エポキシ樹脂系接着剤を用いたパラレルメカニズム用
広揺動角ボールジョイントとロッドの設計*金 斗 亨^{*1}, 阿 部 幸 勇^{*1}, 下清水 武志^{*2}
佐 藤 大 祐^{*2}, 内 山 勝^{*1}Design of a Ball Joint and Rod with Large Swing Angle
for a Parallel Robot in Which Epoxy-Type Bond is UsedDoohyung KIM^{*3}, Koyu ABE, Takeshi SHITASHIMIZU,
Daisuke SATO and Masaru UCHIYAMA^{*3} Department of Aeronautics and Space Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University,
Aoba-yama 01, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper proposes the design of a large swing angle ball joint for parallel mechanisms. Parallely-actuated mechanisms have the disadvantage of having smaller workspace compared to the serial mechanisms. It is important to get a larger workspace in order to extend the application range. But the workspace of a parallel robot depends on the swing angle of the ball joints used in it. However, if the housing of the ball joint is milled close to the equator of the ball to achieve a large swing angle, the ball joint may leave the housing during motion. Here, we propose an experimental model of a ball joint using the epoxy bond, without using any special techniques to realize a comparatively cheaper and simpler ball joint with large swing angle. An experiment to verify its utilization and performance is conducted.

Key Words: 6-DOF Parallel Robot, Ball Joint, Large Swing Angle, Epoxy Bond, Workspace

1. は じ め に

パラレルメカニズムは一般に、シリアル機構に比べ作業領域が狭いという欠点をもっている。そこで、パラレルメカニズムにおいて作業領域を広げることは、その応用範囲を広げるために重要なことである⁽¹⁾⁽²⁾。このことから、多くの研究者によって作業領域を広げるための努力が続けられてきた。その例としては、パラレルリンク機構を2段に連結したもの⁽³⁾⁽⁴⁾、リニアアクチュエータを用いたもの⁽⁵⁾などがある。一方、広い作業領域を得るには、揺動角を大きくしたボールジョイントを用いるのも一案である⁽⁶⁾。

しかし、揺動角を広げるためにはハウジングの回転球保持部を球の赤道面近くまで加工する必要がある。この場合、ボールとハウジングが外れる可能性が出てくる。このような安全性の理由から、一般に市販されているボールジョイントの揺動角は20~25°程度になっている。そこで、実験用として市販のものを加工することも考えられるが、すでに組立てられている状態

では困難である。また、少量の部品をメーカーに特別注文することは費用や納期の点で難しい。最近、揺動角と精度を改善した製品として、遊星球を用い予圧をかけた構造のボールジョイントがヒーハイト精工より市販されている⁽⁷⁾。しかし、値段が非常に高い(約110倍、上述した市販の汎用品THK RBL 5DとヒーハイトSRJ 008Cの比較)。また、運動に影響を与えることになる部品重量の軽減が構造上難しく、一般のボールジョイントより重い(およそ3倍)。このことは高速を目指したパラレル機構にとって負担となる。そこで、実験の条件に合せた広い揺動角をもつ安価なボールジョイントが要求される。

本論文では、特別な技術や機器を必要とせず比較的安価で簡便な製作方法として、エポキシ樹脂を用い、必要な揺動角範囲内で希望する性能が得られるボールジョイントについて提案する。また、提案した手法により設計・試作したボールジョイントの性能試験の結果から、安全性についても検証する。さらに、試作したボールジョイントを本研究室で開発したパラレルロボットHEXA⁽⁸⁾⁽⁹⁾のロッドとして用い、その高速実験の結果について示す。実験にあたっては安全性を確保するための方策についても提案する。性能実験の結果から、ボールジョイントの精度が改善されたことに

* 原稿受付 2002年1月30日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。^{*2} 東北大学大学院工学研究科。

E-mail: doohyung@space.mech.tohoku.ac.jp

Table 1 Model of the ball joint

S	D [mm]	L [mm]	L_1 [mm]
M5	8.0	37.0	27.0
ϕ [mm]	θ [°]	weight [g]	l [mm]
11.112	40.0	19.5	30.5
l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_4 [mm]
22.0	2.9	1.5	2.5

Fig. 1 High-speed parallel robot HEXA

Fig. 2 Model of the ball joint

Fig. 3 Aluminum housing

よって発生した振動についても触れる。

2. ボールジョイントのデザイン

2・1 ボールジョイントの製作手順 ここで提案したボールジョイントは、本研究室で開発した平行ロボット HEXA のロッドを対象としてデザインした。実験機 HEXA ロボットの外観を図1に、また、試作ボールジョイントの諸元を図2および表1に示す。

提案するボールジョイントの製作は以下の手順で行う。

1. 回転用鋼球(ボール)を保持するアルミニウム合金(A 2017)のハウジングを加工する。
2. ボールの表面に離型剤を塗布する。
3. エポキシ樹脂をハウジングの中に充てんする。
4. ボールをハウジングの中に入れる。
5. その状態で所要時間まで硬化させる。
6. はみ出した樹脂を加工する。

2・2 ボールとアルミニウムのハウジング ボールは現在 HEXA ロボットに採用している市販品から流用する。具体的には、THK のボールジョイント RBL-5 D から直径 11.112 mm (カタログ値参照) のボールのみを取出して使用する。アルミニウム合金のハウジングには、図3に示すようにボールの径より 0.1 mm 大きいくぼみと、その周りに直径 4.0 mm の穴を四つあける。この四つの穴は、球の赤道面より上になり球の脱落を防止する重要な役割を担う接着剤の強度を補強する。また、この四つの穴は、ハウジングと接着剤が、急激な温度の変化によってはく離することを防止することにも役立つ。ハウジングを加工する際に、要求される揺動角を得るため、ボール赤道面から接着剤に埋まる上部分の間隔、1.5 mm に留意して加工する。もし、間隔が 1.5 mm より大きいと希望の揺動角が得られないし、それ未満であればボールがハウジングから外れる可能性が高くなる。接着剤を入れる前に接着力を高めるためエタノール 99.5% に 10 分以上浸し、ハウジングの接着面の不純物を除去した後で使用する。このハウジングの質量は 9.3 g である。

2・3 エポキシ樹脂系接着剤 接着剤は使用環境と目的によってさまざまな種類がそろっている。今回、ボールとハウジングの接着剤として、エポキシ樹脂系のデブコン製 WR (Wear Resistant Liquid) を採用した。エポキシ樹脂とは分子中に 2 個以上のエポキシ基と呼ばれる反応基を持つ樹脂状物質で、優秀な接着性、硬化時の体積収縮が少ないこと、強靱性に優れていること、などがおもな特徴である。最近、その卓

越した特性を用いて、土木・建築、自動車産業をはじめ電気・電子、および通信機器、航空機の制御系のような信頼性を求める部分にまで広範囲に用いられている。

今回、選定にあたって考慮した WR は良好な接着性、強度、強靱性に加え、自己潤滑性があるので摺動磨耗が少ないことを特徴としている。その WR の物理的特性を表 2 に示す。

使用にあたっては、主剤と硬化剤を重量混合比で 9 対 1 に混ぜる。主剤と硬化剤を混ぜた後、温度が 25°C の時の硬化時間は 16 時間である。温度が 16°C 以下の場合、完全に硬化しないこともあるので温度に注意する必要がある。

2・4 離型剤 ボールをハウジングに入れる前に、ボールが接着剤によって接着されないように離型剤を塗付しなければならない。今回採用したデブコン製の離型剤 B-2 はパラフィン系の炭化水素化合物で、液状タイプより離型性に優れ、金属および非金属にも使用可能である。作業にあたっては、離型剤をハウジングのまわりにも塗布することで、接着剤がハウジングのまわりに付着することを防止できる。

一方、ボールと接着剤のすきまの大きさがボールジョイントの摩擦や誤差に大きな影響を与える。そこで離型剤として、液状タイプから現在用いているクリーム状、ろうそくのような個体まで数種類を試した。液状タイプは離型剤の膜が薄く、ボールとハウジングのすきまが小さくなり摩擦が大きい。それは、ならし動作を行ってもなめらかにならない。また、ろうそくを溶かして試したが、塗布膜が厚すぎて予想より大きいすきまが生じた。また、液状タイプの一部には接着剤と融合化を起こすものもあるので、接着剤 WR には離型剤 B-2 が最良だと考えられる。試作したボールジョイントを図 4 に示す。

3. 性能試験と考察

一般的にいうと、金属類に対してエポキシ樹脂は、低剛性、低負荷容量といった欠点を持っている。そこで、高精度なロボット部品としての実用性を判断するために、最大設計荷重による降伏点強度、球面部のすきま測定などの性能試験が必要である。試作したボールジョイントは、揺動角を大きくするためにハウジングの回転球保持部を球の赤道面近くまで下げてあり、市販の一般のボールジョイントより保持する力が弱くなる。また、金属製ハウジングの強さ、例えば、THK 社の RBL-5 D の亜鉛合金、ヒーハイト社の高炭素 Cr 軸受鋼(SUJ 2)と比較した軽合金製ハウジング中

Table 2 Physical characters of the epoxy-type bond, WR (excerpt from the catalogues)

Specific gravity	[g/cm ³]	1.8
Compressive strength	[kg/cm ²]	600 ~ 750
Tensile strength	[kg/cm ²]	250 ~ 300
Modulus of elasticity	[kg/cm ²]	5.3×10^4
Bending strength	[kg/cm ²]	400 ~ 500
Tensile shear strength	[kg/cm ²]	150 ~ 190

Fig. 4 A new ball joint

Fig. 5 Experiment performance of new ball joint

に充てんしたエポキシ樹脂の強さを確認しておく必要がある。その上で、エンドエフェクタが高速運動をするとき、アームとトラベリングプレートに連結されたロッドの両端に取付けたボールジョイントが目的に符合する十分な強さを持っているかどうかを調べるための、性能検査実験を行う必要がある。

3・1 降伏点強度とアキシャル方向の負荷容量
今回は、図 5 に示すようにボール軸に対して直角方向の降伏点強度 P_k とアキシャル方向における負荷容量を測定した。実験は引張試験機(ORIENTEC Tensnilon)と付属の 1000 N ロードセルを用いて行った。その結果を市販品のデータと比較して表 3 に示す。

また、アキシャル方向の引張実験の結果を図 6, 7 に示す。開発したボールジョイントは、HEXA ロボットの機構パラメータを変えずに使用できることを念頭に設計した。しかし、高速を特徴とする HEXA ロボットにとって、運動部の軽量化は特に重要である。そ

Table 3 Results of the experiment performance (THK's data excerpt from the catalogue)

Object of term		THK	New one
Clearance [mm]	Radial	0.02 ~ 0.06	0.02 ~ 0.06
	Axial	0.3 and less	0.02 ~ 0.06
Surrender strength P_k [N]		2250	1200
Axial applied load [N]		—	700

Fig. 6 Experimental results of the new ball joint performance (axial, $l_2=2.9$) Fig. 7 Experimental results of the new ball joint performance (axial, $l_2=1.4$)

ここで、試作ボールジョイントにおいても THK 社の製品と同サイズである 2.9 mm と、その部分だけを 1.4 mm とした、2 種類を試作した。実験の結果、 $l_2=2.9$ mm のハウジングが 700~900 N だったのに比べ、 $l_2=1.4$ mm のハウジングは約 300 N 減の 500 N になった。このことから、外周部の変形に下部の構造体の強度が大きく関わっていることがわかった。降伏点強度 P_k の実験は、ハウジングから鋼球が外れるまでラジアル方向に加重するわけだが、実験機の最大荷重まで加重し、鋼球のねじ部分が変形してもハウジングから外れることはなかった。この実験結果を図 8 に示す。さらに、変形した状態と球面座のエポキシのようすを図 9 に示す。

また、実用性に耐えるかどうかの判断には、THK においてボールジョイントを選定する基準として使っ

Fig. 8 Experimental results of the new ball joint performance (radial)

Fig. 9 Photos of the experimental results

Fig. 10 Clearance measurement of the ball joint

ている、安全係数を含めた許容荷重の関係式、式(1)に基づいて検討する。

$$p \leq \frac{P_k}{f_s} \quad (1)$$

ここで、 p は許容荷重、 P_k は降伏点強度、 f_s は安全係数である。安全係数 f_s は、一方向で一定荷重の時は 2~3、方向変動荷重 5~8 を考慮する。

3.2 球面部のすきま ロボットの精度に直接影響を与えると考えられる球面部のすきまについて、図 10 のような測定を行った。

測定は、図 5 で示したラジアル方向とアキシャル方向について、49 N まで荷重を変えて測定した。今回用いた測定器は電気マイクロメータで、 10^{-7} m まで測定可能である。その結果を、表 3 と図 11 に示す。

3.3 実験結果の考察 試作したボールジョイントを用いる HEXA ロボットの 6 本の、ロットが支えるエンドエフェクタの合計最大荷重は 100 N である。図 8 より、試作ボールジョイントの降伏点強度は約 1000 N である。すなわち、HEXA ロボットの六つの

ロッドが支えるエンドエフェクタの最大設計荷重が 100 N であるのに対して、試作ボールジョイント 1 個の降伏点強度は約 1 000 N である。安全係数(一方向で一定荷重: 2~3)を考慮した最大許容荷重 300 N より大きい。したがって、使用にあたって問題はないと考えられる。また、球面と球座面のすきまを見ると、試作品のラジアル方向のすきまとアキシアル方向のすきまは、ほとんど同じである。市販品は、ラジアル方向のすきまは同じ程度であるが、アキシアル方向のすきまが試作品に比べ約 10 倍程大きい。このことから、ロボットに用いる際の一つの欠点である関節部の精度問題をある程度改善できると考えられる。

4. 製作したボールジョイントの適用

4.1 パラレルロボット HEXA の安全ロッド
製作したボールジョイントを用いてパラレルロボット HEXA の新しいロッド部分を製作した。ボールジョイントを図 12 のようにロッドに取付けて、アームとトラベリングプレートの部分を連結する。

ここで、ボールジョイントに無理な力がかかった場合、ロボット本体が破損するのを防ぐための安全機構として、ボールジョイントあるいはロッドが外れるように設計する。しかし、予想外の暴走による使用者への危険があるため、トラベリングプレート部分が飛び出した場合の対策として、ボールジョイントあるいはロッドが壊れてもトラベリングプレート部分が飛びださないようにアラミド糸をロッドの中に通してアームとトラベリングプレート側両端を連結するようにした。今回採用した糸は東レ・デュポンのケブラーミシン糸で、直径 1.0 mm、引張強度は 600 N、伸度は 4% である。このような安全を確保するための糸には、全体の負荷を支えるための十分な強さと、システムの運動に影響を及ぼさないことを考慮して選択する必要がある。現在、さまざまなものを比較検討中である。製作したロッドを HEXA ロボットに装着したようすを図 13 に示す。

4.2 揺動角の変更による作業領域比較 揺動角の変更によってロボットの作業領域にどのような影響が与えられるかをシミュレーションで調べた。ロッドのボールジョイントの揺動角がアーム側とトラベリングプレート側両方ともに 40° と 25° のとき、トラベリングプレートの姿勢(roll, pitch, yaw)をそれぞれ -10° から +10° まで回転させ、HEXA ロボットの作業領域を求めた。その結果の三次元グラフと体積を計算して図 14 と表 4 に示す。

結果は、図 14 を見るとおおよそ推察できると考え

るが、表 4 の数値を比較すると、40 deg 揺動角のボールジョイントを用いたロッドの可動作業体積が 25 deg 揺動角のボールジョイントを用いたロッドの可動作業体積に比べて約 4 倍大きいことがわかる。

4.3 比較実験 実用化と安全性を検証するため、従来のボールジョイントと今回試作したボールジョイントを新たに製作したロッドに装着した。そのロッドを用いて、HEXA の高速動作実験を行い、モータ付属

Fig. 11 Experimental results of the new ball joint performance (clearance)

Fig. 12 Newly designed rod

Fig. 13 Configuration of rods that attached to HEXA

の光学式エンコーダ値から算出される手先軌道追従性を調べた。実験は図 15 に示すように、自由空間で、 x 軸 0.05 m、 y 軸 0.1 m のだ円を z 軸の回りに 45° 、 y 軸の回りに 45° 回転した軌道について行い、PD 制御を用い 0.5 s で 1 周を運動させた。実験は比較のため、THK 製のボールジョイントを用いたロッドと試作の

ボールジョイントを用いたロッドで行った。THK 製のボールジョイントは、試作ボールジョイントと同じ揺動角 (40°) まで追加工したもので、現在、この形式のものを手に入れることは難しい。

実験の結果を図 16 に示した。結果を見ると、図 16(a) に示すように軌道位置の追従性は以前のボールジョイントと比べ差異がほとんどない。しかし、図 16(b) の角速度は、従来のボールジョイントに比べ振動が発生することがわかる。図 16(c) は図 16(b) の

Table 4 Workspace volume of the different swing angles of the ball joint with the HEXA robot

Swing angle of ball joint	Workspce volume
25 [deg]	$14.5 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$
40 [deg]	$57.2 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$

(a) Swing angle: 40 deg (b) Swing angle: 25 deg

Fig. 14 Workspace for the different two swing angles

Fig. 15 Ellipsoid trajectory for experiment

Fig. 16 Results of comparing the experiment

各モータ 1, 3, 5 の角速度の一部を拡大したものである。このことから考えると、振動は新、旧のボールジョイント両方に生じていることがわかる。振動の原因はよくわからないが、HEXA ロボットに用いるモータは、横河プレジジョン製のダイレクトドライブモータ DM 1015 B で、回転部に予圧がかけられたクロスローラベアリングが使用されているため、振動が生じると考えられる。クロスローラベアリングのローラガイドレールとローラが予圧によって変形してしまっている可能性があり、この変形の影響が振動として表れていると考えられる。図 16(c) の開発したボールジョイントが従来のボールジョイントより振動が大きく、また運動の前半より後半部分が振幅が大きくなる理由は、ボールの精度がよくなったことによりモータ軸受部の振動がエンドエフェクタまでダイレクトに伝わって共振が生じるためか、ボールの回転運動の潤滑性が足りないためと思われる。

5. お わ り に

エポキシ樹脂系接着剤を用い製作した、広い揺動角をもつボールジョイントについて提案した。また、製作したボールジョイントの強度と精度について調べた。さらに、ケブラーミシン糸を用いてシステムの安全性を向上させたパラレルマニピュレータのロッドについて提案した。提案したボールジョイントの特徴は、一般の市販品に比べ格段に安価で、しかも研究室のレベルで簡単に作ることができ、許容揺動角範囲内で希望の効果が得られるという特徴をもっている。今

後の改善点としては、製作の際にボールジョイントの摩擦が異なるので、これを均質に低摩擦とすることが挙げられる。また、低速に動作する場合は問題ないが、高速動作を行う場合に振動が起こる問題について原因を究明する必要がある。

文 献

- (1) Craig, J., Introduction to Robotics Mechanics and Control, Second Edition, Addison-Wesley, (1989).
- (2) 武田行生・舟橋宏明・村松伸幸, 任意の出力節姿勢角がとれる実用作業領域に優れた 3 自由度平面パラレルメカニズム, 機論, 62-599, C(1996), 414-410.
- (3) Lee, M. K., Design of a high stiffness machining robot arm using double parallel mechanism, *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 234-240.
- (4) Tanikawa, T., Arai, T., Ojara, P. and Saeki, M., Two-finger micro hand, *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 1674-1679.
- (5) Merlet, J.-P., Trajectory verification in the workspace for parallel manipulators, *Int. J. Robotics Research*, 13-4 (1994), 326-333.
- (6) 佐渡友哲也・内山勝, パラレルロボット HEXA の作業領域解析, 日本ロボット学会誌, 11-11 (1993), 843-846.
- (7) Takeda, Y., Funabashi, H., Kimura, M. and Hirose, K., Development of a Spatial Six-Degree-of-Freedom In-Parallel Actuated Worktable with Rolling Spherical Bearings, *Proc. 1999 Int. Conf. Advanced Robotics*, (1999), 551-556.
- (8) Uchiyama, M., Imura, K., Pierrot, F., Dauchez, P., Unno, K., and Toyama, O., A New Design of a Very Fast 6-DOF Parallel Robot, *Proc. 23rd Int. Symp. Industrial Robots*, (1992), 771-776.
- (9) Kim, D. and Uchiyama, M., A Force/Torque Sensorless Realization of Fast and Dexterous Tasks with a Parallel Robot, *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Industrial Electronics Control Instrumentation*, (2000), 223-228.