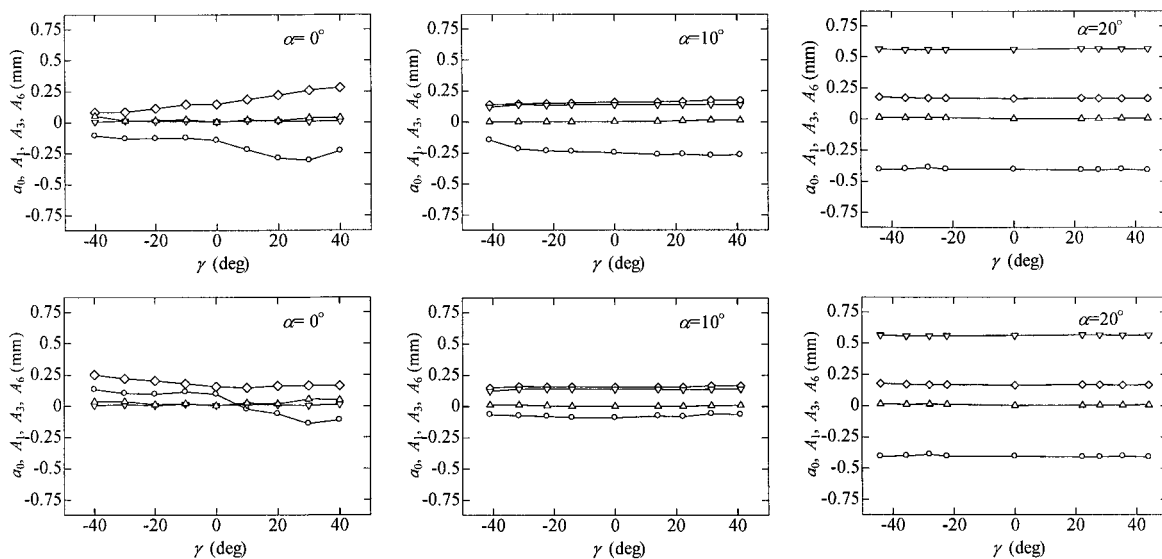


Fig. 11 Upper and lower figures are amplitudes of components of displacements x_1 and y_1 , respectively

の成分の振幅特性である。

$\alpha = 20^\circ$ の場合のツェッパ等速継手の入力軸微小運動の周期成分の振幅は0.15mmであり、解析値 $\frac{56}{380} \times 0.84 = 0.12\text{mm}$ にほぼ等しかった。この成分は軸交差角が小さくなるに従って減少する。

ツェッパ等速継手の入力軸の微小運動の直交2軸方向の周期成分の振幅は0.05~0.07mm, $2\pi/6$ 周期成分の振幅は約0.025mmであった。水平方向の $2\pi/6$ 周期成分,すなわち入出力軸のオフセッ

トの $2\pi/6$ 周期成分がツェッパ等速継手の回転角誤差の $2\pi/6$ 周期成分 (20° の場合の振幅は 0.05°) を引き起こしていると判断された⁶⁾。

3.5 トリポード等速継手の回転角誤差

Fig.15はトリポード等速継手, ツェッパ等速継手の軸交差角を変化させた場合のトリポード等速継手の回転角誤差の例である。トリポード等速継手は, スパイダの球形先端を入力軸と出力軸の含む平面から回転させた場合に $2\pi/3$ 周期がで奇関

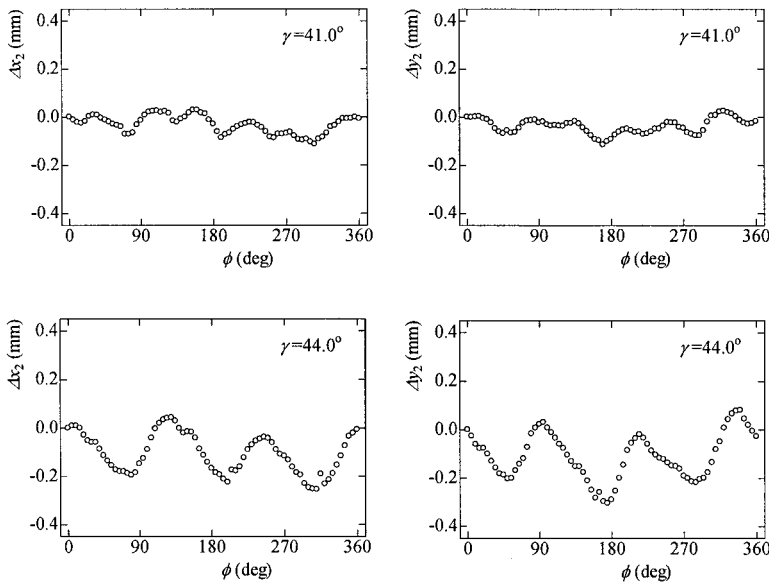


Fig. 12 Displacements of two orthogonal directions of the input shaft of Rzeppa CVJ

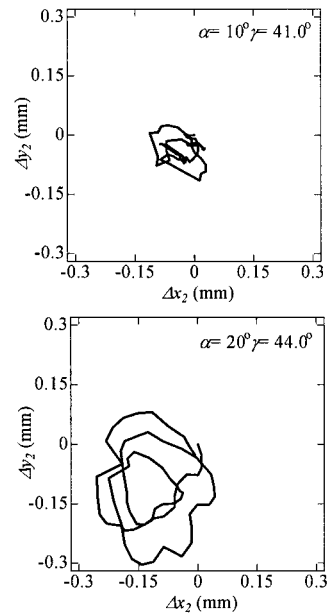


Fig. 13 Whirling motion of the input shaft

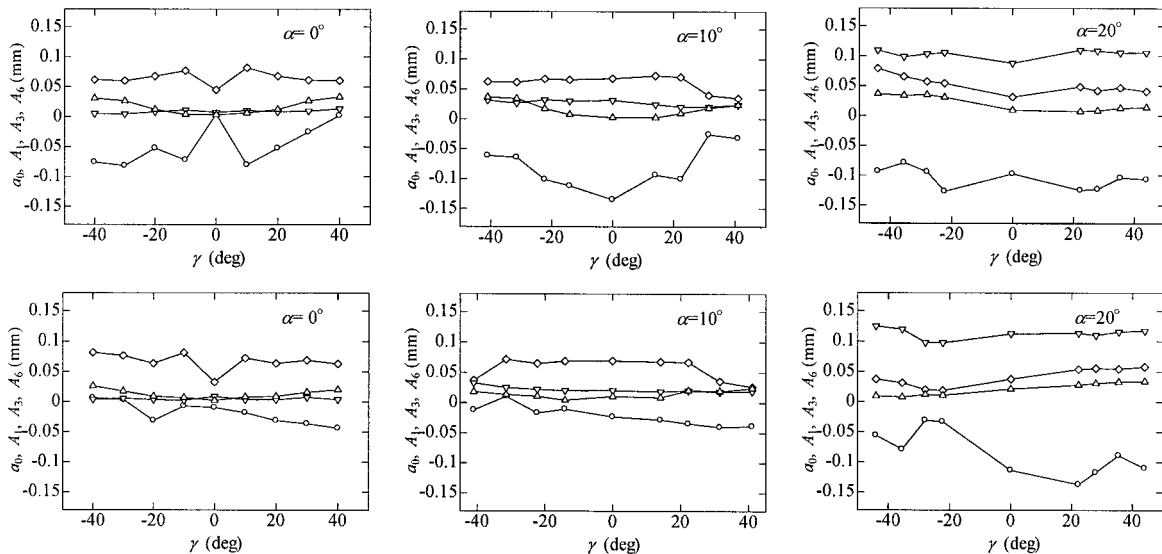


Fig. 14 Upper and lower figures are amplitudes of components of displacements x_2 and y_2

数の回転角誤差をもち、振幅は軸交差角が小さくなるに従って、Fig.16に示すように放物線的に減少する⁵⁾。本実験では測定開始角が、トリポード等速継手の回転軸を鉛直面内で交差させる場合に約30°，水平面内で交差させる場合に約120°遅れていたために回転角誤差がFig.14に示す位相となった。

トリポード等速継手を水平面内で交差させる場合の回転角誤差の振幅の解析値は $\alpha = 20^\circ$ の場合約0.025°であった⁵⁾が、Fig.15の測定値の振幅は約0.05°とその約2倍の大きさである。トリポード

等速継手の回転軸を水平面内で交差させる場合の回転角誤差を再度測定した。それらの振幅はFig.17に示すように前報⁴⁾と同様に $\alpha = 20^\circ$ の場合に約0.025°であり解析値に一致していた。

トリポード等速継手のスラスト力は、周期 $2\pi/3$ のほぼ偶関数で負荷トルクが0.85Nmの場合に振幅が0.10Nである⁵⁾。等速継手系を水平面内で交差させ、5.6Nmの負荷トルクを加えて実験を行ったときのスラスト力は0.67Nである。トリポード等速継手をツェッパ等速継手に対して鉛直方向に移動させて軸交差角を設定する場合は、トリポード

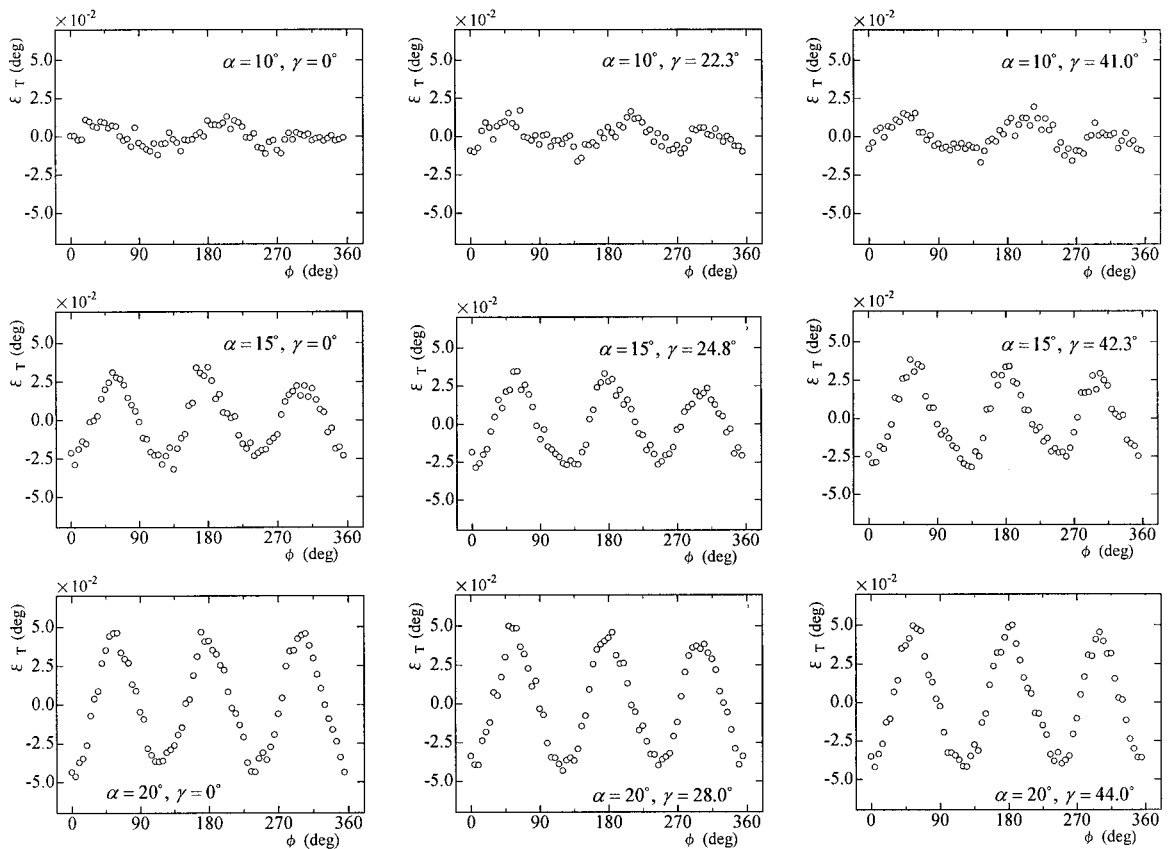


Fig. 15 Rotational angle error of the Tripod CVJ

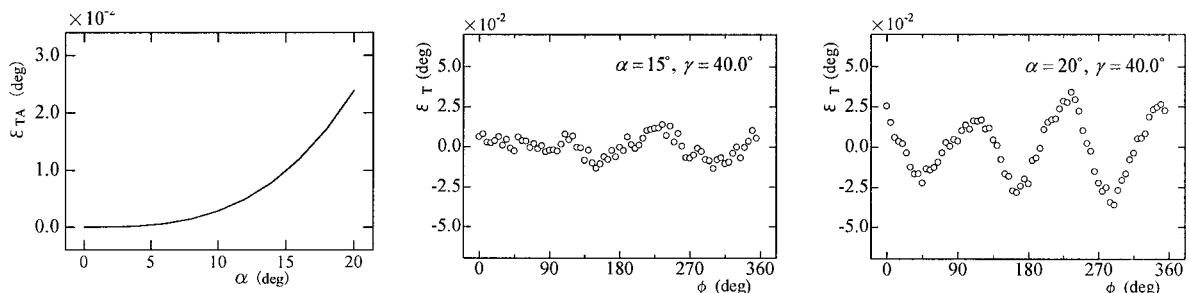


Fig. 16 Amplitude of rotational angle errors of the Tripod CVJ

Fig. 17 Rotational angle error of the Tripod CVJ to be angulated in the horizontal plane

等速継手の円柱ローラおよびツェッパ等速継手のアウトレースに、動力伝達軸と測定円板の自重により動力伝達軸方向に大きさ約 $60\sin\alpha$ (N) の力が作用する。

円柱ローラに動力伝達軸方向に一定の力が作用する場合は、円柱ローラ内筒とスパイダ球形先端および案内溝の相対位置が構成部品間のクリアランスと接触部の摩擦の影響で理論位置からずれるためにトリポード等速継手としての回転角誤差の振幅が増加すると判断された。解析的に明らかにすることは今後の課題である。

4. 旋回による出力軸の自転

トリポード等速継手の入力軸を固定した状態でツェッパ等速継手の出力軸を水平面内で旋回させたときに、出力軸の回転角（出力角）が変化することが分かった。これは新しい知見であるので、等速継手系の運動特性の一つとしてトリポード等速継手およびツェッパ等速継手の軸交差角をパラメーターとして解析する。

4.1 旋回による出力軸の自転角の測定

トリポード等速継手の軸交差角 α を 0° から 20° まで 5° 刻みに設定し、ツェッパ等速継手を水平面内で -40° 程度から 40° 程度まで 10° 程度の刻み（軸交差角 β の 10° 程度の刻み）で旋回させる場合の等速継手の出力軸の角変位の測定値の例をFig.18に示す。

4.2 等速2等分平面に基づく自転角の解析

ツェッパ等速継手のインナレースおよびアウトレースのボール溝中心線（円弧）の中心が入出力軸の交点に一致した場合の幾何学モデルをFig.19に示す。

[記号]

- O-xyz: ツェッパ等速継手の入力軸と出力軸の交点を原点とする静止直交座標系
- A: ツェッパ等速継手の入力軸 (*a*) の延長線上の点
- J: 基準の位置にあるツェッパ等速継手の出力軸 (*j*) の延長線上の点
- B: 基準の位置 γ からだけ旋回した出力軸 (*b*) 上の点
- D: *b*および*a*に垂直なベクトル*c*と*b*に直交する直線 (*d*) 上の点

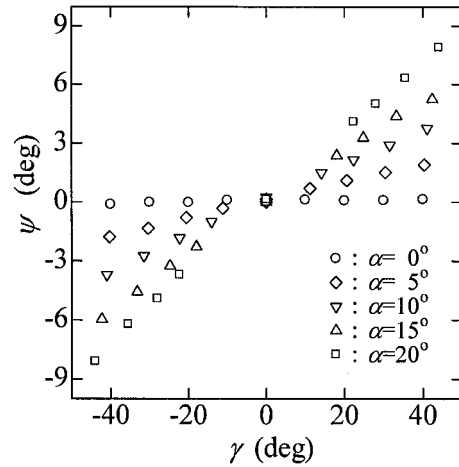


Fig. 18 Measured rotational angles of the output shaft of Rzeppa CVJ due to its revolution around the drive shaft

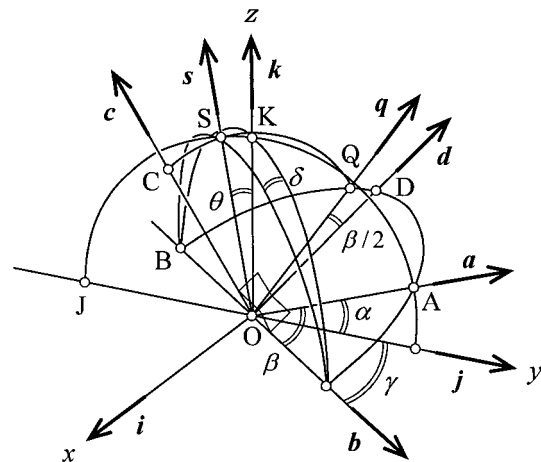


Fig. 19 Geometrical analysis of rotation of the output shaft of Rzeppa CVJ

- P: 出力軸が基準の位置にある場合の等速2等分平面と入出力軸を含む平面の交線（yz平面内でz軸から $\alpha/2$ だけ傾いた直線*p*）上の点
直線*p*および点Pは下記の直線*q*および点Qに近接しているためFig.19では省略している。
 - Q: 出力軸が γ だけ旋回した場合の等速2等分平面と入出力軸を含む平面の交線（直線OAと直線OBを含む平面内で直線ODから $\beta/2$ だけ傾いた直線*q*）上の点
 - K: z軸上の点
 - S: 出力軸が基準の位置にある場合の入出力軸を含む平面と出力軸がだけ旋回した場合の等速2等分平面の交線（*s*）上の点
- トリポード等速継手を鉛直方向に平行に移動さ

Table 1 Calculated rotational angles of the output shaft of Rzeppa CVJ due to its revolution around the drive shaft

Joint angle α (deg)	Revolu. angle γ (deg)	Joint angle β (deg)	Rotational angle ψ (deg)	
			Exp.	Cal.
5	11.2	12.3	0.69	0.53
	20.6	21.2	1.10	0.94
	30.4	30.8	1.51	1.38
	40.3	40.5	1.90	1.85
10	14.1	17.2	1.49	1.52
	22.3	24.3	2.16	2.16
	31.5	32.9	2.90	2.96
	41.0	42.0	3.76	3.85
15	18.0	23.9	2.37	3.19
	24.8	28.7	3.27	3.86
	33.2	36.1	4.38	4.91
	42.3	44.4	5.24	6.14
20	22.3	29.6	4.09	5.33
	28.0	33.9	5.00	6.14
	35.5	40.1	6.32	7.36
	44.0	47.4	7.90	8.84

せて軸交差角 α を設定し、ツェッパ等速継手を軸交差角が β になるように水平面内で回転する。このとき旋回角変位を γ とすると、

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos \beta / \cos \alpha) \quad (3)$$

ツェッパ等速継手の入力軸および旋回させたときの出力軸の方向を表す単位ベクトル \mathbf{a} および \mathbf{b} は次式となる。

$$\mathbf{a} = \cos \alpha \mathbf{j} + \sin \alpha \mathbf{k} \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = \cos \gamma \mathbf{j} + \sin \gamma \mathbf{k} \quad (5)$$

ツェッパ等速継手の出力軸を水平面内で γ だけ旋回した場合に、インナレース溝上の点 P に在ったボールが点 S に移動したとする。この点は新しい等速2等分平面上の点でもある。よって、次式が成立する。

$$\overline{SA} = \overline{SB} \quad (6)$$

直線とのなす角をとすると、

$$s = -\sin \theta \mathbf{j} + \cos \theta \mathbf{k} \quad (7)$$

等速条件より、

$$\mathbf{s} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{s} \cdot (-\mathbf{b}) \quad (8)$$

式(5)に \mathbf{a} 、 \mathbf{b} および \mathbf{s} を代入し、整理すると次式が得られる。

$$\tan \theta = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha + \cos \gamma} \quad (9)$$

球面三角形に余弦公式を適用すると次式が得ら

れる。

$$\frac{\sin(90^\circ - \theta)}{\sin \delta} = \frac{\sin(90^\circ - \alpha + \theta)}{\sin 90^\circ} \quad (10)$$

軸交差角2等分平面が理論通りに作動すれば、ツェッパ等速継手の出力軸は次式の角だけ回転する。

$$\delta = \sin^{-1} \left[\frac{\cos \alpha + \cos \gamma}{1 + \cos \alpha \cos \gamma} \right] - \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

軸交差角 α および β を変化させたときのツェッパ等速継手の出力軸の自转角 δ の解析値を表1に示す。 α が大きい場合に測定値と解析値の差が大きくなっているのは球対偶部の摩擦によりケージが等速2等分平面の位置に一致していなかったためであると判断された。

5. 結 言

トリポード等速継手が鉛直平面内で交差し、ツェッパ等速継手の出力軸が水平面内で回転する実験装置を製作して、等速継手系の回転角誤差および動力伝達軸の3次元運動の特性を実験的に解析した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) トリポード等速継手、ツェッパ等速継手および動力伝達軸からなる等速継手系の回転角誤差

および動力伝達軸の3次元運動は、等速継手系の回転軸のインラインメント等によると考えられる 2π 周期成分，トリポード等速継手の回転角誤差とスラスト力によると考えられる $2\pi/3$ 周期成分，ツェッパ等速継手の軸交差角が大きくなる従って増加する $2\pi/6$ 周期成分をもつ。

- (2) ツェッパ等速継手の入力軸は動力伝達軸の端部としての3回転の微小振れ回り運動を行う。この微小運動は、回転角誤差の $2\pi/6$ 周期成分の原因と考えられる $2\pi/6$ 周期の軸直交方向の微小変位を含んでいる。
- (3) トリポード等速継手の回転角誤差は、鉛直平面で軸を交差させる場合に解析値の2倍程度に大きくなるという新しい知見を得た。この原因は構成部品間のクリアランスと接触部の摩擦の影響と考えられるが、説明は今後の課題である。
- (4) ツェッパ等速継手の入力軸を固定して出力軸を水平面内で旋回させるときに出力軸が自転する角の解析式を導出した。トリポード等速継手の軸交差角が小さい場合は解析値と測定値がほぼ一致した。この実験は等速2等分平面の検証に有効である。

〔謝辞〕

2006年度の卒業研究として本研究の実験に協力された千葉裕之（福島キヤノン）、亀澤聖太（関東自動車工業）の両君に感謝します。

参考文献

- 1) Dodge, J. H., Wagner, E. R., Tripot Universal Joint (End Motion Type), SAE, 1979, 131-140.
- 2) Miller, F. F., Wagner, Holzinger, D. W., E. R., Rzeppa Universal Joint (End Motion Type), SAE, 1979, 145-150.
- 3) Dest, J. C. V., Front Wheel Drive Cars : A New Approach in CV Plunging Joint Design, 22nd FISITA, September 25-30, 1988, Paper No. 885082, 1.622-1.628.
- 4) Matsuura, T., Watanabe, K., Experimental Analyses of Rotational Angle Errors and Three Dimensional Motion of the Drive Shaft of the Tripod, Rzeppa CVJ Line, Transaction of JSME, Series C, 72-714 (2006-2), 622-627.
- 5) Watanabe, K., Kawakatsu, T., Nakao, S., Kinematic and Static Analyses of Tripod Constant Velocity Joints of Spherical End Spider Type, ASME, Journal of Mechanical Design, 127-6 (2005-11), 1137-1144.
- 6) Watanabe, K., Matsuura, T., Kinematic Analyses of Rzeppa Constant Velocity Joint by Means of Bilaterally Symmetrical Circular-Arc-Bar Joint, 12th IFToMM World Congress, Besancon, June 18-21, 2007, CD-R.