

組立作業のための6軸力覚センサを用いた接触点検出

Detection of a Contact Point Using a 6-Axis Force Sensor in Assembly

精密工学専攻 30号 新津 哲
Satoshi Niitsu

1. 緒言

我々は遠隔操作の際に必要な力覚情報のフィードバックに haptic device を適用する研究を進めている⁽¹⁾。組立作業の分野では、組立性を考慮して設計された組立品であれば、通常一度に動かす自由度は1~2自由度であり、一度にユーザが感じるべき力覚情報も少なく、多自由度の情報は必要ではない⁽²⁾。

本研究では、組立作業の分野においては少自由度の haptic device でも操作が可能であると考え、1自由度の haptic device を用いた6自由度の遠隔組立作業を行うシステムの開発を目的としている。形状が不明な部品の遠隔組立作業では接触点の検出が重要である。操作に haptic device を用いた組立作業では厳密に接触点を検出する必要はなく、随時変化する接触点を検出することが重視される。

本論文では、6軸力覚センサのみを用いて行う接触点算出手法を提案する。さらに式の精度を確かめるための実験装置を製作し、センサの誤差と重力の影響の大きさと式の精度について調べたので報告する。

2. 遠隔組立作業

少品種大量生産の場合、組立を完全に自動化することができる。しかし、多品種少量生産や一点物の生産の場合、すべてを自動化するのはコストの面から見て難しく、人間の遠隔操作による組立が有効である。本研究では、自動化が困難な生産現場における組立作業に焦点をあて、組立対象物の詳細な形状情報なしに、ユーザが作業現場をカメラで見ながらロボットを遠隔操作して行う組立を想定する。組立作業では移動部品(組み付ける側の部品)が環境部品(組み付けられる側の部品)との接触を順次増やしていくことで組立を完了する特徴がある⁽³⁾。接触箇所が増えるごとに移動部品の自由度が拘束され、通常は組立を完了したときにすべての自由度が拘束される。組立途中で、一度環境部品に接触させた移動部品を離脱させることは少ない。

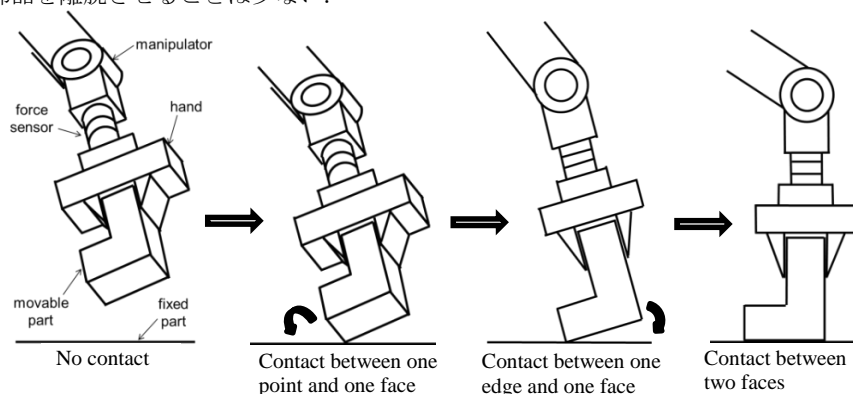


Fig. 1 An assembly procedure.

3. 接触点算出

通常、移動部品と環境部品が非接触状態から1面接触状態へ遷移するとき、1点接触、1稜線接触、1面接触の順に遷移する(Fig. 1)⁽⁴⁾。このとき、部品の形状が既知であるならば接触点もしくは接触稜線回りに回転移動することができる。しかしながら、本研究では、形状情報が無いという条件で組立作業を行うため、部品の離脱を防ぐための押付力を生成しつつ、マニピュレータの手先を中心に回転移動させるという手法で組立作業を行っていた⁽⁵⁾。この手法は押付力が一定であるため、移動部品が立方体のような形状の場合は問題ないが、そうではない場合、意図した回転移動が行えない⁽⁶⁾。そこで、部品形状情報が無い場合でも接触点を中心とした回転移動を行うための、6軸力覚センサを用いた接触点算出手法を次に示す。

3.1 基本理論

移動部品と環境部品が点接触した際の静的な均衡状態について考慮する(Fig. 2)。ここでは単純化のため、移動部品等に発生する重力の影響を考慮しない。センサ中心を原点とした接触点の位置、環境部品からの反力、反力により発生するモーメントをそれぞれベクトル R_1 , F_1 , m_1 と置くと次のように表せる。

$$m_1 = R_1 \times F_1 \quad (1)$$

式(1)より、

$$R_1 = r_1 + \lambda_1 \frac{F_1}{|F_1|} = r_1 + \lambda_1 \hat{F}_1 \quad (2)$$

$$r_1 = \frac{F_1 \times m_1}{|F_1|^2} \quad (3)$$

ここで、 $|F_1|$ は F_1 のノルム、 λ_1 は距離、 \hat{F}_1 は F_1 の単位ベクトルを表す。式(2)は接触点の存在範囲を示す直線 L を表す。しかし一組の力とモーメントの情報だけでは λ_1 を一意に定めることができない。そこで、もう一本の存在範囲を示す直線を用いて接触点を求める。

直線 M と N はそれぞれ力の方向を変更したとき及びマニ

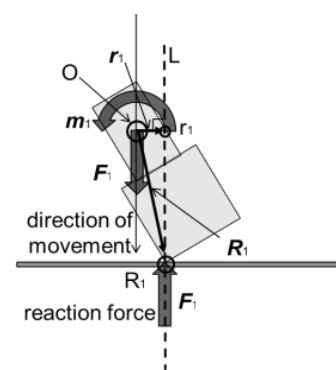


Fig. 2 Forces and moments

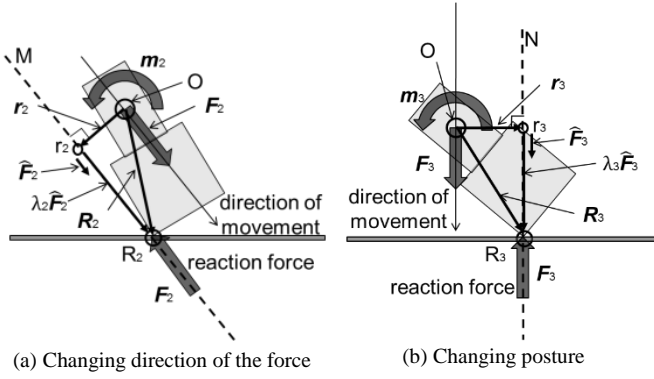


Fig. 3 Changing forces and moments.

ピュレータ手先の姿勢を変更した際に、直線 L と同様の方法で得られる接触点の存在範囲を示す直線である (Fig. 3). 接触点は L と M または L と N の交点を求めることで得ることができる。しかし実際は、これらの二直線は必ずしも交差しない。そこで、次に示す 2 通りの方法で仮想的な接触点を求め、これらを擬似接触点と呼ぶ。

3.2 中点方式

直線 L, M の最近点をそれぞれ A, B とし、その位置ベクトルを a, b とすると以下の関係式が導かれる (Fig. 4)

$$\left. \begin{aligned} a &= r_1 + \lambda_1 \widehat{F}_1 \\ b &= r_2 + \lambda_2 \widehat{F}_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$n = b - a \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} n \cdot \widehat{F}_1 &= 0 \\ n \cdot \widehat{F}_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(4), (5), (6)より λ_1, λ_2 , 及び AB の中点 P は以下の式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{(r_2 - r_1) \cdot \widehat{F}_1 - \{(r_2 - r_1) \cdot \widehat{F}_2\}(\widehat{F}_1 \cdot \widehat{F}_2)}{1 - (\widehat{F}_1 \cdot \widehat{F}_2)^2} \\ \lambda_2 &= \frac{(r_2 - r_1) \cdot \widehat{F}_2 - \{(r_2 - r_1) \cdot \widehat{F}_1\}(\widehat{F}_1 \cdot \widehat{F}_2)}{(\widehat{F}_1 \cdot \widehat{F}_2)^2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$P = a + \frac{n}{2} = b - \frac{n}{2} \quad (8)$$

式(8)より求められる P を擬似接触点とする。

3.3 投影方式

3.2 節で述べた方法では、 $|n| \neq 0$ であるとき計算の精度が悪くなる。そこで、 $|n| = 0$ の場合を考える (Fig. 5)。まず、原点 O をとおいて F_1, r_1 に平行な平面 S を定義するため、 u, v, w を以下のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} w &= -\widehat{F}_1 \times \widehat{r}_1 \\ u &= \widehat{F}_1 \\ v &= u \times w \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

このとき、 \widehat{r}_1 は r_1 の単位ベクトルを表す。 r_2 と F_2 を S に投影したベクトル r'_2, F'_2 は以下のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} F'_2 &= F_2 - (w \cdot F_2)w \\ r'_2 &= r_2 - (w \cdot r_2)w \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

r'_2, F'_2 を用いて表される直線 M' は直線 L と交点を持つため以下の式が成り立つ。

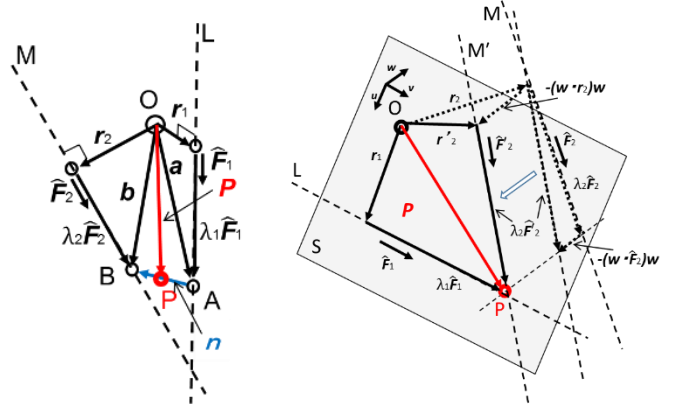


Fig. 4 Midpoint method.

Fig. 5 Projecting to a plane Method

$$\left. \begin{aligned} r_1 + \lambda_1 \widehat{F}_1 &= r'_2 \cdot u + \lambda_2 \widehat{F}'_2 \cdot u \\ r_1 + \lambda_1 \widehat{F}_1 &= r'_2 \cdot v + \lambda_2 \widehat{F}'_2 \cdot v \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)より λ_1, λ_2 , 及び L, M' の交点 P は以下の式で表せる

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{(r'_2 \cdot u - r_1 \cdot u) \widehat{F}'_2 \cdot v + (r_1 \cdot v - r'_2 \cdot v) \widehat{F}'_2 \cdot u}{(\widehat{F}_1 \cdot u)(\widehat{F}_2 \cdot v) - \widehat{F}_2 \cdot u} \\ \lambda_2 &= \frac{(r_1 \cdot u - r'_2 \cdot u) \widehat{F}_1 \cdot v - (r_1 \cdot v - r'_2 \cdot v) \widehat{F}_1 \cdot u}{\widehat{F}'_2 \cdot u - (\widehat{F}_1 \cdot u)(\widehat{F}'_2 \cdot v)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$P = r'_1 + \lambda_1 \widehat{F}_1 = r'_2 + \lambda_2 \widehat{F}_2 \quad (13)$$

式(13)より求められる P を擬似接触点とする。

4. 接触点算出実験

4.1 実験装置

式の精度を確かめるために設計製作した実験装置を Fig. 6 に示す。この実験装置では、水平方向の移動をサーボモータで行い、垂直方向の移動を錘を用いた環境部品の上下移動で行う。手先部分に 6 軸力覚センサを搭載しており、本実験では単純化のため移動部品をセンサの先へ固定している。

4.2 実験方法

接触点の存在範囲を示す直線を求めるための力とトルクのデータは、3.1 節に示す二通りの方法で測定した。このとき、力方向の変更は x 軸と y 軸それぞれに対応したサーボモータへ -1.6~-1.0[V], 1.0~1.6[V] の指令電圧を与えることで行い、姿勢の変更はセンサの x 軸周りに 15, 30, 45[deg]回転させて行う (Fig. 7(a))。また、二直線を用いた擬似接触点の導出は 3.2, 3.3 に示す二通りの方法を用いた。移動部品は立方体で、20[mm]角 (重さ 13[g]) と 40[mm]角 (重さ 92[g]) の二つを用いた。材質は POM (ポリアセタール) である。また移動部品は z 軸周りに 20[deg]回転させた状態で固定した (Fig. 7(b))。

4.3 実験結果

20[mm]角の移動部品を用いた時、移動部品にかかる力の方向を変更した場合の二通りの方法で算出した擬似接触点の計算結果を Fig. 8 に、姿勢を変更した場合の二通りの方法で算出した擬似接触点の計算結果を Fig. 9 に示す。このとき、重力の影響を考慮していない。移動部品の大きさによる誤差傾向に大きな差はなかったため、40[mm]角の移動部品を用いた際の結果は割愛する。図の破線は真値を示す。Fig. 8 より、力方向変更時の力の付加方向による差は、中点方式を用いた

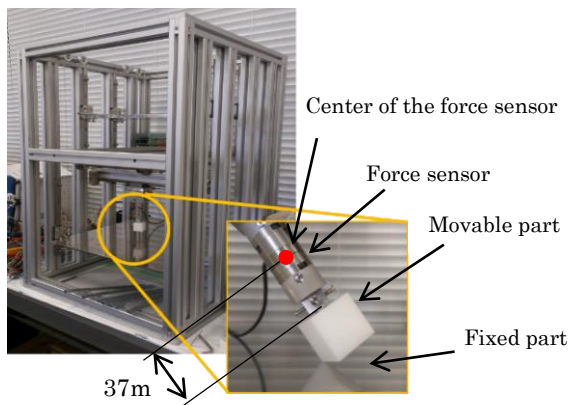


Fig. 6 Experimental equipment.

場合はほぼないが、投影方式ではわずかに出ている。Fig. 9 より、姿勢変更時は中点方式と投影方式で大きな差はないが、押しつけ力が小さく、姿勢の傾きが大きい場合には正しく算出されない。

5. センサ誤差による結果のズレ

5.1 実験方法

今回使用した力覚センサの定格値は、5[kgf]、50[kgf-cm]であり、精度は定格値の 2.0%である。そこでセンサの誤差による影響を調べるため、二組の力とモーメントの理論値のうち一組の各成分にそれぞれ 0.01[N]、0.1[N・cm]の誤差を含ませた際の算出結果と真値との差を比較する。

また、移動部品に掛かる重力による誤差を比較するため、姿勢変更時の重力補償を行った時と行っていないときの結果を比較する。

5.2 実験結果

力では x 軸方向、トルクでは y 軸周りに誤差を含ませた際に、算出結果と真値との差が最も大きかった。これらの結果を Table 1 に示す。真値との差は、最大でも Z 軸方向に 0.2[mm]以下であった。このことより、センサの精度による影響は小さいと考えられる。

次に、移動部品の重さによる影響が大きかった、40[mm]角の移動部品を用いた際の姿勢変更時の実験について、姿勢が 15[deg]と 45[deg]の組み合わせ時の、重力補償の有無による差を Fig. 10 に示す。重力補償を行ったとき、押付力の大きさによる接触点の算出結果の差はほぼなく、真値に近づいている。すなわち、重力補償を行うことによって小さな押付力においても、部品の重量に関係なく接触点が算出できる。

6. 式の精度

6.1 実験方法

二直線の傾きによる算出結果の違いについて調べる。理論値での計算を行うため、まず先に、仮想的な接触点 A と B を決める。次に、それらを通る傾きの異なる二直線 L と M を作る。このとき A と B が同じ座標の場合、二直線は傾きによらず交点を持つ。二直線が交点を持つ場合、擬似接触点は交点と一致する。そこで、二点間を離すことによってねじれの関係をつくり、二直線間の角度が浅いときの誤差の増加傾向について調べる。以下の条件で理論値における擬似接触点の計算を行った。

1 : B の座標を (50, 50, 50) とする。

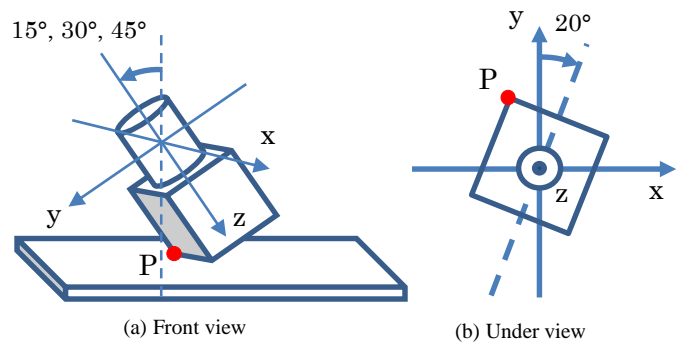


Fig. 7 Posture of movable part

2 : A が B に対して X 軸方向に -3~+3[mm] まで移動する。

3-1 : 直線 M が XZ 平面において Z 軸に対し 0 度であり、直線 L が XZ 平面において M に対し -10~+10 度まで変化する。

3-2 : 直線 M が XZ 平面において Z 軸に対し 45 度であり、直線 L が XZ 平面において M に対し -10~+10 度まで変化する。

6.2 実験結果

条件 3-1 と 3-2 の実験結果をそれぞれ Fig. 11 に示す。二直線の成す角が小さく、二直線間の距離が大きいつき、誤差が極端に大きくなる。また、中点法と投影法による結果の差は、直線の傾き方向と直線の移動方向によって異なるが、いずれも微小だった。

7. 結言

6 軸力覚センサを用いて、部品の形状情報なしに接触点を算出する方法について、その式の精度を確かめるため、実験装置を設計、製作し、実際に実験を行い、多少の誤差の範囲内で接触点を算出できることを確認した。また、誤差の原因として考えられるセンサの精度と式の精度について調べた。

展望として、遠隔組立システムへの適用、稜線接触時および面接触時の判断方法の考案、またさらに精度を向上させるための、誤差の傾向の調査が挙げられる。

参考文献

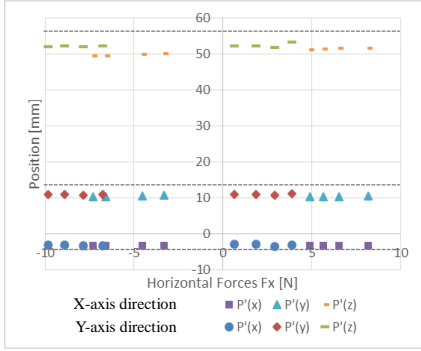
- (1) Kamata, R., Hara, A., Kawaharada, H., and Hiraoka, H., 2012, "Remote-Controlled 6DOF Assembly using a 1DOF Haptic Device with Virtual Planes" Asian Conference on Design and Digital Engineering 2012.
- (2) Takamatsu, J., Tominaga, H., Ogawara, K., Kimura, H. and Ikeuchi, K., 2000, "Extracting manipulation skills from observation," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 1, pp. 584-589.
- (3) Takamatsu, J., Ogawara, K., Kimura, H. and Ikeuchi, 2004, "Understanding of human assembly tasks for robot execution generation of optimal trajectories based on transitions of contact Relations," The Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 22, No. 6, pp. 752-589 (in Japanese).
- (4) Shimizu, M. and Kosuge, K., 2002, "Planar parts mating task using structured compliance," The Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 20, No.8 pp. 852-859

(in Japanese).

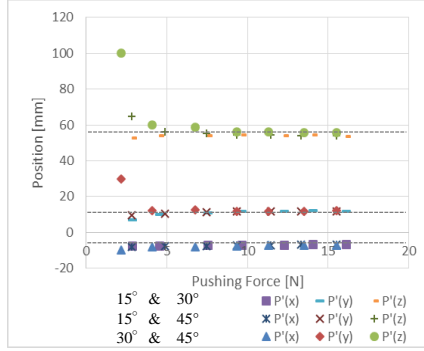
- (5) Hara, A., Aamauchi, Y., Kawaharada, H., and Hiraoka, H., 2011, "6DOF Assembly Operation by 1DOF User Operation" Proceedings of the 29th Annual conference of the Robotics Society of Japan, 3L1-1, (in Japanese).
- (6) Kamata, R., Niitsu, S., Tamura, R., Kawaharada, H., and Hiraoka, H., 2013, "Remote-Controlled 6DOF Assembly Using a1DOF Haptic Device" 14th SICE System Integration Division Annual Conference 2013, pp2435-2440(in Japanese).

Table 1 The deviation from the correct value resulting from error of the sensor.

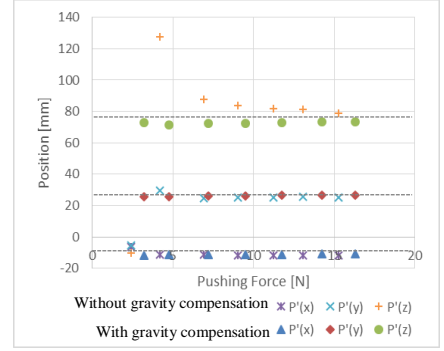
Magnitude of error		Fx[N]		Ty[N·cm]	
		+0.01	-0.01	+0.1	-0.1
Midpoint method	X[mm]	-0.057	0.057	0.009	-0.009
	Y[mm]	-0.049	0.049	0.008	-0.008
	Z[mm]	-0.172	0.173	0.028	-0.028
Projecting to a plane method	X[mm]	-0.058	0.058	0.009	-0.009
	Y[mm]	-0.050	0.05	0.008	-0.008
	Z[mm]	-0.171	0.172	0.028	-0.028



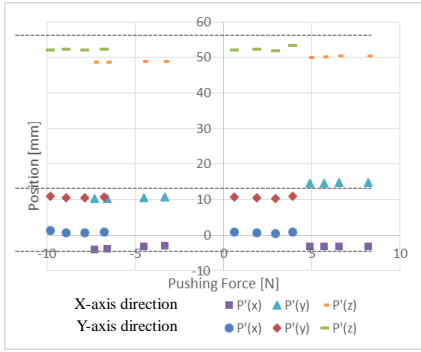
(a) Midpoint method



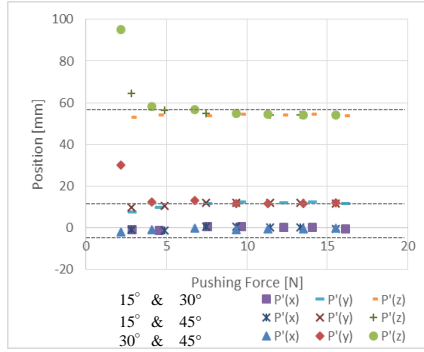
(a) Midpoint method



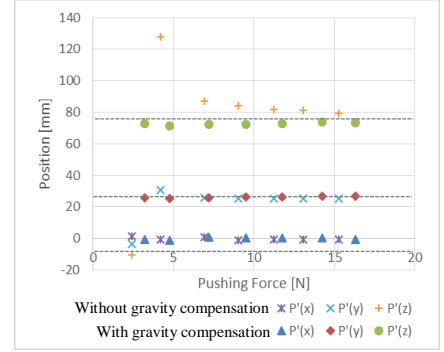
(a) Midpoint method



(b) Projecting to a plane Method



(b) Projecting to a plane Method

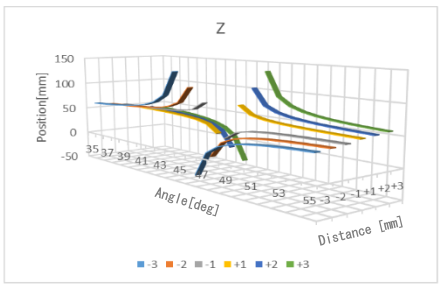
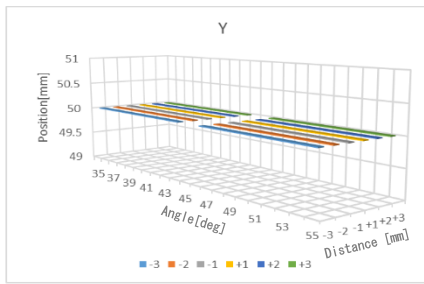
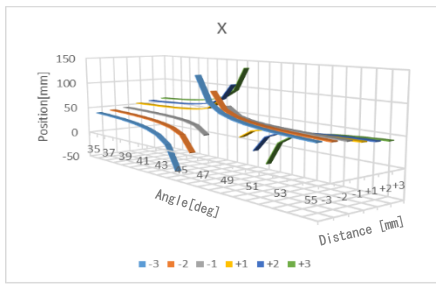


(b) Projecting to a plane Method

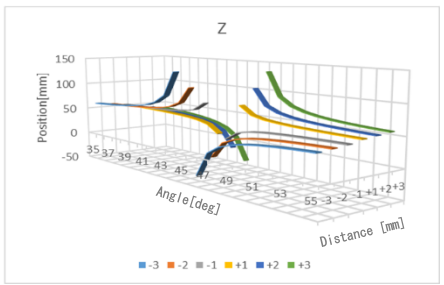
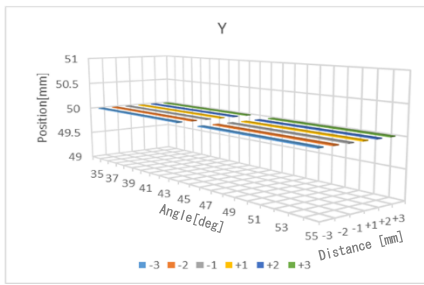
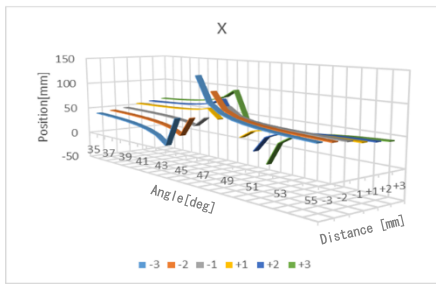
Fig. 8 Calculated pseudo contact point when changing direction of the force. (20mm)

Fig. 9 Calculated pseudo contact point when changing posture. (20mm)

Fig. 10 Calculated pseudo contact point when changing posture. (40mm)



(a) Calculated pseudo contact point using "Midpoint method"



(b) Calculated pseudo contact point using "Projecting to a plane Method"

Fig. 11 Calculated pseudo contact point when straight line M is 45 degree to the Z axis