

## รายการอ้างอิง

- [1]. Gregory J. Hamlin and A. C. Sanderson, (1994) "A Novel Concentric Multilink Spherical Joint with Parallel Robotics Applications" , to be published in the IEEE,
- [2]. Wannasuphoprasit, W., (1999), "Cobots: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University
- [3]. Wannasuphoprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. A. and Colgate, J. E., (1998), "Cobot, A Novel Material Handling Technology," 98-WAMH-2, Present at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California
- [4]. W. Wannasuphoprasit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, (1997) "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576,
- [5]. Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphoprasit, W., (1996), "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on, Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544.
- [6]. M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphoprasit, B. Gillespie, C. Moore, "Cobot architecture", to be published in the IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- [7]. C. Moore, (1997) "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March.
- [8]. G. Bachman, (1997) "An Experimental Investigation of the Cobot Wheel Contact Patch", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March
- [9]. Carl A. Moore, Michael A. Peshkin, J. Edward Colgate, "Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions"
- [10]. B. Gillespie, J.E. Colgate, M. Peshkin, (2001) " A General Framework for Cobot Control ", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, August 2001

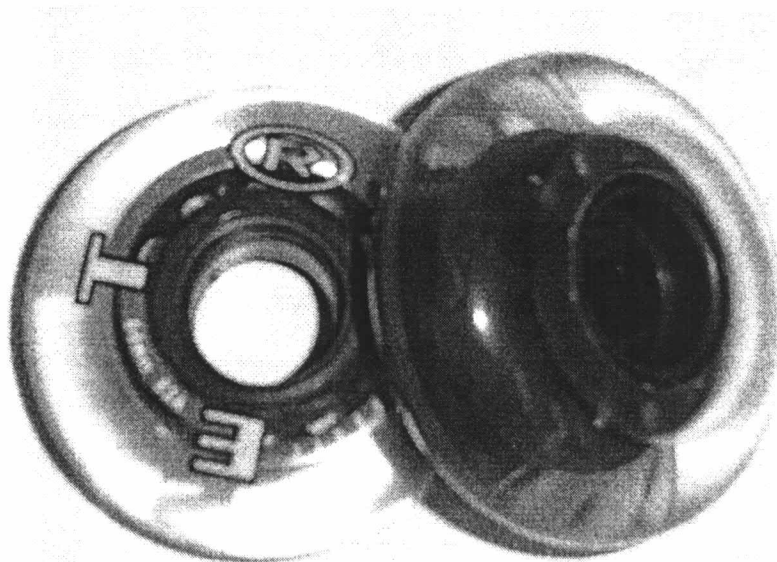
- [11]. P. Akella, M. Peshkin, J.E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, N. Nagesh, J. Wells, S. Holland, T. Pearson, B. Peacock, (1999) "Cobot for the automobile assembly line", IEEE International Conference on Robotics and Automation,
- [12]. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล, (พ.ศ. 2544) "Serial-Link Cobot", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พ.ศ. 2544
- [13]. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, (พ.ศ. 2544) "การออกแบบและควบคุม ISVT", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พ.ศ. 2544
- [14]. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, (พ.ศ. 2545) "หุ่นยนต์โคบอทสามมิติ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 พ.ศ. 2545
- [15]. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และ ศุภพน จันทรพัฒน์, (พ.ศ. 2545) "รูปแบบใหม่ของหุ่นยนต์โคบอท", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 พ.ศ. 2545
- [16]. W. Wannasuphoprasit, S. Sirikasemsuk, (2002) "The Design and Development of 3DP Cobotic Manipulator", Proceedings of IMECE,
- [17]. Wannasuphoprasit W., Sirikasemsuk S., (2002) "On development of a 3D passive manipulator" 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on, Volume: 2, pp. 1285-1289
- [18]. Gregory J. Hamlin, A. C. Sanderson, (1994) "A Novel Concentric Multilink Spherical Joint with Parallel Robotics Applications", IEEE International Conference on Robotics and Automation., Vol. 2, pp. 1267-1272
- [19]. Santos, M.J., (1997) "Extreme Joystick : A Cobot with Stored Energy", Ph.D. Proposal, Mechanical Engineering Department, Northwestern University.
- [20]. บรรเลง ศรีนิต และ ผศ.ประเสริฐ กัญจนบุรณ, (พ.ศ. 2524) หนังสือ "ตารางงานโลหะ", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร
- [21]. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, (พ.ศ. 2546) "จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแกนกลสามมิติ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
- [22] John J. Craig, "Introduction to Robotics mechanics and control, 2<sup>nd</sup>", Addison-Wesley Publishing Company

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## รายละเอียดของอุปกรณ์

## ก.1. ล้อโรลเลอร์เบรด (Roller Blade)

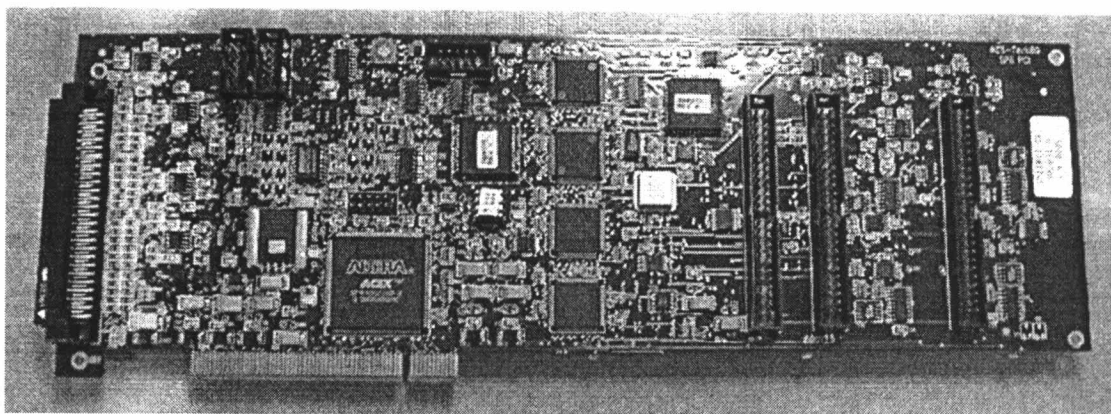


รูปที่ ก.1 ล้อโรลเลอร์เบรด

## รายละเอียดของอุปกรณ์

- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 64 มม.
- กว้าง 24 มม.
- วัสดุเป็นยางสังเคราะห์ สีขาวใส

## ก.2. แผงวงจร SPii PCI Controller



รูปที่ ก.2 แผงวงจร SPii PCI Controller

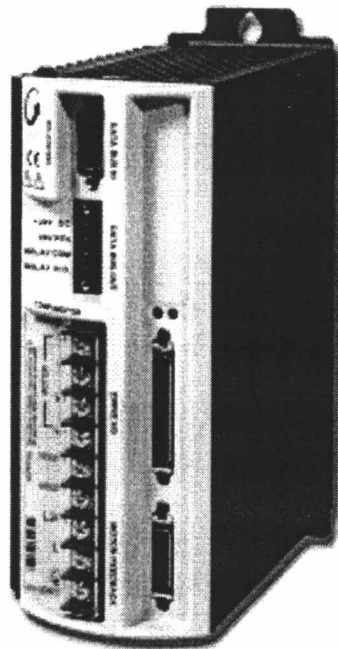
### รายละเอียดของแผงวงจร SPii PCI Controller

- ใช้ช่องเสียบบนคอนพิวเตอร์แบบ PCI
- สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ 4 ชนิด ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์แบบสแต็ปเปอร์ เอ็นโคเดอร์ และสวิทช์
- มีช่องทางในการติดต่ออุปกรณ์ภายนอกได้ 8 ช่องทาง
- มีช่องสัญญาณแบบดิจิทัล ทั้งสัญญาณเข้าและสัญญาณออก 8 ช่องสัญญาณ
- รูปแบบการนับจะนับได้ทั้งแบบควอดราเจอร์, นับสัญญาณขาขึ้นลง และนับสัญญาณพัลส์และทิศทาง
- มีส่วนประมวลผลในตัว
- มีอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณอนาลอก ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล
- มี Driver สำหรับโปรแกรม "Microsoft Visual C++ .NET"

### ก.3. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น GV-6UE

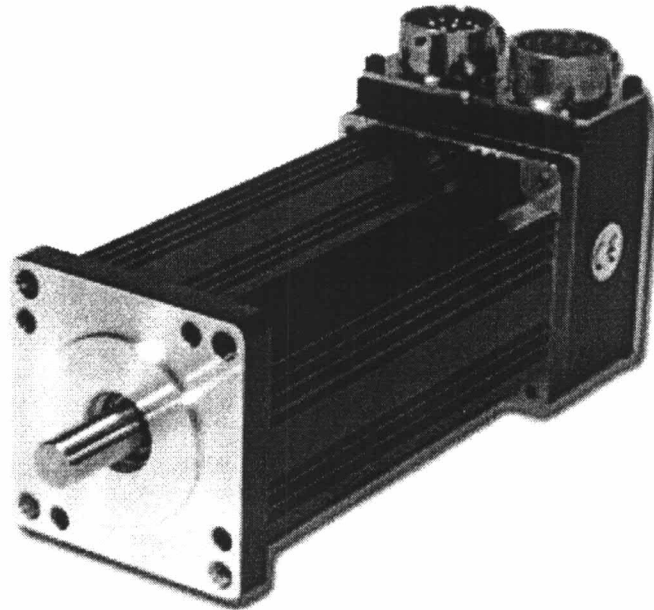
รายละเอียดของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น GV-6UE

- รับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาลอกได้ +10 V, -10 V
- สามารถใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ยี่ห้อ Parker รุ่น SM233-AE
- มีช่องรับสัญญาณเอ็นโคเดอร์ และส่งออกได้
- สามารถโปรแกรมการทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ ก.3 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ยี่ห้อ Parker รุ่น GV-6UE

#### ก.4. มอเตอร์ไร้แปรงถ่านยี่ห้อ Parker รุ่น SM233-AE

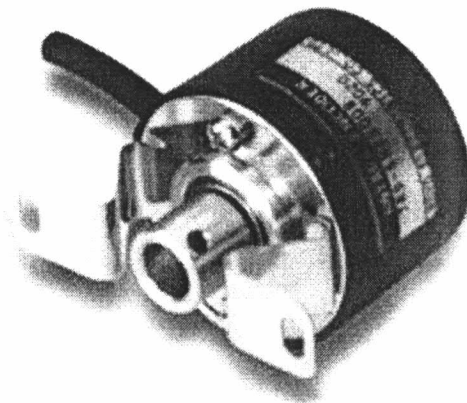


รูปที่ ก.4 มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ยี่ห้อ Parker รุ่น SM233-AE

#### รายละเอียดของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ยี่ห้อ Parker รุ่น SM233-AE

- เป็นมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน
- ให้ทอร์กสูงสุดเท่ากับ 3.78 นิวตันเมตร
- ความเร็วสูงสุดที่ 6000 รอบต่อนาที
- ติดตั้งเซ็นโคดเดอร์ขนาด 1000 ppr

### ก.5. เอ็นโคดเดอร์ Koyo TRD-SH2500VA



รูปที่ ก.5 เอ็นโคดเดอร์ Koyo TRD-SH2500VA

#### รายละเอียดของเอ็นโคดเดอร์

- ความละเอียด 2500 ppr
- สัญญาณจ่ายออกเป็นแบบ Line driver 5 โวลต์
- ขนาดรูเพลา 8 มม.
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเรือนเอ็นโคดเดอร์ 38 มม.
- แรงบิดขณะเริ่มต้นสูงสุด 0.001 นิวตัน-เมตร
- รับภาระสูงสุดในแนวรัศมี 20 นิวตันและแกน 10 นิวตัน
- ความเร็วสูงสุด 6000 รอบต่อนาที
- ความยาวสายเคเบิล 2 เมตร น้ำหนัก 150 กรัม



## ภาคผนวก ข.

### โปรแกรมที่ใช้จำลองการทำงานของเครื่องเคลื่อนที่ของแขนกล

ในภาคผนวกนี้เป็นการแสดงการเขียนโปรแกรมสำหรับการทดลอง เพื่อทดสอบและสามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถที่จะทำงานได้จริง โปรแกรมที่จะแสดงต่อไปนี้จะใช้โปรแกรม "Matlab" และโปรแกรม "Microsoft Visual C++ .NET" เป็นโปรแกรมหลักในการใช้งาน

#### ข.1 โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทในแนวการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

โปรแกรมนี้จะใช้ใช้การประมวลผลบน Matlab โดยเขียนโปรแกรมด้วย M-file editor ทำงานโดยการจำลองการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลแบบเส้นตรง เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อ ต่อตำแหน่งของแกนล้อที่เปลี่ยนไป

#### โปรแกรมหลักที่ใช้ประมวลผล

```
clear all
```

```
close all
```

```
clc
```

```
L1=400;
```

```
L2=250;
```

```
p=2;
```

```
x0 = 250;
```

```
y0 = 0;
```

```
z0 = 400;
```

```
s=-100:0.1:100; % Variable distance
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Straight Line Equation
```



```

a=sqrt(y.^2+z.^2);
c=(x.^2+y.^2+z.^2+L1^2-L2^2)/2/L1;
d=(x.^2+y.^2+z.^2-L1^2-L2^2)/2/L1;
r=sqrt(x.^2+y.^2+z.^2);
b= (-x);

```

```

Th1=atan(y./z);
for l=1:size(Th1'),
    if (Th1(l) >=(pi/2))
        |
    elseif(Th1(l)<=(-pi/2))
        |
    end
end
end

```

```

Th2=acos(c./r)-atan(x./a);
for l=1:size(Th2'),
    if (Th2(l) >=(pi/2))
        |
    elseif(Th2(l)<=(-pi/2))
        |
    end
end
end

```

```

Th3=asin(d./L2);

for l=1:size(Th2'),
    if (Th2(l) >=(pi/2))
        |
    elseif(Th2(l)<=(-pi/2))
        |
    end
end

```

```

    end
end

figure
plot(Th1,Th2)
grid on
xlabel('Position in Joint 1 (Red.)')
ylabel('Position in Joint 2 (Red.)')

figure
plot(Th1,Th3)
grid on
xlabel('Position in Joint 1 (Red.)')
ylabel('Position in Joint 3 (Red.)')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%    Jacobian
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
c1 = cos(Th1);    %
s1 = sin(Th1);   %
c2 = cos(Th2);   %
s2 = sin(Th2);   %
s23 = sin(Th2+Th3); %
c23 = cos(Th2+Th3); %

for l=1:size(Th2'),

    Jr(:,l) = [0 -L2*s23(l)-L1*c2(l) -L2*s23(l)
               L2*c1(l)*s23(l)+L1*c1(l)*c2(l) L2*s1(l)*c23(l)-L1*s1(l)*s2(l) L2*s1(l)*c23(l)
               -L2*s1(l)*s23(l)-L1*s1(l)*c2(l) L2*c1(l)*c23(l)-L1*c1(l)*s2(l) L2*c1(l)*c23(l)];
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%      Joint Velocity
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Tr=[A;B;C];
```

```
for l=1:size(Th2'),
```

```
    Vj(:,l) = inv(Jr(:, :, l))*Tr;
```

```
    Tj(:,l) = Vj(:,l)/sqrt(Vj(1,l)^2+Vj(2,l)^2+Vj(3,l)^2);
```

```
end
```

```
clear Vj
```

```
clear Tr
```

```
clear Jr
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%      Spherical Space
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Thx = (-Th1)-p.*sin(Th2).*Th3;
```

```
Thy = (-cos(Th1)).*Th2+p*(cos(Th2)).*(sin(Th1)).*Th3;
```

```
Thz = (sin(Th1)).*Th2+p*(cos(Th2)).*(cos(Th1)).*Th3;
```

```
figure
```

```
plot(Thx,Thy)
```

```
grid on
```

```
xlabel('Sphere Position in Axis x (Red.)')
```

```
ylabel('Sphere Position in Axis y (Red.)')
```

```
figure
```

```
plot(Thx,Thz)
```

```
grid on
```

```

xlabel('Sphere Position in Axis x (Red.)')
ylabel('Sphere Position in Axis z (Red.)')

for l=1:size(Th2'),
    Js(:,l)=[-1 -p*c2(l)*Th3(l) -p*s2(l)
             s1(l)*Th2(l)+p*c2(l)*c1(l)*Th3(l) -c1(l)-p*s2(l)*s1(l)*Th3(l) p*c2(l)*s1(l)
             c1(l)*Th2(l)-p*c2(l)*s1(l)*Th3(l) s1(l)-p*s2(l)*c1(l)*Th3(l) p*c2(l)*c1(l)];
end

for l=1:size(Th2'),
    Vb(:,l) = Js(:,l)*Tj(:,l);
    Tb(:,l) = Vb(:,l)/sqrt(Vb(1,l)^2+Vb(2,l)^2+Vb(3,l)^2);
end

clear Js
clear Vb

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           Steering Space
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for l=1:size(Th2'),
    Phi1(l) = atan2(((1/sqrt(6)*Tb(1,l))+(1/sqrt(2)*Tb(2,l))-(1/sqrt(3)*Tb(3,l))), (...
                   (1/sqrt(6)*Tb(1,l))-(1/sqrt(2)*Tb(2,l))-(1/sqrt(3)*Tb(3,l)));

    Phi2(l) = atan2(((1/sqrt(6)*Tb(1,l))-(1/sqrt(2)*Tb(2,l))-(1/sqrt(3)*Tb(3,l))), ((1/sqrt(6)*Tb(1,l))...
                   +(1/sqrt(2)*Tb(2,l))-(1/sqrt(3)*Tb(3,l)));

    Phi3(l) = atan2(((1/sqrt(6)*Tb(1,l))-(1/sqrt(2)*Tb(2,l))-(1/sqrt(3)*Tb(3,l))), ((...
                   -sqrt(2/3)*Tb(1,l))-(1/sqrt(3)*Tb(3,l)));
end

figure

```

```
plot(s,Phi1)
grid on
xlabel('Distance of End Effector')
ylabel('Position in Wheel 1 (Red.)')
```

```
figure
plot(s,Phi2)
grid on
xlabel('Distance of End Effector')
ylabel('Position in Wheel 2 (Red.)')
```

```
figure
plot(s,Phi3)
grid on
xlabel('Distance of End Effector')
ylabel('Position in Wheel 3 (Red.)')
```

ภาคผนวก ค.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



## การออกแบบและควบคุม ISVT Design and Control ISVT

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพมหานคร 10330, โทร 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-8889, E-Mail : fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th

Witaya Wannasuphprasit and Sirisak Sirikasemsuk  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
Bangkok 10330, Thailand, Tel : (662)0-2218-6610-1, Fax : 0-2252-8889

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบทางกล (เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม) ได้มีการนำระบบส่งถ่ายกำลัง (transmission) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ อย่างมาก แต่อัตราทดที่ได้จากระบบส่งถ่ายกำลัง ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นจะมีข้อจำกัดในด้านของอัตราทด (transmission ratio) เป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น อัตราทดคงที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร หรืออัตราทดปรับได้แบบขั้นบันไดในเกียร์รถยนต์ และอัตราทดปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องเช่น belt-drive CVT (Continuous Variable Transmission) แต่อัตราทดอยู่ในช่วงที่จำกัด ในบทความนี้ขอเสนอการศึกษา ออกแบบ พัฒนา และควบคุม ISVT: *Infinitely Stepless Variable Transmission* ซึ่งเป็นระบบส่งถ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่อง และมีช่วงอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ISVT นั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการทำงานวิจัยขั้นสูงที่จะทำต่อเนื่องจากผลงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย Haptic Interface, Passive Robots, รวมถึงการทำงานของมนุษย์กับหุ่นยนต์.

### Abstract

Transmissions are necessary elements in mechanical systems such as robots. A transmission ratio is selected to optimize power transfer efficiency. Most of transmissions have a fix transmission ratio. Sometimes we do need to optimized power transfer for several conditions. An adjustable step-ratio transmission such as car transmissions can be used for that purpose. In this work we design and develop a transmission that can adjust its ratio continuously from  $-\infty$  ถึง  $\infty$  called ISVT: *Infinitely Stepless Variable Transmission*. The ISVT is an essential element in a novel class of human-robot interaction devices called *Cobot: Collaborative Robot*.

### 1. บทนำ

ระบบส่งกำลังในปัจจุบันเช่นระบบส่งกำลังในรถยนต์หรือในอุปกรณ์ทางกล โดยมากจะมีอัตราทดคงที่ค่าหนึ่ง แต่การใช้งาน

บางอย่างต้องการอัตราทดที่มีมากกว่าหนึ่งค่า ทำให้เกิดระบบส่งกำลังแบบปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดได้ เช่นระบบเกียร์ในรถยนต์ แต่การปรับเปลี่ยนอัตราทดยังเป็นแบบขั้นบันได (เกียร์หนึ่งไปเกียร์สองเป็นต้น) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งถ่ายกำลังจึงได้มีการพัฒนาระบบส่งกำลังที่มีการปรับอัตราทดแบบต่อเนื่องขึ้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการออกแบบ และพัฒนาระบบส่งกำลังแบบปรับอัตราทดต่อเนื่องโดยมีช่วงอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ที่เรียกว่า ISVT: *Infinitely Stepless Variable Transmission* ซึ่งใช้หลักการของแรงเสียดทานซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

ในส่วนแรกจะพูดถึงระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องแบบอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นหลักการทำงาน จากนั้นจึงเป็นการอธิบายถึงหลักการการทำงานของ ISVT แบบต่างๆ

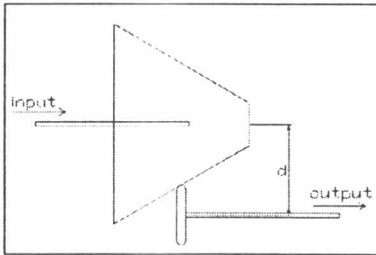
ในหัวข้อที่ 3-จะอธิบายถึงการออกแบบ ISVT รวมทั้ง Kinematics ของ ISVT ท้ายสุดจะกล่าวถึงการใช้งานของ ISVT ในงานวิจัยด้านการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์กับมนุษย์ *Cobots: Collaborative Robots*.

### 2. Reviews of CVTs

เนื่องจากอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง (transmission) นั้นได้มีการพัฒนามานานร่วมร้อยปีแล้วแต่อุปกรณ์ชนิดนี้ ก็ยังถูกจำกัดเป็นอย่างมากของลักษณะอัตราทดที่ได้ดังจะเห็นได้ในปัจจุบันที่เครื่องจักรกลส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วที่มีอัตราทดเป็นแบบขั้นบันไดอยู่ ตัวอย่างเช่น รถยนต์นั่งทั่วไปที่เกียร์มีอัตราทดจำกัดอยู่แค่ 3-6 อัตราเท่านั้น อุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง อีกประเภทหนึ่งซึ่งจะมีลักษณะของการเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง (CVT: *Continuous Variable Transmission*) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ทั้งในเรื่องอัตราทดที่ได้จากการปรับเปลี่ยนจะมีช่วงที่เล็กมากและส่วนใหญ่จะไม่สามารถให้อัตราทดที่เป็นลบได้ สำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลังแบบต่อเนื่องนี้ได้มีหลักการมากมายดังจะแสดงต่อไป

2.1 Cone Friction CVT

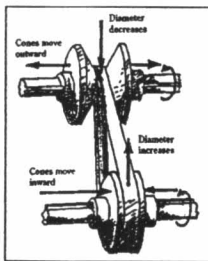
CVT แบบ Cone friction นี้จะใช้หลักการที่ค่อนข้างง่ายซึ่งหลักการในการปรับเปลี่ยนอัตราทดในแบบนี้จะใช้วิธีเปลี่ยนระยะห่างศูนย์กลางของเฟลา input กับเฟลา output (ระยะ d) โดยให้ล้อและกรวยสัมผัสกันตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียก็คือเมื่อต้องการเปลี่ยนอัตราทดระยะห่างระหว่างเฟลาทั้งสอง (ระยะ d) จะต้องเปลี่ยนแปลงตลอด และช่วงของอัตราทดที่ได้ยังมีค่าจำกัด



รูปที่ 1 แสดง CVT แบบ Cone friction

2.2 V-belt CVT

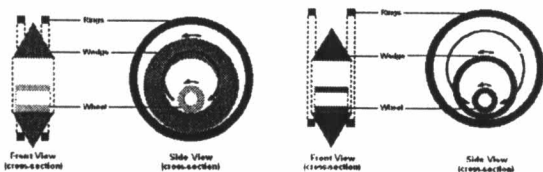
หลักการในการเปลี่ยนอัตราทดของแบบ V-belt จะใช้วิธีเปลี่ยนความกว้างของพูเล่ เพื่อที่จะทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางเปลี่ยนขนาดดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจากวิธีการที่สามารถเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางได้นี้ส่งผลให้สามารถที่จะเปลี่ยนอัตราทดได้ แต่การเปลี่ยนอัตราทดวิธีนี้นั้นช่วงของอัตราทดที่ได้ก็ยังมีขนาดท่อยู่ อย่างไรก็ตาม CVT แบบ V-belt นี้ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2 แสดง CVT แบบ V-belt. Source from [10]

2.3 DECC Drive CVT [9]

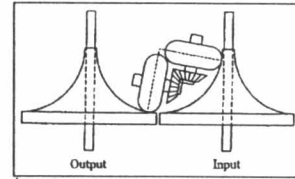
อุปกรณ์การเปลี่ยนความเร็วแบบ DECC (The Double-Eccentric Continuously Variable Transmission) จะใช้วิธีการเปลี่ยนอัตราทดโดยการปรับระยะห่างของวงแหวนทำให้ effective radius ของ wedge เปลี่ยนไปดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3 โดยที่ล้อ (wheel) จะโคจรรอบวงแหวน (ring) และในขณะเดียวกันจะขับ wedge ให้โคจรรอบวงแหวนด้วยความเร็วเชิงมุมที่ต่างกัน อัตราส่วนความเร็วเชิงมุมของวงโคจรทั้งสองขึ้นอยู่กับระยะห่างของวงแหวน



รูปที่ 3 DECC Drive CVT Source from [9]

2.4 แบบ Beltless CVT

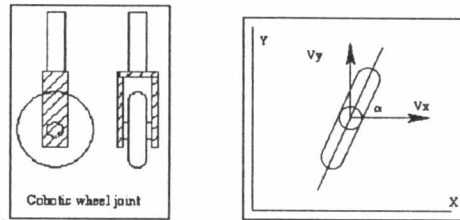
Beltless CVT เป็นรูปแบบของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วอีกแบบหนึ่ง ที่ได้ใช้ลูกกลิ้งมาช่วยในการปรับเปลี่ยนอัตราทด วิธีการในการเปลี่ยนอัตราทดวิธีนี้จะใช้วิธีเปลี่ยนตำแหน่งของลูกกลิ้งไปบนกรวยสองอันดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งใน CVT แบบ Beltless แบบนี้นั้นแม้ว่าจะคล้ายกับแบบ ISVT ของงานวิจัยชิ้นนี้แต่ก็ยังมียข้อเสียก็คือช่วงที่ได้จากอัตราทดแบบนี้จะมีขนาดจำกัดและไม่สามารถปรับให้มีอัตราทดที่เป็นลบได้



รูปที่ 4 Beltless CVT Source from [10]

2.5 Wheel CVT

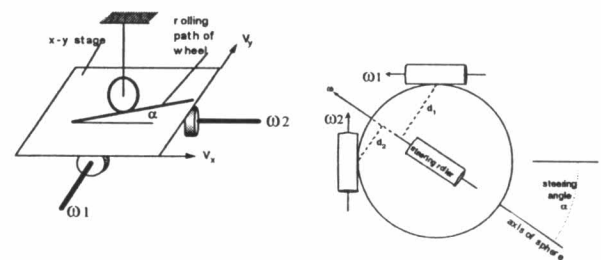
ล้อ (Wheel) คือ CVT ที่มีมานานที่สุดนอกจากนั้น ล้อยังเป็น CVT Mechanism ที่มนุษย์มองข้ามมาช้านาน Wheel เป็น CVT ที่กำหนดอัตราทดระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x และ ในแนวแกน y โดยที่อัตราทดปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  อัตราทดของ  $V_y$  และ  $V_x$  เท่ากับ  $\tan(\alpha)$



รูปที่ 5 แสดง Wheel Joint CVT ที่ใช้ใน Cobots: Source from [1]

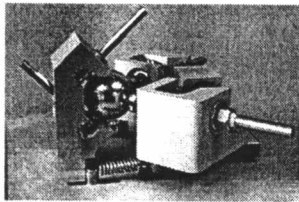
Wheel CVT นั้นเป็น กลไกที่ง่ายต่อการใช้งาน ในปี 1995 Wannasuphprasit [1,2,3,4] ได้นำเอา Wheel CVT ใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ Haptic Interface ที่ทำให้เป็นระบบ passive ที่ไม่ dissipate energy ได้เป็นครั้งแรกและต่อมาได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็น Cobots : Collaborative Robots

2.6 Spherical CVT



รูปที่ 6 แสดง หลักการของ Spherical CVT [6]

พิจารณารูปที่ 6 (ซ้าย) ถ้าเรานำเอา wheel มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ  $V_y$  และ  $V_x$  จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม  $\alpha$  (steering angle) ของล้อโดยที่  $V_y / V_x = \tan(\alpha)$  ในขณะที่เดียวกันถ้าเราใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น  $V_x$  และ  $V_y$  ให้เป็นความเร็วเชิงมุม  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ดังรูปที่ 6 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ถ้าเราม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูป 6 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของ steering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle ( $\alpha$ ) แกนของ steering rollers ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ  $\omega_1$  และ ล้อขับ  $\omega_2$ ) เปลี่ยนไป และดังนั้นให้อัตราการเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตรา  $\omega_1 / \omega_2$  เท่ากับ  $d_1 / d_2$  เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ. Moore [6] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ และเรียกว่า tetrahedral CVT (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 Tetrahedral CVT: Source from [6]

3. การออกแบบ High power ISVT:

*Infinitely Stepless Variable Transmission*

จุดประสงค์ในการออกแบบและสร้าง ISVT ของผู้วิจัยคือ 1) ต้องการสร้าง ISVT ที่มีขนาดและส่งกำลังได้สูง 2) ต้องการใช้ต้นแบบนี้ในการศึกษาและทดลองหาค่าและความสัมพันธ์ของ parameters ต่างๆ ที่สำคัญเช่น กำลังสูงสุดที่รับได้, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวและ rollers, แรง preload, ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายกำลัง 3) เพื่อนำเอา ISVT ไปใช้ในงานประยุกต์ต่างๆ และงานวิจัยทางด้านการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ เช่น Cobots.

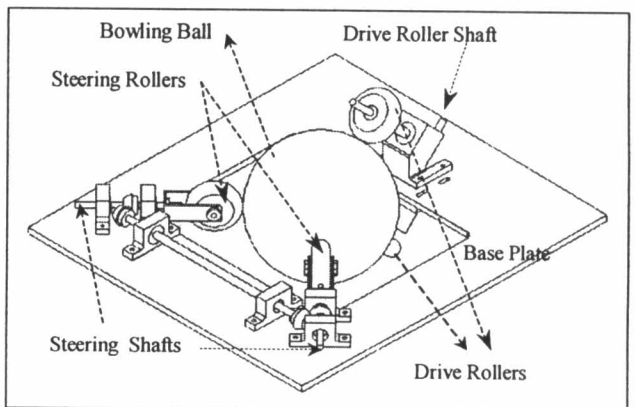
คณะผู้วิจัยต้องการออกแบบ ISVT ที่ปรับอัตราของความเร็วเชิงมุมเพราะนำมาใช้ได้กับงานหลายประเภท รวมทั้งการใช้งานในแขนกลของCobot [8] จากreviews CVT ลักษณะต่างๆในข้างต้นพบว่า Tetrahedral CVT เป็นโครงสร้างที่ง่ายและเหมาะสมและต้องการอุปกรณ์หลักแค่ ทรงกลม และ rollers 4 ตัวเท่านั้น

วัสดุที่ใช้ใน Tetrahedral CVT จะเป็นโลหะเหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้กำลังงานของงานวิจัยชิ้นนี้มีขนาดเล็กที่น้อยมากเนื่องจากแรงเสียดทานที่ได้จากลูกล้อที่เป็นเหล็กสัมผัสกับลูกทรงกลมที่ทำมาจากโลหะเช่นกันจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นเมื่อถ้าเราต้องการทำให้ CVT ในงานวิจัยชิ้นนี้มี

กำลังงานสูงขึ้น จะเป็นไปได้ก่อนข้างยากอันเนื่องมาจากข้อจำกัดต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เนื่องจากมีความต้องการจะทำการออกแบบและพัฒนา ISVT เพื่อที่จะนำมาทำการศึกษาดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเพิ่มขนาดของทรงกลม เพื่อที่จะทำให้เกิดความสะดวกและง่ายแก่การที่จะทำการศึกษารูปแบบใดก็ตาม ในการสร้าง ISVT ให้มีขนาดใหญ่ ถ้าเราใช้วัสดุที่เป็นเหล็กทั้งลูกล้อและลูกทรงกลมจะส่งผลให้น้ำหนักของ ISVT มีน้ำหนักสูงมากและในขั้นตอนการสร้างจะมีปัญหายุ่งยากมาก และการหาทรงกลมวัสดุอื่น ๆ ที่มีขนาดใหญ่และมีความเที่ยงตรงไม่ใช่เรื่องง่ายนัก อย่างไรก็ตาม ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเลือกลูกทรงกลมเป็นลูกโบว์ลิ่งที่ยังไม่เจาะรู มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกโบว์ลิ่งขนาด 8.5 นิ้ว น้ำหนักเท่ากับ 8 ปอนด์ ผิวของลูกโบว์ลิ่งทำจากโพลีเอสเตอร์และมีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ และเลือกลูกล้อ roller เป็นลูกล้อ Roller blade ที่ทำจากโพลียูรีเทน มี Profile เป็นแบบ Tapered Radius เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 72 mm. Durometer เท่ากับ 84A ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทั้งสองนั้นจะมีอัตราส่วนประมาณ 1 ต่อ 3 ซึ่งเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างมาก [6] จากเอกสารอ้างอิง[8] ได้ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ) ของล้อที่มีลักษณะเช่นเดียวกับลูกล้อที่ทางคณะผู้วิจัยเลือกใช้กับพื้นผิวที่วัสดุเป็นกระจุก ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้มีค่าเท่ากับ 0.5973 ดังนั้นจากผิวของอุปกรณ์ทั้งสองนั้นที่ทำจากโพลียูรีเทนและโพลีเอสเตอร์ทำให้เราสามารถพอที่จะทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตว่ามีมากพอเพียง (โดยจะทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ) หลังจากการสร้างต้นแบบแล้ว) และที่สำคัญอุปกรณ์ทั้งสองนั้นเป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในเมืองไทย

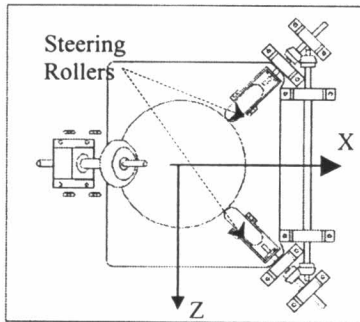
การเพิ่มขนาดของลูกทรงกลมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและจากการที่ได้เพิ่มขนาดของลูกทรงกลมให้ใหญ่ขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดน้ำหนักของลูกทรงกลมให้เพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้ไม่สมารถที่จะละเลยน้ำหนักและความเฉื่อยเชิงมุมของลูกทรงกลม



รูปที่ 8 High Power ISVT: Infinitely Stepless Variable Transmission

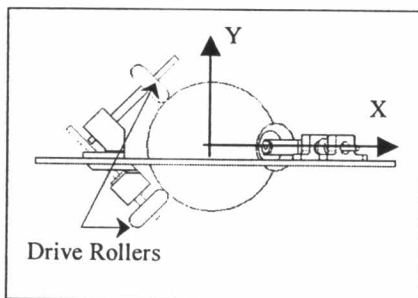
จากข้อมูลในหัวข้อต่างๆ ข้างต้นทำให้เราสามารถที่จะออกแบบรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ ได้ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งในรูปนี้เป็น

รูปที่ได้จาก wireframe ในโปรแกรม CAD ที่พร้อมจะสร้างได้จริง ขนาดของระบบ ISVT ที่ได้ทำการออกแบบไว้จะมีขนาดประมาณ ความกว้างเท่ากับ 540 mm. ความยาวเท่ากับ 600 mm. และความสูงมีค่าเท่ากับ 290 mm. มีฐานที่อยู่ในตำแหน่งเกือบจะกึ่งกลางของลูกโบว์ลิ่ง เหตุผลที่ออกแบบไว้เช่นนี้เนื่องจากเพื่อต้องการออกแบบให้ส่วนประกอบต่างๆ ของโครงสร้างมีน้ำหนักที่น้อยที่สุดและง่ายต่อการสร้างและประกอบ ISVT ที่ออกแบบไว้ประกอบไปด้วยทรงกลมลูกโบว์ลิ่ง และลูกล้อจำนวน 2 ชุด ชุดแรกเรียกว่า steering rollers และชุดที่สองเรียกว่า drive rollers



รูปที่ 9 Top View ของ ISVT

Steering rollers สามารถที่จะปรับแกนหมุนของลูกล้อได้โดยที่การหมุนของ steering shafts ล้อชุดนี้มีหน้าที่เป็นตัวปรับทิศทางแกนหมุนของลูกทรงกลมซึ่งปรับได้ด้วยการบิด steering shafts ลูกล้อทั้ง 2 ล้อในชุดนี้จะต่อกันด้วยเฟืองดอกจอกและหมุนสัมพันธ์กันโดยทั้งสองล้อจะหมุนด้วยองศาเท่ากันแต่มีทิศทางการหมุนที่สวนกัน



รูปที่ 10 Side View ของ ISVT

ชุดที่สอง Drive Rollers นั้นเป็นชุดที่จะนำไปต่ออุปกรณ์ภายนอก มีลูกล้อจำนวน 2 ลูกเช่นเดียวกัน โดยที่ทั้งสองลูกนี้นั้นมีความเร็วเชิงมุมที่สัมพันธ์กันตามอัตราทดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้หน้าที่อีกประการหนึ่งของ Drive Rollers คือควบคุมตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทรงกลมให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน และเนื่องจากแกนหมุนของลูกล้อทั้ง 2 ลูกในชุดนี้อยู่บนระนาบเดียวกัน ส่งผลให้แกนหมุนของลูกทรงกลมโดนบังคับให้ต้องอยู่ในระนาบเดียวกันนี้ด้วย

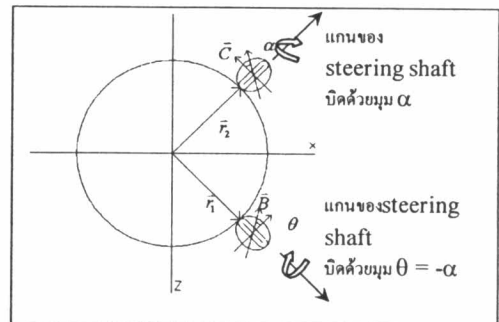
4 Kinematics ของ High Power ISVT

ในหัวข้อนี้เราจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับตำแหน่งแกนหมุนของ Steering shaft ลูกล้อชุด ในอันดับแรกเราลอง

พิจารณาว่าถ้ามีลูกล้อหนึ่งสัมผัสกับลูกทรงกลมและแกนหมุนของลูกล้ออยู่ในระนาบ x-y จาก rolling constraint จะได้ว่าแกนหมุนของลูกทรงกลมจะต้องอยู่ในระนาบ x y หรือบนระนาบเดียวกันกับแกนหมุนของลูกล้อนี้ด้วย

เนื่องจากชุด Drive Roller อยู่ในระนาบ x y และมีตำแหน่งดังรูปที่ 10 ดังนั้นสมการของแกนหมุนของลูกทรงกลมจะมีสมการดังนี้

$$y = mx, z = 0 \tag{1}$$



รูปที่ 11 Steering rollers ของ ISVT

จากรูปที่ 11 เราจะเห็นได้ว่าชุด Steering Roller จะทำให้เกิดระนาบที่แกนหมุนของลูกทรงกลมได้อีกสองระนาบ ซึ่งระนาบที่เกิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับมุมของแกนหมุนของชุด Steering Rollers ที่ทำมุม  $\theta$  และ  $\alpha$  เนื่องจาก  $\vec{r}_1$  และ  $\vec{r}_2$  ทำมุม 45 องศากับแกน x

$$\vec{r}_1 = \vec{i} + \vec{k} \tag{2}$$

เราทำการกำหนดให้  $\vec{B} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$  และจาก  $\vec{B} \cdot \vec{r}_1 = 0$  ดังนั้นเราจะได้

$$\vec{B} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} - x_1\vec{k} \tag{3}$$

$$\|\vec{B}\| = \sqrt{2x_1^2 + y_1^2} \tag{4}$$

จากคุณสมบัติผลคูณสเกลาร์ของเวกเตอร์  $\vec{r}_2$  และ  $\vec{B}$  จะได้

$$\begin{aligned} \vec{B} \cdot (\vec{i} - \vec{k}) &= \|\vec{B}\| \times \sqrt{2} \times \cos \theta \\ 2x_1 &= \sqrt{2x_1^2 + y_1^2} \times \sqrt{2} \cos \theta \\ \cos \theta &= \frac{2x_1}{\sqrt{4x_1^2 + 2y_1^2}} \cdot \theta = \cos^{-1} \left( \frac{2x_1}{\sqrt{4x_1^2 + 2y_1^2}} \right) \\ \cos^2 \theta &= \frac{4x_1^2}{4x_1^2 + 2y_1^2} = \frac{2x_1^2}{2x_1^2 + y_1^2} \end{aligned}$$

ทำให้เราสามารถที่จะทำการหาความสัมพันธ์ของ  $\theta$  กับ  $x_1$  และ  $y_1$  ได้ดังนี้

$$\frac{y_1}{x_1} = \sqrt{2} \tan \theta \tag{5}$$

นำสมการที่ (5) แทนลงในสมการที่ (3) จะได้

$$\vec{B} = x_1 \vec{i} + (\sqrt{2} \tan \theta) x_1 \vec{j} - x_1 \vec{k} \tag{6}$$

เนื่องจากค่า  $x_1$  เป็นสเกลาร์เพื่อความสะดวกในการ จึงทำการกำหนดให้ค่า  $x_1$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้สมการ

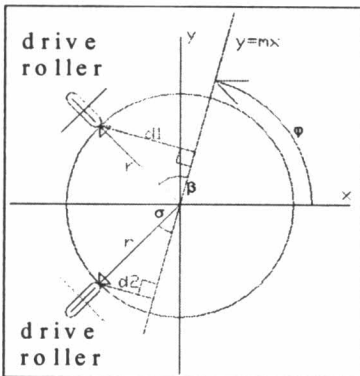
$$\vec{B} = \vec{i} + (\sqrt{2} \tan \theta) \vec{j} - \vec{k} \tag{7}$$

ระนาบที่เกิดจาก Steering Roller จะหาได้จากจุดดังต่อไปนี้  $(0,0,0), (1,0,1), (1, \sqrt{2} \tan \theta, -1)$  เพราะฉะนั้นสมการของระนาบคือ

$$x - \frac{\sqrt{2}}{\tan \theta} y - z = 0 \tag{8}$$

เราสามารถที่จะหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันของ ระนาบของ Drive Roller และระนาบของ Steering Roller ซึ่งเส้นตรงที่ได้ก็คือแกนหมุนของลูกทรงกลมนั่นเอง ดังนั้นเราสามารถหาสมการเส้นตรงจากสมการที่ (1) และสมการที่ (8) ได้ดังนี้

$$m = \frac{\tan \theta}{\sqrt{2}} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \theta \leq 2\pi \tag{9}$$



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของแกนหมุนกับอัตราทด

จากสมการที่ (1) เราสามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$m = \tan \varphi, \quad \varphi = \tan^{-1}(m) \tag{10}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{2}}\right) \tag{11}$$

สมการที่ (11) นี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการวางลูกกลิ้งแบบ tetrahedral ส่งผลให้แกนหมุนของลูกทรงกลมที่อยู่บนระนาบ x y นั้นสามารถที่จะอยู่ในตำแหน่งมุมที่ทำกับแกน x ได้ก็ได้

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 12 เราจะสามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปได้  $\beta = 45^\circ + (90 - \varphi) = 135^\circ - \varphi$  และ  $\sigma = (\varphi - 45^\circ)$  ดังนั้นเราจะสามารถที่จะหาค่าระยะห่าง  $d_1, d_2$  ได้ดังนี้

$$d_1 = r \cos(\varphi - 45^\circ) \tag{12}$$

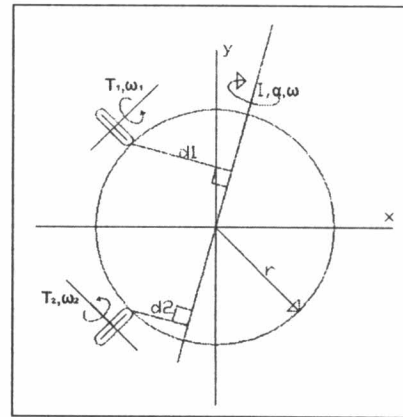
$$d_2 = r \sin(\varphi - 45^\circ) \tag{13}$$

จากสมการที่ (12) และสมการ (13) เราสามารถที่จะหาอัตราทด (T) ได้ดังนี้

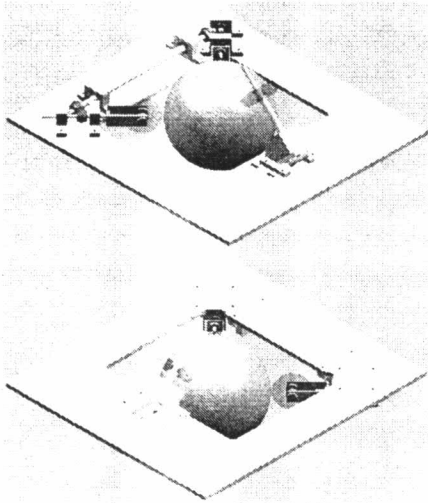
$$T \equiv \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_2}{d_1} = \tan(\varphi - 45^\circ) \tag{14}$$

$$T = \tan\left[\tan^{-1}\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{2}}\right) - 45^\circ\right] \tag{15}$$

จากสมการที่ (15) จะเห็นได้ว่ามุมของลูกกลิ้งชุด Steering Roller กับอัตราทดมีความสัมพันธ์ต่อกันโดยตรง ดังนั้นเมื่อ  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  จะทำให้อัตราทรมีค่าอยู่ในช่วง  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในทางทฤษฎีระบบ ISVT นี้สามารถที่จะให้ผลลัพธ์เป็นไปตามความต้องการ



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของสมการของการเคลื่อนที่



รูปที่ 14 High Power ISVT ที่กำลังดำเนินการสร้าง

## 5 สรุป

บทความได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะสำคัญของระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องโดยใช้หลักการของแรงเสียดทานซึ่งก็ได้มีการออกแบบไว้อย่างชัดเจนหลายลักษณะ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบ High Power ISVT หรือระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องที่มีค่าอัตราทดที่ปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  โดยเน้นที่การสร้างต้นแบบส่งกำลังได้สูงมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ใช้ในการศึกษาและทดลอง งานวิจัยนี้เป็นแค่ส่วนหนึ่งในการทำงานวิจัยระดับสูงที่คณะผู้วิจัยเตรียมการดำเนินการ

## 6 งานวิจัยต่อเนื่อง

อุปกรณ์ ISVT ที่ทำการออกแบบไว้นี้ กำลังอยู่ในระหว่างขั้นตอนการสร้าง ดังนั้นเมื่อทางคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างเสร็จ จะนำ ISVT ที่ได้ไปทำการศึกษา และทดสอบในลักษณะต่าง เช่น เมื่อทำการวางอุปกรณ์ ISVT ในลักษณะต่าง ๆ จะก่อให้เกิดผลอย่างไร ทดสอบหาค่ากำลังงานที่ได้จะมีค่าเท่าใด ประสิทธิภาพโดยรวม ของ ISVT รวมทั้งการดัดแปลงการออกแบบเมื่อนำไปใช้งาน รวมทั้งการพัฒนาวัสดุที่ใช้ในงานเช่นทรงกลมที่ใช้ลูกโบว์ลิ่งในปัจจุบันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใช้ทรงกลมกลวง (Hollow Precision Balls) ซึ่งจะทำให้ลดความเฉื่อยเชิงมุมได้

งานวิจัยต่อเนื่องที่คณะผู้วิจัยเตรียมการดำเนินการไว้ส่วนหนึ่งคือการใช้ ISVT ในอุปกรณ์หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย หรือ Cobots: *Collaborative Robots* [1,2,3,8].

Cobot: Collaborative Robot คือหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานกับมนุษย์โดยตรงใน workspace เดียวกัน. Cobot เป็นอุปกรณ์เชิง Robotics ที่มีพฤติกรรมเป็น intrinsically passive ทำให้มีความปลอดภัยเมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ เหตุผลหลักที่ทำให้ Cobot แตกต่างกับ หุ่นยนต์และอุปกรณ์ Haptic ทั่วไปคือ Cobot ไม่ได้ใช้มอเตอร์หรือ actuators ขับและส่งกำลังผ่าน joints แต่ทว่า Cobot ความสัมพันธ์ระหว่าง joints ของ Cobot

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัยของ Cobot และ รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ Cobic Haptic Interface ดูงานวิจัยของ Wannasuphprasit [1,2,3], Colgate [4], Peshkin [5], และ Moore [6]

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wannasuphprasit, W., (1999), "Cobots: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University
- [2] Wannasuphprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. A. and Colgate, J. E., (1998), "Cobots, A Novel Material Handling Technology," 98-WA/MH-2, Presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California.
- [3] W. Wannasuphprasit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.
- [4] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphprasit, W., (1996), "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544.
- [5] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphprasit, B. Gillespie, A. Mills, C. Moore, J. Santos-Munne, D. Burns, and A. Lorenz, "Cobot architecture", to be submitted to the IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999.
- [6] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.
- [7] G. Bachman, "An Experimental Investigation of the Cobot Wheel Contact Patch", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997
- [8] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล "Serial-Link Cobot" ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พค.2544
- [9] [www.deccdrive.com](http://www.deccdrive.com)
- [10] Noru Gogovitz, W.L. Cleghorn, Adrienne Chee Hing, Christopher Daniel, "Beltless Continuous Variable Transmission", U of Toronto, Canada

## การออกแบบและควบคุม ISVT

### Design and Control ISVT

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพมหานคร 10330, โทร 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-8889, E-Mail : fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th

Witaya Wannasuphprasit and Sirisak Sirikasemsuk  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
Bangkok 10330, Thailand, Tel : (662)0-2218-6610-1, Fax : 0-2252-8889

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบทางกล (เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม) ได้มีการนำระบบส่งถ่ายกำลัง (transmission) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ อย่างมาก แต่อัตราทดที่ได้จากระบบส่งถ่ายกำลังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นจะมีข้อจำกัดในด้านของอัตราทด (transmission ratio) เป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น อัตราทดคงที่เช่นเกียร์ทดในเครื่องจักร หรืออัตราทดปรับได้แบบขั้นบันไดในเกียร์รถยนต์ และอัตราทดปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องเช่น belt-drive CVT (Continuous Variable Transmission) แต่อัตราทดอยู่ในช่วงที่จำกัด ในบทความนี้ขอเสนอการศึกษา ออกแบบ พัฒนา และควบคุม ISVT: *Infinitely Stepless Variable Transmission* ซึ่งเป็นระบบถ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้อย่างต่อเนื่อง และมีช่วงอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ISVT นั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการทำงานวิจัยขั้นสูงที่จะทำต่อเนื่องจากผลงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย Haptic Interface, Passive Robots, รวมถึงการทำงานของมนุษย์กับหุ่นยนต์.

#### Abstract

Transmissions are necessary elements in mechanical systems such as robots. A transmission ratio is selected to optimize power transfer efficiency. Most of transmissions have a fix transmission ratio. Sometimes we do need to optimized power transfer for several conditions. An adjustable step-ratio transmission such as car transmissions can be used for that purpose. In this work we design and develop a transmission that can adjust its ratio continuously from  $-\infty$  ถึง  $\infty$  called ISVT: *Infinitely Stepless Variable Transmission*. The ISVT is an essential element in a novel class of human-robot interaction devices called Cobot: *Collaborative Robot*.

#### 1. บทนำ

ระบบส่งกำลังในปัจจุบันเช่นระบบส่งกำลังในรถยนต์หรือในอุปกรณ์ทางกล โดยมากจะมีอัตราทดคงที่ค่าหนึ่ง แต่การใช้งาน

บางอย่างต้องการอัตราทดที่มีมากกว่าหนึ่งค่า ทำให้เกิดระบบส่งกำลังแบบปรับเปลี่ยนค่าอัตราทดได้ เช่นระบบเกียร์ในรถยนต์ แต่การปรับเปลี่ยนอัตราทดยังเป็นแบบขั้นบันได (เกียร์หนึ่งไปเกียร์สองเป็นต้น) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งถ่ายกำลังจึงได้มีการพัฒนาระบบส่งกำลังที่มีการปรับอัตราทดแบบต่อเนื่องขึ้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการออกแบบ และพัฒนาระบบส่งกำลังแบบปรับอัตราทดต่อเนื่องโดยมีช่วงอัตราทดจาก  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ที่เรียกว่า ISVT: *Infinitely Stepless Variable Transmission* ซึ่งใช้หลักการของแรงเสียดทานซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

ในส่วนแรกจะพูดถึงระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องแบบอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นหลักการทำงาน จากนั้นจึงเป็นการอธิบายถึงหลักการการทำงานของ ISVT แบบต่างๆ

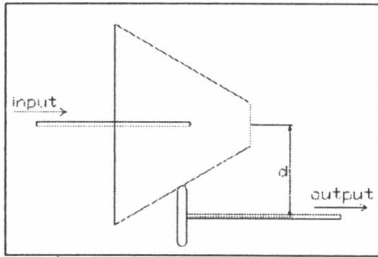
ในหัวข้อที่ 3-จะอธิบายถึงการออกแบบ ISVT รวมทั้ง Kinematics ของ ISVT ท้ายสุดจะกล่าวถึงการใช้งานของ ISVT ในงานวิจัยด้านการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์กับมนุษย์ Cobots: Collaborative Robots.

#### 2. Reviews of CVTs

เนื่องจากอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง (transmission) นั้นได้มีการพัฒนามานานร่วมร้อยปีแล้วแต่อุปกรณ์ชนิดนี้ ก็ยังถูกจำกัดเป็นอย่างมากของลักษณะอัตราทดที่ได้ดังจะเห็นได้ในปัจจุบันที่เครื่องจักรกลส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วที่มีอัตราทดเป็นแบบขั้นบันไดอยู่ ตัวอย่างเช่น รถยนต์นั่งทั่วไปที่เกียร์มีอัตราทดจำกัดอยู่แค่ 3-6 อัตราเท่านั้น อุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง อีกประเภทหนึ่งซึ่งจะมีลักษณะของการเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง (CVT: *Continuous Variable Transmission*) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ทั้งในเรื่องอัตราทดที่ได้จากการปรับเปลี่ยนจะมีช่วงที่เล็กมากและส่วนใหญ่จะไม่สามารถให้อัตราทดที่เป็นลบได้ สำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลังแบบต่อเนื่องนี้ได้มีหลักการมากมายดังจะแสดงต่อไป

2.1 Cone Friction CVT

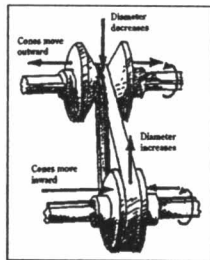
CVT แบบ Cone friction นี้จะใช้หลักการที่ค่อนข้างง่ายซึ่งหลักการในการปรับเปลี่ยนอัตราทดในแบบนี้จะใช้วิธีเปลี่ยนระยะห่างศูนย์กลางของเฟลา input กับเฟลา output (ระยะ d) โดยให้ล้อและกรวยสัมผัสกันตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียก็คือเมื่อต้องการเปลี่ยนอัตราทดระยะห่างระหว่างเฟลาทั้งสอง (ระยะ d) จะต้องเปลี่ยนแปลงตลอด และช่วงของอัตราทดที่ได้ยังมีค่าจำกัด



รูปที่ 1 แสดง CVT แบบ Cone friction

2.2 V-belt CVT

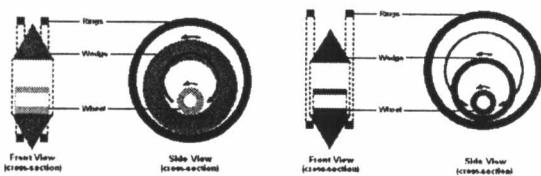
หลักการในการเปลี่ยนอัตราทดของแบบ V-belt จะใช้วิธีเปลี่ยนความกว้างของพู่เล่ เพื่อให้จะทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางเปลี่ยนขนาดดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจากวิธีการที่สามารถเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางได้นี้ส่งผลให้สามารถที่จะเปลี่ยนอัตราทดได้ แต่การเปลี่ยนอัตราทดวิธีนี้นั้นช่วงของอัตราทดที่ได้ก็ยังมีขนาดอยู่ อย่างไรก็ตาม CVT แบบ V-belt นี้ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2 แสดง CVT แบบ V-belt. Source from [10]

2.3 DECC Drive CVT [9]

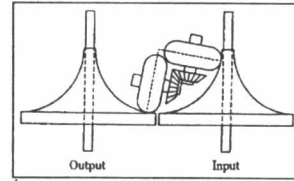
อุปกรณ์การเปลี่ยนความเร็วแบบ DECC (The Double-Eccentric Continuously Variable Transmission) จะใช้วิธีการเปลี่ยนอัตราทดโดยการปรับระยะห่างของวงแหวนทำให้ effective radius ของ wedge เปลี่ยนไปดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3 โดยที่ล้อ (wheel) จะโคจรรอบวงแหวน (ring) และในขณะที่เดียวกันจะขับ wedge ให้โคจรรอบวงแหวนด้วยความเร็วเชิงมุมที่ต่างกัน อัตราส่วนความเร็วเชิงมุมของวงโคจรทั้งสองขึ้นอยู่กับระยะห่างของวงแหวน



รูปที่ 3 DECC Drive CVT Source from [9]

2.4 แบบ Beltless CVT

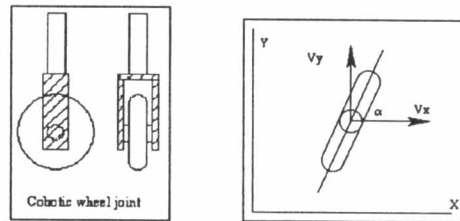
Beltless CVT เป็นรูปแบบของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความเร็วอีกแบบหนึ่ง ที่ได้ใช้ลูกกลิ้งมาช่วยในการปรับเปลี่ยนอัตราทด วิธีการในการเปลี่ยนอัตราทดวิธีนี้จะใช้วิธีเปลี่ยนตำแหน่งของลูกกลิ้งไปบนกรวยสองอันดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งใน CVT แบบ Beltless แบบนี้นั้นแม้ว่าจะคล้ายกับแบบ ISVT ของงานวิจัยชิ้นนี้แต่ก็ยังมีข้อเสียก็คือช่วงที่ได้จากอัตราทดแบบนี้จะมีขนาดจำกัดและไม่สามารถปรับให้มีอัตราทดที่เป็นลบได้



รูปที่ 4 Beltless CVT Source from [10]

2.5 Wheel CVT

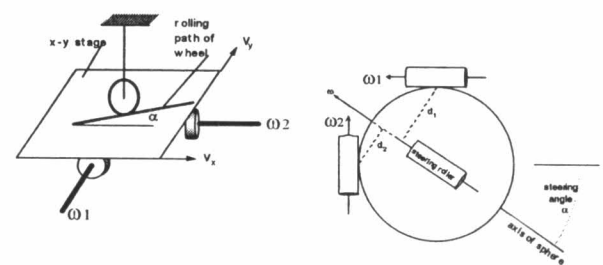
ล้อ (Wheel) คือ CVT ที่มีมานานที่สุดนอกจากนั้น ล้อยังเป็น CVT Mechanism ที่มนุษย์มองข้ามมาช้านาน Wheel เป็น CVT ที่กำหนดอัตราทดระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x และ ในแนวแกน y โดยที่อัตราทดปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  อัตราทดของ  $V_y$  และ  $V_x$  เท่ากับ  $\tan(\alpha)$



รูปที่ 5 แสดง Wheel Joint CVT ที่ใช้ใน Cobots: Source from [1]

Wheel CVT นั้นเป็น กลไกที่ง่ายต่อการใช้งาน ในปี 1995 Wannasuphprasit [1,2,3,4] ได้นำเอา Wheel CVT ใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ Haptic Interface ที่ทำให้เป็นระบบ passive ที่ไม่ dissipate energy ได้เป็นครั้งแรกและต่อมาได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็น Cobots : Collaborative Robots

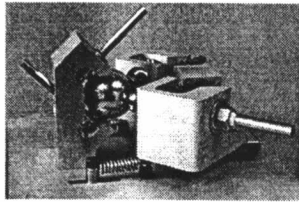
2.6 Spherical CVT



รูปที่ 6 แสดง หลักการของ Spherical CVT [6]



พิจารณารูปที่ 6 (ซ้าย) ถ้าเรานำเอา wheel มาใช้เป็น CVT ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ  $V_y$  และ  $V_x$  จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม  $\alpha$  (steering angle) ของล้อโดยที่  $V_y / V_x = \tan(\alpha)$  ในขณะที่เดียวกันถ้าเราใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น  $V_x$  และ  $V_y$  ให้เป็นความเร็วเชิงมุม  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ดังรูปที่ 6 (ซ้าย) เราจะได้ CVT ที่ปรับอัตราของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ถ้าเราม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ CVT เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูป 6 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของsteering rollers ถ้าเราเปลี่ยนมุม steering angle ( $\alpha$ ) แกนของsteering rollers ก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ  $d_1$  และ  $d_2$  (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ  $\omega_1$  และ ล้อขับ  $\omega_2$ ) เปลี่ยนไป และดังนั้นให้อัตราของความเร็วเชิงมุมโดยที่อัตรา  $\omega_1 / \omega_2$  เท่ากับ  $d_1 / d_2$  เราเรียก CVT ประเภทนี้ว่า Spherical CVT สิ่งที่สำคัญในการทำงานของ Spherical CVT ชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ CVT เสมอ. Moore [6] ได้ออกแบบ Spherical CVT โดยใช้ ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว และ metal rollers 4 ตัว (minimum constrains) ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ และเรียกว่า tetrahedral CVT (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 Tetrahedral CVT: Source from [6]

3. การออกแบบ High power ISVT:

*Infinitely Steplless Variable Transmission*

จุดประสงค์ในการออกแบบและสร้าง ISVT ของผู้วิจัยคือ 1) ต้องการสร้าง ISVT ที่มีขนาดและสัณฐานได้สูง 2) ต้องการใช้ต้นแบบนี้ในการศึกษาและทดลองหาค่าและความสัมพันธ์ของ parameters ต่างๆ ที่สำคัญเช่น กำลังสูงสุดที่รับได้, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวและrollers, แรง preload, ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายกำลัง 3) เพื่อนำเอา ISVT ไปใช้ในงานประยุกต์ต่างๆ และงานวิจัยทางการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ เช่น Cobots.

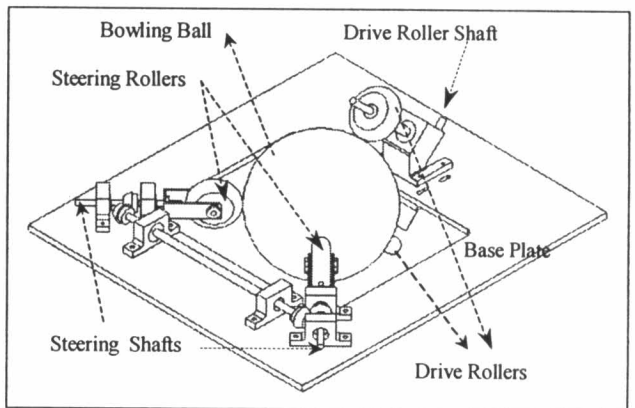
คณะผู้วิจัยต้องการออกแบบ ISVT ที่ปรับอัตราของความเร็วเชิงมุมเพราะนำมาใช้ได้กับงานหลายประเภท รวมทั้งการใช้งานในแขนกลของCobot [8] จากreviews CVT ลักษณะต่างๆในข้างต้นพบว่า Tetrahedral CVT เป็นโครงสร้างที่ง่ายและเหมาะสมและต้องการอุปกรณ์หลักแค่ ทรงกลม และ rollers 4 ตัวเท่านั้น

วัสดุที่ใช้ใน Tetrahedral CVT จะเป็นโลหะเหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้กำลังงานของงานวิจัยชิ้นนี้มีขนาดเล็กที่น้อยมากเนื่องจากแรงเสียดทานที่ได้จากลูกกลิ้งที่เป็นเหล็กสัมผัสกับลูกทรงกลมที่ทำมาจากโลหะเช่นกัน จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นเมื่อถ้าเราต้องการทำให้ CVT ในงานวิจัยชิ้นนี้มี

กำลังงานสูงขึ้น จะเป็นไปได้ก่อนข้างยากอันเนื่องมาจากข้อจำกัดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

เนื่องจากมีความต้องการจะทำการออกแบบและพัฒนา ISVT เพื่อที่จะนำมาทำการศึกษา ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเพิ่มขนาดของทรงกลม เพื่อที่จะทำให้เกิดความสะดวกและง่ายแก่การที่จะทำการศึกษาอย่างไรก็ตาม ในการสร้าง ISVT ให้มีขนาดใหญ่ ถ้าเราใช้วัสดุที่เป็นเหล็กทั้งลูกกลิ้งและลูกทรงกลมจะส่งผลให้น้ำหนักของ ISVT มีน้ำหนักสูงมากและในขั้นตอนการสร้างจะมีปัญหายุ่งยากมาก และการหาทรงกลมวัสดุอื่น ๆ ที่มีขนาดใหญ่และมีความเที่ยงตรงไม่ใช่เรื่องง่ายนัก อย่างไรก็ตาม ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเลือกลูกทรงกลมเป็นลูกโบว์ลิ่งที่ยังไม่เจาะรู มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกโบว์ลิ่งขนาด 8.5 นิ้ว น้ำหนักเท่ากับ 8 ปอนด์ ผิวของลูกโบว์ลิ่งทำจากโพลีเอสเตอร์และมีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ และเลือกลูกกลิ้ง roller เป็นลูกกลิ้ง Roller blade ที่ทำจากโพลียูรีเทน มี Profile เป็นแบบ Tapered Radius เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 72 mm. Durometer เท่ากับ 84A ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทั้งสองนั้นจะมีอัตราส่วนประมาณ 1 ต่อ 3 ซึ่งเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมเป็นอย่างมาก [6] จากเอกสารอ้างอิง[8] ได้ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ) ของล้อที่มีลักษณะเช่นเดียวกับลูกกลิ้งที่ทางคณะผู้วิจัยเลือกใช้กับพื้นผิวที่วัสดุเป็นกระจุก ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้มีค่าเท่ากับ 0.5973 ดังนั้นจากผิวของอุปกรณ์ทั้งสองนั้นที่ทำจากโพลียูรีเทนและโพลีเอสเตอร์ทำให้เราสามารถพอที่จะทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตว่ามีมากพอเพียง (โดยจะทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ) หลังจากการสร้างต้นแบบแล้ว) และที่สำคัญอุปกรณ์ทั้งสองนั้นเป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในเมืองไทย

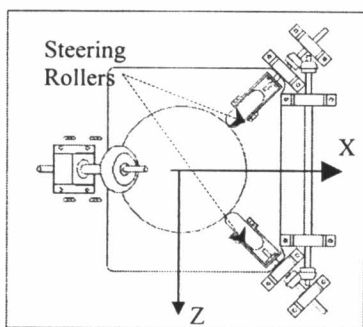
การเพิ่มขนาดของลูกทรงกลมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและจากการที่ได้เพิ่มขนาดของลูกทรงกลมให้ใหญ่ขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดน้ำหนักของลูกทรงกลมให้เพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้ไม่สามารถที่จะละเลยน้ำหนักและความเฉื่อยเชิงมุมของลูกทรงกลม



รูปที่ 8 High Power ISVT: Infinitely Steplless Variable Transmission

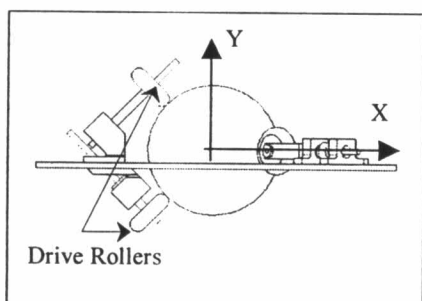
จากข้อมูลในหัวข้อต่างๆ ข้างต้นทำให้เราสามารถที่จะออกแบบรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ ได้ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งในรูปนี้เป็น

รูปที่ได้จาก wireframe ในโปรแกรม CAD ที่พร้อมจะสร้างได้จริง ขนาดของระบบ ISVT ที่ได้ทำการออกแบบไว้จะมีขนาดประมาณ ความกว้างเท่ากับ 540 mm. ความยาวเท่ากับ 600 mm. และความสูงมีค่าเท่ากับ 290 mm. มีฐานที่อยู่ในตำแหน่งเกือบจะกึ่งกลางของลูกโบว์ลิ่ง เหตุผลที่ออกแบบไว้เช่นนี้เนื่องจากเพื่อต้องการออกแบบให้ส่วนประกอบต่างๆ ของโครงสร้างมีน้ำหนักที่น้อยที่สุดและง่ายต่อการสร้างและประกอบ ISVT ที่ออกแบบไว้ประกอบไปด้วยทรงกลมลูกโบว์ลิ่ง และลูกล้อจำนวน 2 ชุด ชุดแรกเรียกว่า steering rollers และชุดที่สองเรียกว่า drive rollers



รูปที่ 9 Top View ของ ISVT

Steering rollers สามารถที่จะปรับแกนหมุนของลูกล้อได้โดยการหมุนของ steering shafts ล้อชุดนี้มีหน้าที่เป็นตัวปรับทิศทางแกนหมุนของลูกทรงกลมซึ่งปรับได้ด้วยการบิด steering shafts ลูกล้อทั้ง 2 ล้อในชุดนี้จะต่อกันด้วยเฟืองดอกจอกและหมุนสัมพันธ์กันโดยทั้งสองล้อจะหมุนด้วยองศาเท่ากันแต่มีทิศทางการหมุนที่สวนกัน



รูปที่ 10 Side View ของ ISVT

ชุดที่สอง Drive Rollers นั้นเป็นชุดที่จะนำไปต่ออุปกรณ์ภายนอกมีลูกล้อจำนวน 2 ลูกเช่นเดียวกัน โดยที่ทั้งสองลูกนี้นั้นมีความเร็วเชิงมุมที่สัมพันธ์กันตามอัตราทดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้หน้าที่อีกประการหนึ่งของ Drive Rollers คือควบคุมตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทรงกลมให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน และเนื่องจากแกนหมุนของลูกล้อทั้ง 2 ลูกในชุดนี้อยู่บนระนาบเดียวกัน ส่งผลให้แกนหมุนของลูกทรงกลมโดนบังคับให้ต้องอยู่ในระนาบเดียวกันนี้ด้วย

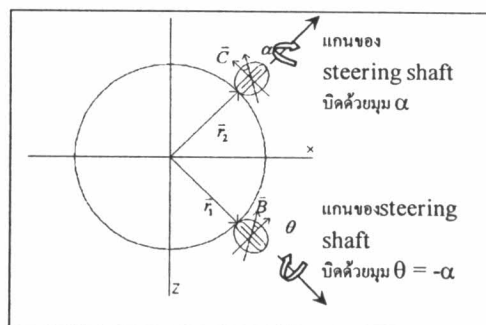
4 Kinematics ของ High Power ISVT

ในหัวข้อนี้เราจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับตำแหน่งแกนหมุนของ Steering shaft ลูกล้อชุด ในอันดับแรกเราลอง

พิจารณาว่าถ้ามีลูกล้อลูกหนึ่งสัมผัสกับลูกทรงกลมและแกนหมุนของลูกล้อนี้อยู่ในระนาบ x-y จาก rolling constraint จะได้ว่าแกนหมุนของลูกทรงกลมจะต้องอยู่ในระนาบ x y หรือบนระนาบเดียวกันกับแกนหมุนของลูกล้อลูกนี้ด้วย

เนื่องจากชุด Drive Roller อยู่ในระนาบ x y และมีตำแหน่งตั้งรูปที่ 10 ดังนั้นสมการของแกนหมุนของลูกทรงกลมจะมีสมการดังนี้

$$y = mx, z = 0 \tag{1}$$



รูปที่ 11 Steering rollers ของ ISVT

จากรูปที่ 11 เราจะเห็นได้ว่าชุด Steering Roller จะทำให้เกิดระนาบที่แกนหมุนของลูกทรงกลมได้อีกสองระนาบ ซึ่งระนาบที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับมุมของแกนหมุนของชุด Steering Rollers ที่ทำมุม  $\theta$  และ  $\alpha$  เนื่องจาก  $\vec{r}_1$  และ  $\vec{r}_2$  ทำมุม 45 องศากับแกน x

$$\vec{r}_1 = \vec{i} + \vec{k} \tag{2}$$

เราทำการกำหนดให้  $\vec{B} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$  และจาก  $\vec{B} \cdot \vec{r}_1 = 0$  ดังนั้นเราจะได้

$$\vec{B} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} - x_1\vec{k} \tag{3}$$

$$\|\vec{B}\| = \sqrt{2x_1^2 + y_1^2} \tag{4}$$

จากคุณสมบัติผลคูณสเกลาร์ของเวกเตอร์  $\vec{r}_2$  และ  $\vec{B}$  จะได้

$$\begin{aligned} \vec{B} \cdot (\vec{i} - \vec{k}) &= \|\vec{B}\| \times \sqrt{2} \times \cos\theta \\ 2x_1 &= \sqrt{2x_1^2 + y_1^2} \times \sqrt{2} \cos\theta \\ \cos\theta &= \frac{2x_1}{\sqrt{4x_1^2 + 2y_1^2}} \cdot \theta = \cos^{-1}\left(\frac{2x_1}{\sqrt{4x_1^2 + 2y_1^2}}\right) \\ \cos^2\theta &= \frac{4x_1^2}{4x_1^2 + 2y_1^2} = \frac{2x_1^2}{2x_1^2 + y_1^2} \end{aligned}$$

ทำให้เราสามารถที่จะทำการหาความสัมพันธ์ของ  $\theta$  กับ  $x_1$  และ  $y_1$  ได้ดังนี้

$$\frac{y_1}{x_1} = \sqrt{2} \tan \theta \quad (5)$$

นำสมการที่ (5) แทนลงในสมการที่ (3) จะได้

$$\vec{B} = x_1 \vec{i} + (\sqrt{2} \tan \theta) x_1 \vec{j} - x_1 \vec{k} \quad (6)$$

เนื่องจากค่า  $x_1$  เป็นสเกลาร์เพื่อความสะดวกในการ จึงทำการ กำหนดให้ค่า  $x_1$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจะได้สมการ

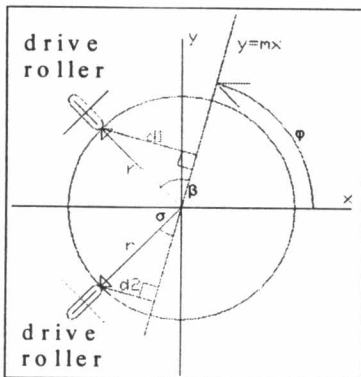
$$\vec{B} = \vec{i} + (\sqrt{2} \tan \theta) \vec{j} - \vec{k} \quad (7)$$

ระนาบที่เกิดจาก Steering Roller จะหาได้จากจุดดังต่อไปนี้  $(0,0,0), (1,0,1), (1, \sqrt{2} \tan \theta, -1)$  เพราะฉะนั้นสมการของระนาบคือ

$$x - \frac{\sqrt{2}}{\tan \theta} y - z = 0 \quad (8)$$

เราสามารถที่จะหาเส้นตรงที่เกิดจากการตัดกันของ ระนาบของ Drive Roller และระนาบของ Steering Roller ซึ่งเส้นตรงที่ได้ก็คือแกน หมุนของลูกทรงกลมนั่นเอง ดังนั้นเราจะสามารถหาสมการเส้นตรงจาก สมการที่ (1) และสมการที่ (8) ได้ดังนี้

$$m = \frac{\tan \theta}{\sqrt{2}} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (9)$$



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของแกนหมุนกับอัตราทด

จากสมการที่ (1) เราสามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$m = \tan \varphi, \quad \varphi = \tan^{-1}(m) \quad (10)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{2}}\right) \quad (11)$$

สมการที่ (11) นี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะการวางลูกกลิ้งแบบ tetrahedral ส่งผลให้แกนหมุนของลูกทรงกลมที่อยู่บนระนาบ x y นั้น สามารถที่จะอยู่ในตำแหน่งมุมที่ทำกับแกน x ได้ก็ได้

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 12 เราจะสามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปได้  $\beta = 45^\circ + (90 - \varphi) = 135^\circ - \varphi$  และ  $\sigma = (\varphi - 45^\circ)$  ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าระยะห่าง  $d_1, d_2$  ได้ดังนี้

$$d_1 = r \cos(\varphi - 45^\circ) \quad (12)$$

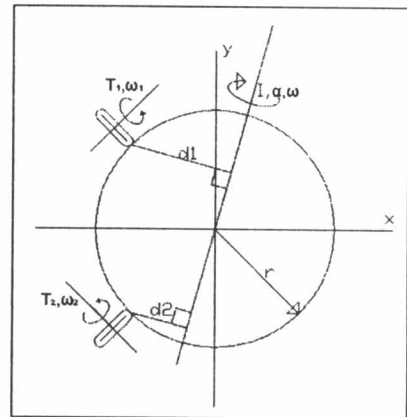
$$d_2 = r \sin(\varphi - 45^\circ) \quad (13)$$

จากสมการที่ (12) และสมการ (13) เราสามารถที่จะหาอัตราทด (T) ได้ดังนี้

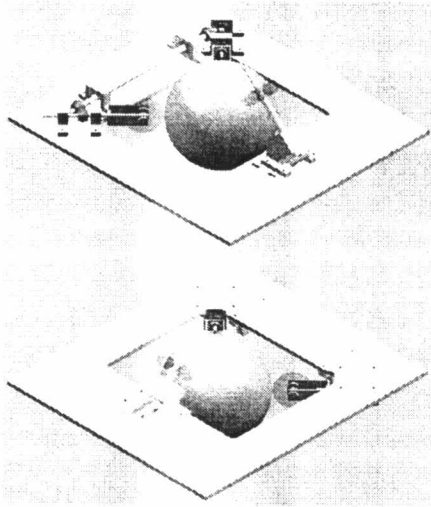
$$T \equiv \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_2}{d_1} = \tan(\varphi - 45^\circ) \quad (14)$$

$$T = \tan \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\tan \theta}{\sqrt{2}} \right) - 45^\circ \right] \quad (15)$$

จากสมการที่ (15) จะเห็นได้ว่ามุมของลูกกลิ้งชุด Steering Roller กับอัตราทดมีความสัมพันธ์ต่อกันโดยตรง ดังนั้นเมื่อ  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  จะทำให้อัตราทรมีค่าอยู่ในช่วง  $-\infty$  ถึง  $\infty$  ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในทาง ทฤษฎีระบบ ISVT นี้สามารถที่จะให้ผลลัพธ์เป็นไปตามความต้องการ



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของสมการของการเคลื่อนที่



รูปที่ 14 High Power ISVT ที่กำลังดำเนินการสร้าง

## 5 สรุป

บทความได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะความสำคัญของระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องโดยใช้หลักการของแรงเสียดทานซึ่งก็ได้มีการออกแบบไว้อย่างชัดเจนหลายลักษณะ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบ High Power ISVT หรือระบบส่งกำลังแบบต่อเนื่องที่มีค่าอัตราทดที่ปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $\infty$  โดยเน้นที่การสร้างต้นแบบส่งกำลังได้สูงมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ใช้ในการศึกษาและทดลอง งานวิจัยนี้เป็นแค่ส่วนหนึ่งในการทำงานวิจัยระดับสูงที่คณะผู้วิจัยเตรียมการดำเนินการ

## 6 งานวิจัยต่อเนื่อง

อุปกรณ์ ISVT ที่ทำการออกแบบไว้นี้ กำลังอยู่ในระหว่างขั้นตอนการสร้าง ดังนั้นเมื่อทางคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างเสร็จ จะนำ ISVT ที่ได้ไปทำการศึกษา และทดสอบในลักษณะต่าง เช่น เมื่อทำการวางอุปกรณ์ ISVT ในลักษณะต่างๆ จะก่อให้เกิดผลอย่างไร ทดสอบหาค่ากำลังงานที่ได้จะมีค่าเท่าใด ประสิทธิภาพโดยรวม ของ ISVT รวมทั้งการดัดแปลงการออกแบบเมื่อนำไปใช้งาน รวมทั้งการพัฒนาวัสดุที่ใช้ในงานเช่นทรงกลมที่ใช้ลูกโบว์ลิ่งในปัจจุบันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใช้ทรงกลมกลวง (Hollow Precision Balls) ซึ่งจะทำให้ลดความเฉื่อยเชิงมุมได้

งานวิจัยต่อเนื่องที่คณะผู้วิจัยเตรียมการดำเนินการไว้ส่วนหนึ่งคือการใช้ ISVT ในอุปกรณ์หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย หรือ Cobots: *Collaborative Robots* [1,2,3,8].

Cobot: Collaborative Robot คือหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานกับมนุษย์โดยตรงใน workspace เดียวกัน. Cobot เป็นอุปกรณ์เชิง Robotics ที่มีพฤติกรรมเป็น intrinsically passive ทำให้มีความปลอดภัยเมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ เหตุผลหลักที่ทำให้ Cobot แตกต่างกับ หุ่นยนต์และอุปกรณ์ Haptic ทั่วไปคือ Cobot ไม่ได้ใช้มอเตอร์หรือ actuators ขับและส่งกำลังผ่าน joints แต่ทว่า Cobot ความสัมพันธ์ระหว่าง joints ของ Cobot

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัยของ Cobot และ รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ Cobic Haptic Interface ดูงานวิจัยของ Wannasuphprasit [1,2,3], Colgate [4], Peshkin [5], และ Moore [6]

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wannasuphprasit, W., (1999), "Cobots: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University
- [2] Wannasuphprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. A. and Colgate, J. E., (1998), "Cobots, A Novel Material Handling Technology," 98-WA/MH-2, Presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California.
- [3] W. Wannasuphprasit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.
- [4] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphprasit, W., (1996), "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544.
- [5] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphprasit, B. Gillespie, A. Mills, C. Moore, J. Santos-Munne, D. Burns, and A. Lorenz, "Cobot architecture", to be submitted to the IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999.
- [6] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.
- [7] G. Bachman, "An Experimental Investigation of the Cobot Wheel Contact Patch", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997
- [8] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมด "Serial-Link Cobot" ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พค.2544
- [9] [www.deccdrive.com](http://www.deccdrive.com)
- [10] Noru Gogovitz, W.L. Cleghorn, Adrienne Chee Hing, Christopher Daniel, "Beltless Continuous Variable Transmission", U of Toronto, Canada

## หุ่นยนต์โคบอทสามมิติ Three Dimensional Cobot

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพมหานคร 10330, โทร 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-8889  
E-Mail : [fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th](mailto:fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th) , [Sirisak.S@student.chula.ac.th](mailto:Sirisak.S@student.chula.ac.th)

Witaya Wannasuphprasit and Sirisak Sirikasemsuk  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
Bangkok 10330, Thailand, Tel : (662)0-2218-6610-1, Fax : 0-2252-8889  
E-Mail : [fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th](mailto:fmewwn@kankrow.eng.chula.ac.th) , [Sirisak.S@student.chula.ac.th](mailto:Sirisak.S@student.chula.ac.th)

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ (A Three Dimensional Cobot) ที่สามารถจะทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ หลักการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจะใช้วิธีการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อด้วยการปรับอัตราทดของแต่ละข้อต่อ โดยอาศัยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องมาต่อเข้ากับข้อต่อ ซึ่งในงานวิจัยหุ่นยนต์โคบอทสามมิตินี้จะนำล้อซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นไปประยุกต์ต่อเข้ากับทรงกลม เพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่เชิงมุมทั้งสามของทรงกลม จากนั้นจะทำการออกแบบกลไกโดยนำการเคลื่อนที่เชิงมุมทั้งสามที่ได้ไปต่อเข้ากับข้อต่อของแขนกล โดยที่แขนกลนี้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมทั้งสามของทรงกลมให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นของปลายแขนกล ในพิกัดคาร์ทีเซียน จะเห็นได้ว่าด้วยวิธีการดังกล่าวหุ่นยนต์โคบอทสามมิติจะมีลักษณะเป็นระบบพาสซีฟ (Passive) โดยสมบูรณ์อีกทั้งยังให้ความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งจะแตกต่างจากหุ่นยนต์ส่วนใหญ่ที่มีระบบเป็นแบบแอ็กทีฟ จากลักษณะดังกล่าวของโคบอททำให้เกิดคุณสมบัติที่สำคัญนั่นก็คือโคบอทจะสามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ในพื้นที่การทำงานเดียวกันได้อย่างปลอดภัย

### Abstract

Cobots employ constraints to control motion relation between their joints by using continuous variable transmission. This paper addresses design and development of a three dimensional Cobot. The cobot utilizes three wheel CVTs to constraint a sphere motion. Further more the sphere rotational motions are transformed to linear (x y z) motion via mechanical linkages and a cable transmission.

### 1. บทนำ

หุ่นยนต์โคบอทคือหุ่นยนต์ชนิดใหม่ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัยโดยเฉพาะ หุ่นยนต์โคบอทมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ทางด้านหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบพาสซีฟโดยกำเนิด (Intrinsically passive) นั่นก็คือหุ่นยนต์โคบอทจะไม่มีตัวขับเคลื่อน (Actuator) ที่สามารถสร้างแรงกระทำต่อผู้ใช้ได้โดยตรง แต่ทว่าหุ่นยนต์โคบอทจะใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอท ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์โคบอทนั้นจะไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ด้วยตนเอง การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทจะต้องอาศัยแรงกระทำจากมนุษย์ โดยที่โคบอทช่วยกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่จากความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น

การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทนั้นจะทำงานในลักษณะที่ช่วยนำทางให้ผู้ใช้ไปยังเส้นทางที่กำหนดเปรียบเสมือนกับการใช้ไม้บรรทัดขีดเส้นตรง ไม้บรรทัดนี้จะไม่สามารถบังคับมือเราได้ แต่จะเป็นเพียงตัวที่จะช่วยให้เราขีดเส้นตรงได้ ทำให้ได้ผลดีมากกว่าใช้มือเปล่า เมื่อนำโคบอทมาใช้กับงานข้างต้น ก็จะทำให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้นกล่าวคือในงานประกอบรถยนต์ หุ่นยนต์โคบอท จะช่วยให้การประกอบแม่นยำขึ้นและใช้เวลาเฉลยลง ในการผ่าตัดก็ให้ผลเช่นเดียวกัน

อุปกรณ์ทางด้านแฮปติกส์ (Haptic Interface) โดยทั่วไปสามารถสร้างสถานะจำลองต่างๆ ได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม ยกตัวอย่างเช่น การสร้างกำแพงเสมือนให้เหมือนกำแพงจริง กำแพงจำลองต้องมีความแข็งแรงมาก ทำให้มอเตอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะขับเคลื่อนได้เพียงพอและต้องใช้อัตราขยายในการควบคุมสูงทำให้เกิดการเกิดความไม่เสถียรขึ้น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการทำงานวิจัยด้านการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ

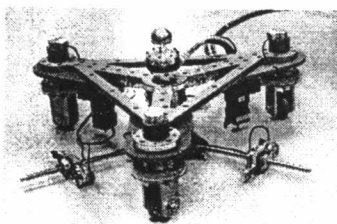
ในทางตรงกันข้าม ข้อแตกต่างของโคบอทกับอุปกรณ์แฮปติกส์ทั่วไปคือหุ่นยนต์โคบอทไม่ได้ใช้แรงตรง (Direct force) ขับดันการเคลื่อนที่ของมนุษย์ แต่ใช้การเปลี่ยนทิศทางของแรงที่กระทำโดยมนุษย์ (redirect applied force) ในการทำงานระบบแฮปติกส์ทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อตัวผู้ใช้ ทำให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์โคบอทได้อย่างปลอดภัย เช่น การใช้หุ่นยนต์ในการผ่าตัด หรือการใช้หุ่นยนต์ในการช่วยการประกอบรถยนต์

เหตุผลที่หุ่นยนต์โคบอทมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ทางด้านวิทยาการหุ่นยนต์ ที่มีพฤติกรรมเป็นแฮปติกส์โดยกำเนิดเพราะว่าหุ่นยนต์โคบอทใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เป็นส่วนประกอบหลัก และ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ยังเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่เป็นแฮปติกส์อยู่แล้ว ดังนั้นเป็นที่แน่นอนว่าหุ่นยนต์โคบอทจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความปลอดภัยสูง โดยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้อยู่ในโคบอทจะมีหน้าที่ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อต่างๆในโคบอท หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือที่ตำแหน่งตามจับของโคบอทและพื้น (Fixed ground) เราสามารถที่จะควบคุมความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆได้ด้วยเครือข่ายของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง

## 2. ตัวอย่างงานวิจัยหุ่นยนต์โคบอท

### 2.1 หุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอท (Scooter Cobot)

สกูตเตอร์เป็นหุ่นยนต์โคบอทที่สร้างขึ้นโดย Wannasuphoprasit และคณะ [3] หุ่นยนต์สกูตเตอร์ได้ถูกออกแบบเพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริง จะมีล้อจำนวน 3 ล้อทำให้หุ่นยนต์สกูตเตอร์สามารถที่ตั้งอยู่ได้ด้วยตัวมันเองโดยไม่จำเป็นต้องมีรางช่วยพยุงตัวมันไว้ (แสดงในรูปที่ 1) หุ่นยนต์โคบอทตัวนี้จะมีพื้นที่การทำงานใน 3 มิติ ( $x, y, \theta$ ) หุ่นยนต์สกูตเตอร์ประกอบไปด้วยมอเตอร์ตัวเล็ก 3 ตัวมีหน้าที่ควบคุมทิศทางของล้อทั้งสามตัวไว้ 1 ตัวอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของหุ่นยนต์สกูตเตอร์ มีหน้าที่วัดแรงที่เกิดจากผู้ใช้

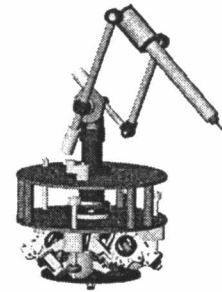


รูปที่ 1 หุ่นยนต์สกูตเตอร์ ที่มา: จาก [3]

หุ่นยนต์สกูตเตอร์ตัวนี้ได้มีการนำไปใช้งานแล้วในโรงงานประกอบรถยนต์ของ 'General Motor' โดยนำไปประกอบประตูเข้ากับตัวถังของรถยนต์ ซึ่งจะทำให้เกิดความสะดักสะบายน้อยในการทำงานเป็นอย่างมาก [2] สำหรับความปลอดภัยในการทำงานสกูตเตอร์ก็ยังคงมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากสกูตเตอร์เป็นอุปกรณ์วิทยาการโคบอทแบบแฮปติกส์

### 2.2 หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท (3R Cobot)

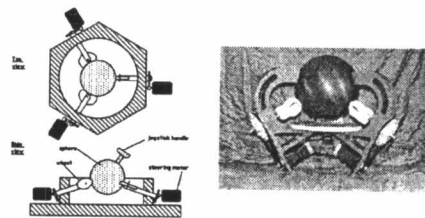
หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท (3R Cobot) เป็นหุ่นยนต์โคบอทที่ออกแบบโดย Moore และคณะ [8] จะมีลักษณะเป็นแขนแบบขนาน (parallelogram arm) มีพื้นที่ทำงานจำนวน 3 มิติ ( $x, y, z$ ) และมีก้านต่อจำนวน 4 ก้าน ต่อกันในลักษณะขนาน เพื่อให้สะดวกต่อการถ่วงดุล (counter-balanced) การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทตัวนี้จะถูกควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุม (ซีวีที: Continuous Variable Transmission) จำนวน 3 ตัว ต่อไปยังแต่ละข้อต่อของสามอาร์โคบอท



รูปที่ 2 หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท ที่มา: [5]

### 2.3 หุ่นยนต์โคบอทจอยสติค (Joystick Cobot)

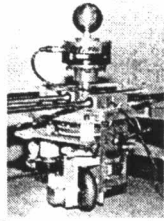
หุ่นยนต์โคบอทจอยสติคเป็นการนำหลักการของหุ่นยนต์โคบอทไปประยุกต์ใช้งานอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งหุ่นยนต์โคบอทจอยสติคนี้จะใช้ซีวีทีล้อมาใช้ เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลมที่กำหนดให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมอยู่กับที่ ทำให้เราสามารถที่จะควบคุมการหมุนรอบแกนทั้งสามของลูกทรงกลมได้ด้วยการควบคุมทิศทางของล้อเท่านั้นหุ่นยนต์โคบอทจอยสติคชุดนี้จะมีพื้นที่ทำงานจำนวน 3 มิติ มีแบบวิธีการทำงาน 2 แบบคือการทำงานแบบการทำงานแบบอิสระและการทำงานแบบก้ำกึ่งเหมือนเช่นเดียวกับโคบอทอื่นๆ ลักษณะของหุ่นยนต์โคบอทจอยสติคสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โคบอทก้านควบคุม

## 3. แบบวิธีการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท

เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายเราจะขอยกตัวอย่างหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot) ซึ่งได้ถูกพัฒนาโดย Wannasuphoprasit และคณะ [3] มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์ล้อเดียวเคลื่อนที่ในระนาบ XY เท่านั้น แกนของล้อหุ่นยนต์โคบอทจะตั้งตรงอยู่ตลอดเวลาของมอเตอร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวทำหน้าที่เพียงปรับเปลี่ยนทิศทางของล้อเท่านั้นไม่สามารถขับเคลื่อนได้หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวมีตัวรับรู้แรง (Force Sensor) ติดอยู่เพื่อวัดแรงกระทำของมนุษย์ ลักษณะของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 หุ่นยนต์โคบอลแบบล้อเดียว ที่มา: จาก [3]

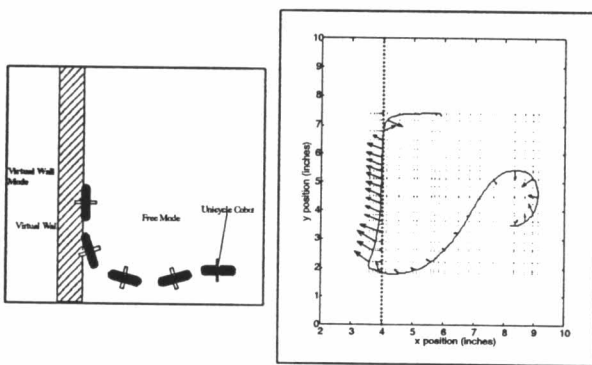
แบบวิธีการทำงานของโคบอลโดยทั่วไปจะมีแบบวิธีการทำงานที่คล้ายกัน ดังนั้นเราจะอธิบายแบบวิธีการทำงานด้วยตัวอย่างที่ได้ อธิบายมาข้างต้น ซึ่งแบบวิธีการทำงานของหุ่นยนต์โคบอล จะสามารถที่จะแบ่งได้ 2 ลักษณะดังนี้

**3.1 การทำงานแบบอิสระ (Virtual Caster)**

การทำงานในลักษณะนี้โคบอลจะประพฤติตัวเหมือนกับล้อรถเข็น (Caster Wheel) ทั่วไป คือจะไม่บังคับเส้นทางการเดินของผู้ใช้ ผู้ใช้จึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การทำงานในแบบนี้ทำได้โดยตัวโคบอลจะวัดแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของล้อ จากนั้นก็จะพยายามทำให้แรงนั้นเป็นศูนย์ซึ่งทำได้โดยการหมุนแกนเพลลาขับเพื่อเปลี่ยนทิศของล้อให้เป็นไปตามทิศทางที่ผู้ใช้ออกแรงกระทำ ทำให้แรงที่ส่งกลับไปยังผู้ใช้เป็นศูนย์ ผู้ใช้จึงรู้สึกเหมือนเคลื่อนที่ได้อิสระ

**3.2 การทำงานแบบผนังเสมือน (Virtual Wall)**

เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปชนกับกำแพงเสมือนหุ่นยนต์โคบอลแบบล้อเดียวจะทำการเปลี่ยนทิศทางของแรงและทิศทางของการเคลื่อนที่ ให้ชนกับกำแพงเสมือน โดยจะใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางของล้อให้สัมพันธ์กับกำแพงเสมือน ทำให้ผู้ใช้รู้สึกเหมือนกับไหลไปตามกำแพง เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่เข้าหากำแพงหุ่นยนต์โคบอลแบบล้อเดียวจะต้านการเคลื่อนที่ไว้ แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการเคลื่อนที่ออกจากกำแพงเสมือน (วัดได้จากแรงที่ตัวรับรู้แรง) หุ่นยนต์โคบอลแบบล้อเดียวก็จะกลับไปทำงานในแบบอิสระ



รูปที่ 5 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์โคบอลแบบล้อเดียว

รูปที่ 5 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์โคบอลแบบล้อเดียวที่จำลองกำแพงเสมือนที่ตำแหน่ง  $x = 4$  ในรูปยังได้แสดงทิศทางและขนาดของแรงกระทำของผู้ใช้ที่วัดได้จากตัวรับรู้แรงทั้ง 2 แบบวิธีการทำงาน

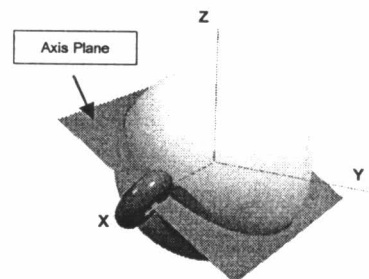
**4. การออกแบบหุ่นยนต์โคบอลสามมิติ**

หลักการของหุ่นยนต์โคบอลสามมิติได้ทำการนำหุ่นยนต์โคบอลจอยสติคมาประยุกต์เข้ากับแกนกลที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในพิกัดคาร์ทีเซียน  $x, y, z$  ส่วนประกอบของหุ่นยนต์โคบอลสามมิติเราสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 4 ส่วนประกอบหลัก ซึ่งแต่ละส่วนจะมีหน้าที่ที่แตกต่างกันไป ทำให้หลักการในการออกแบบของแต่ละส่วนประกอบจึงแตกต่างกันไปด้วย ส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์โคบอลสามมิติประกอบไปด้วย

- (1) ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลมโดยใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้น
- (2) ชุดส่งถ่ายกำลัง
- (3) ชุดจำกัดการเคลื่อนที่ให้ก้านต่อ 1
- (4) ชุดถ่วงดุล (Counterbalance)

**4.1 การออกแบบชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลม โดยใช้ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้น**

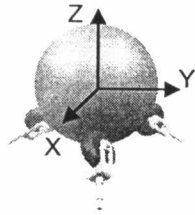
หลักการเบื้องต้นของชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลมเริ่มจากเมื่อเรานำอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นหรือลูกล้อหนึ่งมาต่อเข้ากับลูกทรงกลมที่ตรงจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมเอาไว้ (ลูกทรงกลมไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่เชิงเส้นได้แต่สามารถที่จะหมุนรอบแกนหมุนใดๆที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลม) ดังรูปที่ 6 จากรูปนี้เราสามารถที่จะสร้างระนาบที่เกิดจากแกนหมุนของลูกล้อและจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมได้ ซึ่งเมื่อเรามาพิจารณาให้ดูจะเห็นว่า แกนหมุนของลูกทรงกลมจะต้องอยู่บนตำแหน่งใด ๆบนระนาบนี้เท่านั้น และตำแหน่งของระนาบนี้จะขึ้นอยู่กับจะตำแหน่งของมุมของล้อว่าอยู่ตำแหน่งใด จากคุณสมบัติดังกล่าวของระนาบนี้เราจะขอเรียกระนาบนี้ว่า ระนาบแกนหมุน (Axis Plane)



รูปที่ 6 แสดงระนาบแกนหมุน

จะเห็นว่าล้อเพียงล้อเดียวจะสามารถสร้างระนาบแกนหมุนได้เพียงระนาบเดียว ซึ่งยังไม่สามารถที่จะบังคับการเคลื่อนที่ที่แน่นอนของลูกทรงกลมได้ จึงได้มีการเพิ่มล้อเข้าไปอีกหนึ่งล้อ ณ ตำแหน่งใด ๆบนลูกทรงกลมที่ไม่ทับตำแหน่งกับล้อก่อนหน้า ดังนั้นก็จะเกิดระนาบแกนหมุน 2 ระนาบที่ตัดกัน ณ ตำแหน่งที่ระนาบทั้งสองตัดกันนี้จะเกิดเส้นตรงเส้นหนึ่งขึ้น ซึ่งเส้นตรงที่เกิดขึ้นนี้ก็คือแกนหมุนของลูกทรงกลมนั่นเอง ทำให้เราสามารถที่จะบังคับการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลมได้ด้วยการบังคับตำแหน่งมุมของล้อทั้งสองที่บิดไปเท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยใช้ล้อจำนวน 3 ลูก วางในลักษณะท่ามุมกัน 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 7 เหตุผลที่มีล้อที่ 3 เพิ่มขึ้นมาเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิด

ซิงกูลาริตี (Singularities) ของระบบ(เกิดขึ้นเมื่อระนาบทับกัน) ซึ่งล้อยที่ 3 เราจะต้องบังคับให้หมุนตาม 2 ล้อยแรก ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งของ การมีล้อยจำนวน 3 ลูกก็คือทำให้เราสามารถที่จะตรึงตำแหน่งจุด ศูนย์กึ่งกลางของลูกทรงกลมได้ง่ายขึ้นและสามารถรับน้ำหนักของทรง กลมเอง ลักษณะของหุ่นยนต์โคบอลทสามมิตินั้นจะใช้ชีวิตที่แบบเชิงเส้น จำนวน 3 ชุด มาประยุกต์เข้ากับลูกทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 7 เพื่อที่จะ ทำให้สามารถที่จะบังคับแกนหมุนของลูกทรงกลมได้

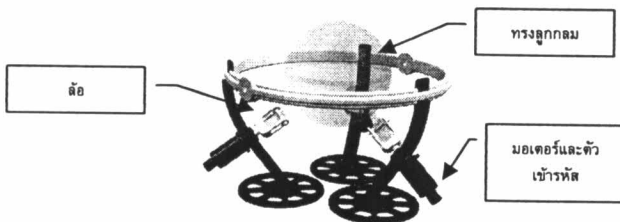


รูปที่ 7 การวางตำแหน่งของล้อยบนลูกทรงกลม

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของทรงกลมนั้นจะเกิดจากการหมุนรอบแกน หมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของทรงกลมเท่านั้น ในความเป็นจริงการ เคลื่อนที่ในลักษณะนี้ประยุกต์ใช้งานได้จำกัด ในการออกแบบหุ่นยนต์ โคบอลทสามมิติจึงได้มีการเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมของทรงกลม(roll, pitch, yaw) ให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นใน 3 มิติ (x y z) โดยให้การต่อกัน แกนต่อแขนกลสองแกนออกไปจากยอดของทรงกลมดังกล่าว (ดูรูป 9- 12) แขนกลสองแกนประกอปกันด้วยข้อต่อแบบหมุน (revolute elbow joint) ก้านต่อก้านแรกต่อยุ่บนยอดของทรงกลมและเคลื่อนที่ (translate) ไปกับทรงกลม กล่าวคือเมื่อทรงกลมหมุนรอบแกน x และ แกน y แขนกลก้านแรกจะเคลื่อนที่(translate) ไปด้วยคล้ายกับจอยสติค ทั้งไว้

แต่เมื่อทรงกลมหมุนรอบตัวมันเองในแกน z แขนกลก้านแรกจะไม่ เคลื่อนที่แต่จะทำให้แขนกลก้านที่สองหมุนขึ้นลงรอบข้อต่อซึ่ง รายละเอียดของระบบส่งกำลังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2

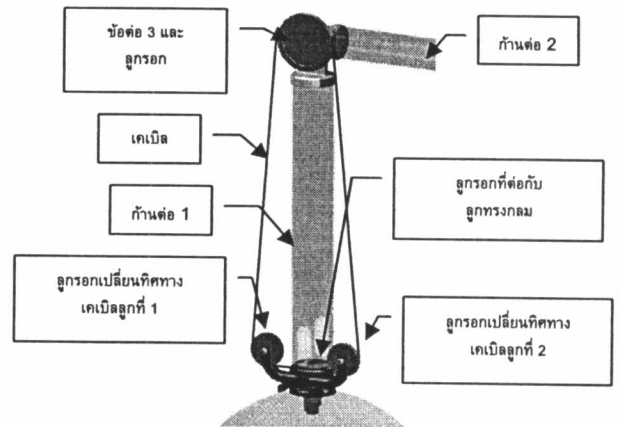
เนื่องจากแขนกลมีน้ำหนักจึงจำเป็นต้องใช้การถ่วงดุลในที่นี้เรา ออกแบบชุดถ่วงดุลไว้ภายในทรงกลม ลูกทรงกลมที่ใช้จึงมีด้านในกลวง เพื่อที่สามารถที่จะบรรจุชุดถ่วงดุลเข้าไปด้านในของลูกทรงกลม และ เพื่อความสะดวกในการประกอบเราจะออกแบบให้ลูกทรงกลมมี 2 ชั้นส่วนนำมาประกอปกัน ด้านบนของลูกทรงกลมจะทำการเจาะรู เพื่อที่จะต่อเข้ากับก้านต่อที่หนึ่ง ลักษณะของการออกแบบชุดนี้สามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การออกแบบหุ่นยนต์โคบอลทสามมิติที่รวมชุดชีวิตลูกทรงกลม และชุดฐาน

4.2 การออกแบบชุดส่งกำลังกำลัง

ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วการเคลื่อนที่ของทรงกลมรอบแกน z จะ ต่อระบบส่งกำลังทำให้แขนกลก้านที่สองหมุนรอบข้อต่อ3 ในรูปที่ 9 การออกแบบชุดนี้เราได้พยายามที่จะออกแบบให้มีความเฉื่อยต่ำไม่เกิด ระยะเวลา (Backlash) ดังนั้นเราจึงได้ทำเลือกใช้ชุดส่งกำลังกำลังแบบ เคเบิลมาใช้และให้มีอัตราทดเท่ากับ 1:2 ลักษณะของชุดส่งกำลังกำลังไป



ยังก้านต่อที่ 2 ของหุ่นยนต์โคบอลทสามมิติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9

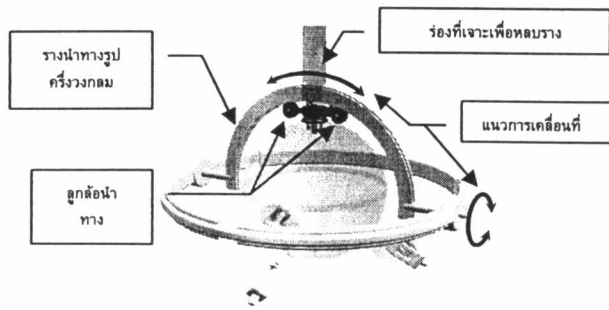
รูปที่ 9 ชุดส่งกำลังกำลังไปยังก้านต่อ 2

4.3 การออกแบบชุดจำกัดการเคลื่อนที่ให้กับันต่อ

เนื่องจากข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการใช้ข้อต่อลูกทรงกลมก็คือมัน เป็นการยากที่จะนำตัวรับรู้วัดการหมุนของก้านต่อ 1 เข้าไปติดตั้ง และ การเคลื่อนที่ของก้านต่อ 1 นั้นจะมีลักษณะที่เคลื่อนที่รอบจุดศูนย์กลาง ของลูกทรงกลมด้วยการเคลื่อนที่ 2 องศาของความอิสระ ในขณะที่ลูก ทรงกลมจะเคลื่อนที่ 3 องศาของความอิสระ จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบ ทั้งสองมีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ในขณะที่ส่วนประกอบทั้งสอง จะต้องต่อเข้าด้วยกัน ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบชุดนี้ขึ้นเพื่อที่จะ แก้ปัญหาทั้งสองขึ้นโดยจะมีลักษณะดังรูปที่ 10 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นราง นำทางรูปครึ่งวงกลม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น

ชุดจำกัดการเคลื่อนที่แบบรางนำทางรูปครึ่งวงกลมนี้จะทำให้ก้าน ต่อที่ 1 สามารถที่จะเคลื่อนที่ไต่รอบแกน X และ Y (พิภัก X ,Y ,Z ที่ใช้นี้ จะเป็นพิภักบนลูกทรงกลม) จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่รอบแกน Z ของ ก้านต่อที่ 1 จะถูกตรึงเอาไว้ ส่วนประกอบของชุดจำกัดการเคลื่อนที่ที่ จะประกอบไปด้วยรางนำทางรูปครึ่งวงกลม รางนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ 1 องศาของความอิสระ (หมุนรอบแกนการหมุนของรางนำทางรูปครึ่ง วงกลม) โดยรางนำทางจะถูกออกแบบให้มีแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ของลูกทรงกลมเสมอ ส่วนประกอบอีกส่วนหนึ่งของรางนำทางคือ ชุด ลูกล้อยนำทาง ซึ่งชุดนี้จะยึดติดกับก้านต่อที่ 1 มีลูกล้อยจำนวน 2 ลูกที่ เคลื่อนที่ไปตามรางนำทางรูปครึ่งวงกลม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าก้านต่อที่ 1 จะสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ตามวัตถุประสงค์อีกทั้งการเคลื่อนที่ของก้าน ต่อที่ 1 จะไม่ไปขัดการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลมอีกด้วย

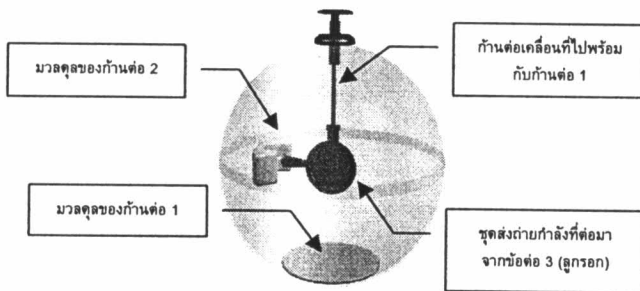




รูปที่ 10 แสดงการออกแบบรางนำทางรูปครึ่งวงกลม

4.4 การออกแบบชุดดั่งตุล

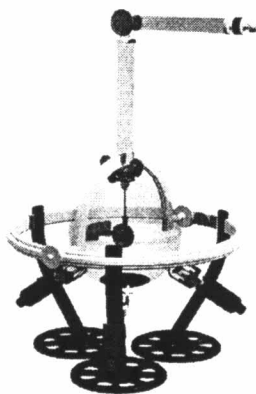
ชุดดั่งตุลเราให้ทำการออกแบบให้ซ่อนอยู่ในลูกทรงกลม และจากลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่มีลักษณะเป็นแขนกลที่มี 3 ข้อต่อ, 2 ก้านต่อ ทำให้การทำชุดดั่งตุลจึงต้องการเพียง 2 ชุดเท่านั้น การออกแบบแบบนี้ทำให้ความเฉื่อยของหุ่นยนต์ โคบอทสามมิติน้อยกว่าหุ่นยนต์สามมิติโคบอท ซึ่งลักษณะของชุดดั่งตุลของหุ่นยนต์โคบอท สามมิติสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงการออกแบบชุดดั่งตุล

จากรูปที่ 11 จะมีมวลดั่งน้ำหนัก 2 ชุด ชุดแรกจะอยู่ด้านล่างของลูกทรงกลมและยึดติดให้เคลื่อนที่ไปด้วยกัน ชุดนี้จะมีหน้าที่ดูลน้ำหนักก้านต่อ 1 ชุดที่สองจะมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกไป การเคลื่อนที่จะตรงกันข้ามกับก้านต่อ 2 มีจุดหมุนอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลม

4.5 สรุปการออกแบบ



รูปที่ 12 แสดงแบบของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ

จากการออกแบบส่วนต่างๆทั้ง 4 ส่วนเราสามารถที่จะนำมาประกอบกันเป็นหุ่นยนต์โคบอทสามมิติได้ดังแสดงในรูปที่ 12

5. สรุป

บทความนี้ได้แสดงถึงหลักการและลักษณะของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติที่มีลักษณะเป็นแขนกลที่สามารถเคลื่อนที่ได้ใน 3 มิติ (พิกัด X ,Y ,Z) โดยใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นแบบล้อยาทำการควบคุมความสัมพันธ์แต่ละข้อต่อของแขนกลผ่านการเคลื่อนที่ของทรงกลม ซึ่งหลักการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติตัวนี้นั้นเป็นวิธีการใหม่ในการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโคบอท จากนั้นบทความนี้ยังได้กล่าวถึงการออกแบบส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติและลักษณะโดยรวมของหุ่นยนต์โคบอทสามมิติ ปัจจุบันยังอยู่ในระหว่างดำเนินการจัดสร้างและวิเคราะห์คิเนมาติก (Kinematic) และการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทสามมิติอยู่ ดังนั้นในส่วนของคิเนมาติกและการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทสามมิติจะขอกล่าวถึงในโอกาสต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบคุณ คุณ ธนโชติ ชิพสมล และคุณ ศุภพน จันทรพัฒน์ ที่ได้ช่วยเหลือและค้นคว้าข้อมูลบางส่วนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Wannasuphoprasit, W., (1999), "Cobots: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University

[2] Wannasuphoprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. A. and Colgate, J. E., (1998), "Cobot, A Novel Material Handling Technology," 98-WA/MH-2, Present at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California

[3] W. Wannasuphoprasit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.

[4] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphoprasit, W., (1996), "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on, Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544.

[5] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphoprasit, B. Gillespie, C. Moore, "Cobot architecture", to be published in the IEEE Transactions on Robotics and Automation.

[6] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.

- [7] G. Bachman, "An Experimental Investigation of the Cobot Wheel Contact Patch", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997
- [8] Carl A. Moore, Michael A. Peshkin, J. Edward Colgate, "Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions"
- [9] B. Gillespie, J.E. Colgate, M. Peshkin, " A General Framework for Cobot Control ", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, August 2001
- [10] P. Akella, M. Peshkin, J.E. Colgate, W. Wannasuphprasit, N. Nagesh, J. Wells, S. Holland, T. Pearson, B. Peacock, " Cobot for the automobile assembly line ", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999
- [11] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสมล, "Serial-Link Cobot" ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พ.ศ. 2544
- [12] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, " การออกแบบและควบคุม ISVT " , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พ.ศ. 2544

## จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ Kinematics of Three Dimensional Serial Link Cobot

วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์<sup>1</sup>, ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330, โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889  
E-mail: [fmewwm@kankrow.eng.chula.ac.th](mailto:fmewwm@kankrow.eng.chula.ac.th)<sup>1</sup>, [Sirisak.S@student.chula.ac.th](mailto:Sirisak.S@student.chula.ac.th)<sup>2</sup>

Witaya Wannasuphoprasit<sup>1</sup>, Sirisak Sirkasemsuk<sup>2</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
Phayathai Rd, Pathumwan Bangkok 10330 Thailand, Tel: (662)0-2218-6610-1, Fax: (662)0-2252-8889  
E-mail: [fmewwm@kankrow.eng.chula.ac.th](mailto:fmewwm@kankrow.eng.chula.ac.th)<sup>1</sup>, [Sirisak.S@student.chula.ac.th](mailto:Sirisak.S@student.chula.ac.th)<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

หุ่นยนต์โคบอท (Cobot) คืออุปกรณ์เชิงหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทมีระบบเป็นแบบพาสซีฟ (Passive) โดยอาศัยวิธีการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์ (Robot Joint) ด้วยการปรับอัตราทดแต่ละข้อต่อด้วยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องมาต่อเข้ากับข้อต่อของหุ่นยนต์ ด้วยวิธีการนี้จะทำให้หุ่นยนต์โคบอทสามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ได้อย่างปลอดภัยเมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ หุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ (3D Cobot) เป็นอุปกรณ์แบบแขนกลที่มีพื้นที่การทำงานเชิงเส้น 3 มิติ บนแกนคาร์ทีเซียน (X,Y,Z) โดยใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องแบบล้อยจำนวน 3 ชุดนำมาต่อแบบขนานเข้ามาประยุกต์กับลูกทรงกลม บทความนี้กล่าวถึงการออกแบบการพัฒนาสร้างต้นแบบ และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง cobotic steering joint space และ configuration space ความสัมพันธ์นี้จะถูกใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โคบอทในโหมดต่างๆคือ โหมดการทำงานอิสระแบบเสมือน (Virtual Caster) หรือโหมดการทำงานการสร้างผนังแบบเสมือน (Virtual Wall) เนื่องจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแตกต่างอย่างสิ้นเชิงและไม่สามารถหาได้ด้วยวิธีการมาตรฐานเหมือนหุ่นยนต์โดยทั่วไป สืบเนื่องจากมี constraints กระทำระหว่างความสัมพันธ์ของข้อต่อทั้งหมด บทความนี้ได้กล่าวถึงวิธีการและหลักการในการหาความสัมพันธ์ (Cobot Kinematics) ดังกล่าวรวมถึงการแปรเปลี่ยนรูปของสเปซ (space) ต่างๆด้วย

### Abstract

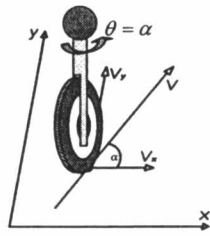
Cobots are robots that can work with human operator in a safely manner which required them to be constructed solely from passive systems. A cobot may be constructed using

Continuously Variable Transmissions (CVTs) at various joints of the robot. This paper presents a 3D cobot using three parallel CVTs connected to a single sphere. Designs, constructions and kinematics relations between joint space and the configuration space are presented. Due to the robot's special configurations, these kinematics relations required a special derivation method. These relations are essentials for the cobot to work in Virtual caster and Virtual wall modes.

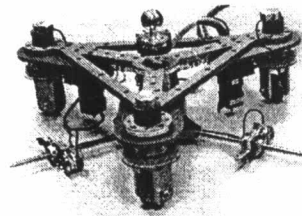
### 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีหุ่นยนต์ที่เป็นแบบโคบอทอยู่ 3 ชนิด ชนิดแรกจะเป็นหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ชุดควบคุมความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อแบบล้อยตัวอย่างของหุ่นยนต์ชนิดนี้เช่น หุ่นยนต์ Unicycle Cobot [3], หุ่นยนต์ Scooter Cobot [3], Extreme Joystick [18] เป็นต้น หุ่นยนต์โคบอทชนิดที่สองจะใช้ชุดควบคุมความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อแบบเชิงมุมเช่น หุ่นยนต์ 3 DOF Powered Cobot [8], หุ่นยนต์ Gantry Cobot at Ford [2] เป็นต้น ชนิดสุดท้ายซึ่งเป็นหุ่นยนต์โคบอทชนิดใหม่ล่าสุด หุ่นยนต์โคบอทชนิดนี้จะใช้ชุดควบคุมความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อแบบของไหล [14]

สำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ชุดควบคุมความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อแบบล้อยคล้ายกับ Extreme Joystick [18] ซึ่งออกแบบและพัฒนาโดย Santos, M. Julio, Northwestern University ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ 3 องศาขององศาอิสระ (Degrees of freedom) โดยมีความมุ่งหมายของการออกแบบก็คือ ง่าย เบา และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

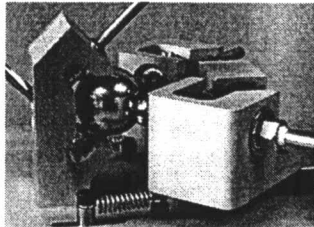


Linear CVT

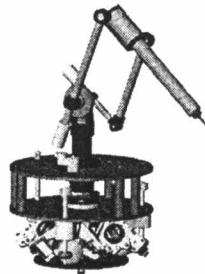


Scooter Cobot [3]

รูปที่ 1 ตัวอย่างอุปกรณ์ปรับอัตราทดเชิงเส้นและหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ อุปกรณ์ชุดนี้



Rotational CVT [6]

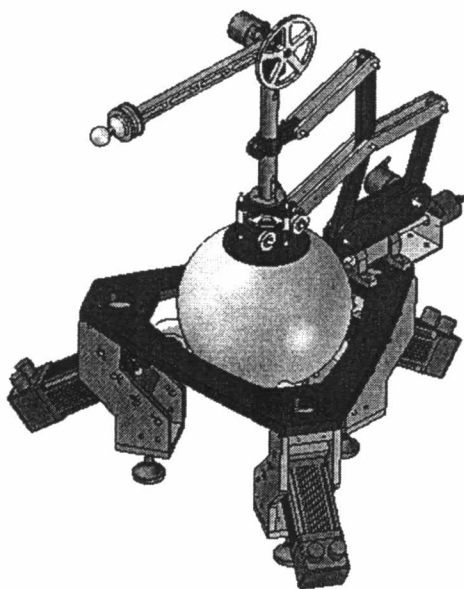


3 DOF Powered Cobot [8]

รูปที่ 2 ตัวอย่างอุปกรณ์ปรับอัตราทดเชิงมุมและหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ อุปกรณ์ชุดนี้

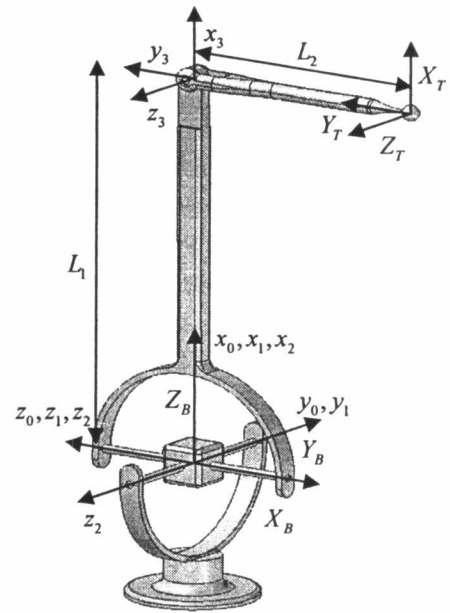
2. หลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์โคบอทแขนกล 3 มิติ

หุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติดังแสดงในรูปที่ 3 จะเป็นหุ่นยนต์โคบอทที่ใช้ชุดควบคุมความสั่นไหวแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบล้อ ด้วยการนำล้อมาต่อแบบขนานโดยอาศัยลูกทรงกลมมาช่วย ทำให้สามารถที่จะควบคุมความสั่นไหวได้ถึง 3 ข้อต่อ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้นำชุดควบคุมความสั่นไหวของแต่ละข้อต่อมาประยุกต์เข้ากับแขนกลที่มี 3 องศาของความอิสระ (Degrees of freedom) ซึ่งลักษณะของการออกแบบโดยละเอียดทางคณะผู้วิจัยได้เคยเผยแพร่แล้วในเอกสารงานวิจัย [13], [15] และ [16]



รูปที่ 3 แสดงหุ่นยนต์โคบอทแขนกล 3 มิติที่ออกแบบเสร็จแล้ว

3. จลศาสตร์เบื้องต้นของแขนกล



รูปที่ 4 การกำหนดเฟรมให้กับข้อของหุ่นยนต์โคบอทแขนกล 3 มิติ

เพื่อที่จะเข้าใจลักษณะของแขนกลของหุ่นยนต์โคบอทตัวนี้ได้ง่าย เราสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 4 ในรูปนี้ยังได้แสดงการกำหนดเฟรมต่างๆ ให้กับตัวแขนกลเพื่อที่จะนำไปหาเมตริกซ์การแปลงพิกัดการเคลื่อนที่ (Transformations matrix) ดังนั้นเราจะได้สมการจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics) ได้ดังนี้

$$\bar{R}(\theta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin \theta_2 \\ L_2 \sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ L_2 \cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ซึ่ง  $x, y, z$  เป็นตำแหน่งที่ปลายแขนของหุ่นยนต์,  $L_1$  และ  $L_2$  คือขนาดความยาวของก้านที่ 1 (Link 1) และก้านที่ 2 (Link 2) ตามลำดับ,  $\theta_1, \theta_2$  เป็นมุมของข้อต่อที่มีลักษณะแบบข้อต่อทรงกลม (roll and pitch), และ  $\theta_3$  เป็นมุมของข้อต่อที่มีลักษณะแบบข้อต่อ (elbow joint)

สำหรับสมการจลศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics) จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\bar{R}_J(r) = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}(y, z) \\ 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}{a + c} \right) \\ 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{L_2 \pm \sqrt{L_2^2 - c^2}}{c} \right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ซึ่ง  $a = \sqrt{y^2 + z^2}$ ,  $b = -x$  และ

$$c = \frac{1}{2L_1} (x^2 + y^2 + z^2 + L_1^2 - L_2^2)$$

และจากจลศาสตร์แบบย้อนกลับสามารถที่จะหาความเร็วที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทได้โดยสมการ  $\frac{dR}{dt} = J_R(q) \frac{dq}{dt}$  ซึ่ง  $J_R$  ก็คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian) ของจลศาสตร์แบบของหุ่นยนต์ทั่วไป เราสามารถที่จะแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$J_R = \begin{bmatrix} 0 & -L_2s_{23} - L_1c_2 & -L_2s_{23} \\ L_2c_1s_{23} + L_1c_1c_2 & L_2s_1c_{23} - L_1s_1s_2 & L_2s_1c_{23} \\ -L_2s_1s_{23} - L_1s_1c_2 & L_2c_1c_{23} - L_1c_1s_2 & L_2c_1c_{23} \end{bmatrix} \quad (3)$$

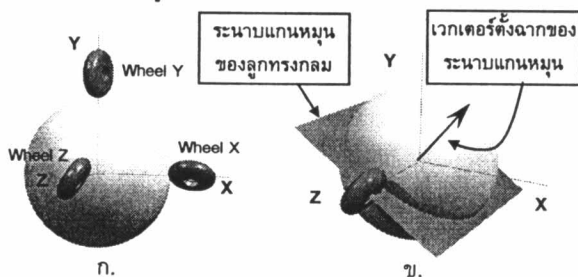
ซึ่ง  $c_1 = \cos\theta_1$ ,  $s_1 = \sin\theta_1$ ,  $c_2 = \cos\theta_2$ ,  $s_2 = \sin\theta_2$ ,  $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$  และ  $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$

**4. จลศาสตร์ของชุดปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อ**

จลศาสตร์ของชุดปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อของหัวข้อนี้เราจะทำการแสดงการหาความสัมพันธ์ของมุมแกนของล้อทั้งสามที่บิดหมุนเปลี่ยนตำแหน่งไปกับความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อของแขนกล

ส่วนหนึ่งของวิจัยนี้ เราจะทำการควบคุมตำแหน่งแกนหมุนของลูกทรงกลม (Sphere Axis of Rotation, SAOR) ให้อยู่ในทิศทางๆ โดยที่แกนหมุนนี้ต้องผ่านจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมนี้ด้วย ซึ่งในการควบคุมส่วนนี้เราจะทำการใช้ประโยชน์ของล้อที่มีคุณสมบัติสามารถที่จะบังคับแนวการเคลื่อนที่ได้

จากจุดประสงค์ของการออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้วนี้และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณ ทำให้เราสามารถที่จะวางตำแหน่งของลูกล้อต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5 ก. โดยเราจะใช้ลูกล้อจำนวน 3 ลูก แต่ละลูกจะวางอยู่ในตำแหน่งบนแกนต่างๆของ โคออร์ดิเนต X, Y, Z (เป็นเฟรมที่ไม่ได้อยู่ในรูปที่ 4 ซึ่งเฟรมนี้จะวางอยู่บนบนสเปซโดยมีจุดศูนย์กลางของเฟรมอยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลม) และลูกล้อทั้ง 3 ลูกจะต้องสัมผัสกับลูกทรงกลมตลอดเวลา



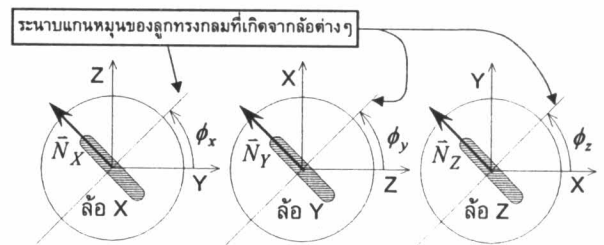
รูปที่ 5 ก. ตำแหน่งล้อบนลูกทรงกลม, ข. แสดงระบบแกนหมุนของลูกทรงกลมเนื่องจาก constraints ของล้อ

แกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) ที่กำลังจะหาจะมี ความสัมพันธ์กับมุมของลูกล้อทั้ง 3 ที่บิดตัวไป ณ ตำแหน่งมุมต่างๆกันซึ่งความสัมพันธ์นี้เราจะทำการแสดงในหัวข้อถัดไป

ในอันดับแรกเราจะทำการพิจารณาผลที่เกิดขึ้น เมื่อมีล้อเพียงลูกเดียวแล้วนำมาสัมผัสกับลูกทรงกลมที่ตำแหน่งแกนหมุนของล้อทำมุมดังในรูปที่ 5 ข. และเราจะทำการกำหนดให้จุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมให้อยู่กับที่ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลูกทรงกลมนี้จะสามารถที่จะหมุนได้

อย่างเดียว ซึ่งแกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) นี้จะต้องผ่านจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมและแกนหมุนนี้จะต้องอยู่บนระนาบแกนหมุนของลูกทรงกลม ซึ่งระนาบแกนหมุนของลูกทรงกลมนี้เป็นระนาบที่ถูกกำหนดโดยจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมและแกนหมุนของลูกล้อ

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถกำหนดแกนหมุนของลูกทรงกลมที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมในทิศทางต่างๆ ได้โดยใส่ลูกล้อเข้าไปจำนวน 2 ลูก แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกใส่ลูกล้อจำนวน 3 ลูก วางอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 6 ซึ่งลูกที่สามที่ใส่เข้าไปนี้จะเป็นการใส่ที่เกินความต้องการในการบังคับแกนหมุนของลูกทรงกลม (Redundant wheel) เนื่องจากเราต้องการให้ลูกทรงกลมวางอยู่บนลูกล้อได้โดยมีความเสถียรและอีกเหตุผลหนึ่งในการนี้ที่ระนาบแกนหมุนของลูกทรงกลมที่เกิดจากลูกล้อจำนวน 2 ลูกเกิดการขนานกันจะทำให้เกิดจุดตัดของระนาบเป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งจะทำให้เกิดแกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) ในตำแหน่งที่ไม่แน่นอน ซึ่งการใส่ลูกล้อลูกที่ 3 จะสามารถที่จะแก้ได้ทั้งสองกรณี



รูปที่ 6 ตำแหน่งของล้อทั้ง 3 บนระนาบต่างๆ

จากรูปที่ 6 สามารถที่จะหาเวกเตอร์ที่ตั้งฉากของระนาบแกนหมุนของลูกทรงกลมของแต่ละล้อได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{N}_X &= -(\sin\phi_x)\hat{j} + (\cos\phi_x)\hat{k} \\ \vec{N}_Y &= (\cos\phi_y)\hat{i} - (\sin\phi_y)\hat{k} \\ \vec{N}_Z &= -(\sin\phi_z)\hat{i} + (\cos\phi_z)\hat{j} \end{aligned} \quad (4)$$

ซึ่ง  $\vec{N}_X, \vec{N}_Y, \vec{N}_Z$  คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากของระนาบแกนหมุนของลูกทรงกลมของล้อ X, Y และ Z ตามลำดับ,  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  คือมุมของแกนล้อ X, Y และ Z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6

เนื่องจากเวกเตอร์แกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) ซึ่งจะเกิดการตัดกันของระนาบทั้งสามจะต้องตั้งฉากกับ  $\vec{N}_X, \vec{N}_Y$  และ  $\vec{N}_Z$  เพราะฉะนั้นเวกเตอร์แกนหมุนของลูกทรงกลมที่ต้องการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{N}_X \times \vec{N}_Y &= \sin\phi_x \sin\phi_y \hat{i} + \cos\phi_y \cos\phi_x \hat{j} + \sin\phi_x \cos\phi_y \hat{k} \\ \vec{N}_Z \times \vec{N}_X &= \cos\phi_z \cos\phi_x \hat{i} + \sin\phi_z \cos\phi_x \hat{j} + \sin\phi_z \sin\phi_x \hat{k} \end{aligned} \quad (5)$$

สมการ (5) และ (6) จะต้องเป็นเวกเตอร์ที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน ดังนั้นเราจะได้

$$\tan \phi_z = \cot \phi_y \cot \phi_x \quad (7)$$

ซึ่งสมการที่ (5) และ (6) ที่ได้เป็นสมการที่ไม่ได้อยู่บนเฟรมที่ฐานของหุ่นยนต์โคบอท (Base Frame) ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องแปลงพิกัด (Transform Coordinate) ของเวกเตอร์แกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) ที่หาได้ให้ไปอยู่บนเฟรมที่ฐานของหุ่นยนต์โคบอท ซึ่งเมตริกซ์สำหรับการหมุนเฟรม (Rotation matrix) สามารถแสดงได้ดังนี้

$${}_{Wh}^B R = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ซึ่ง  ${}_{Wh}^B R$  คือเมตริกซ์การหมุนแกนของ B คือ เฟรมของฐานหุ่นยนต์เทียบกับ Wh คือ เฟรมของล้อ

เราสามารถที่จะหาแกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) เทียบกับเฟรมของฐานหุ่นยนต์ได้จาก  $\vec{A}_B = {}_{Wh}^B R (\vec{N}_X \times \vec{N}_Y)$  ดังนั้นเราจะได้

$$\vec{A}_B = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} [-2\sin \phi_x \sin \phi_y + \cos \phi_y \cos \phi_x + \sin \phi_x \cos \phi_y] \\ \frac{1}{\sqrt{2}} [\cos \phi_y \cos \phi_x - \sin \phi_x \cos \phi_y] \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} [\sin \phi_x \sin \phi_y + \cos \phi_x \cos \phi_y + \sin \phi_x \cos \phi_y] \end{bmatrix} \quad (9)$$

ซึ่ง  $\vec{A}_B$  คือเวกเตอร์แกนหมุนของลูกทรงกลม (SAOR) ที่อยู่บนเฟรมของฐานหุ่นยนต์

สมการแกนหมุนต้องมีทิศทางเดียวกันกับเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมของเฟรมที่ฐาน ดังนั้นเมื่อนำเวกเตอร์ทั้งสองมาครอส (Cross) กันจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมก็คือ

$$\vec{\omega}_B = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

ซึ่ง  $\vec{\omega}_B$  คือเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมบนเฟรมของฐานหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกเป็น  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$

และเช่นเดียวกันสมการที่ (9) และ (10) จะต้องมีการคูณกัน ดังนั้นจากสมการ  $\vec{A}_B \times \vec{\omega}_B = \vec{0}$  จะได้

$$\frac{\omega_z}{\omega_y} = \frac{C}{B}, \quad \frac{\omega_z}{\omega_x} = \frac{C}{A}, \quad \frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{B}{A} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) และ (7) ทำให้เราสามารถที่จะหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของมุมแต่ละล้อกับความเร็วจึงมุมของเฟรมที่ฐานได้ดังนี้

$$\tan \phi_x = \frac{bc\omega_x + (a_1c - a_2c)\omega_y - a_1b\omega_z}{bc\omega_x + (a_2c - a_1c)\omega_y - a_1b\omega_z} \quad (12)$$

$$\tan \phi_y = \frac{-2bc\omega_x + 2a_2b\omega_z}{bc\omega_x + (a_1c - a_2c)\omega_y - a_1b\omega_z} \quad (13)$$

$$\tan \phi_z = \frac{bc\omega_x + (a_2c - a_1c)\omega_y - a_1b\omega_z}{-2bc\omega_x + 2a_2b\omega_z} \quad (14)$$

ซึ่ง  $a_1 = -\sqrt{2/3}$ ,  $a_2 = 1/\sqrt{6}$ ,  $b = 1/\sqrt{2}$ ,  $c = -1/\sqrt{3}$

ความเร็วเชิงมุมของเฟรมที่ฐานนั้นจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของข้อต่อ ซึ่งความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อนั้นสามารถที่จะเขียนให้อยู่บนเฟรมที่ 1 ได้ ลักษณะดังกล่าวเกิดจากคุณสมบัติของกลไกที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อบนเฟรมที่ 1 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\omega_{J1} = \begin{bmatrix} r\dot{\theta}_3 \\ -\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

ซึ่ง  $\omega_{J1}$  คือความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อบนเฟรมที่ 1,  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$  คือความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อที่ได้อธิบายไว้แล้ว,  $r$  คืออัตราทดของข้อต่อที่ 3 ซึ่งในที่นี้จะเท่ากับ 2

จากนั้นทำการแปลงความเร็วเชิงมุมดังกล่าวให้อยู่ในเฟรมที่ฐาน ซึ่งเมตริกซ์การหมุนเฟรมจากเฟรม 1 ไปเป็นเฟรมที่ฐานก็คือ

$${}^B_1 R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ความเร็วเชิงมุมเฟรมฐานกับความเร็วเชิงมุมเฟรม 1 ได้ดังนี้

$$\omega_B = {}^B_1 R \omega_{J1} = \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_1 \\ 2(\sin \theta_1)\dot{\theta}_3 - (\cos \theta_1)\dot{\theta}_2 \\ 2(\cos \theta_1)\dot{\theta}_3 + (\sin \theta_1)\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 5. จลศาสตร์แบบโคบอทของแขนกล

เนื่องจากตามหลักการทั่วไปของหุ่นยนต์โคบอทที่ตำแหน่งปลายสุด (end-effector) ของหุ่นยนต์โคบอทจะต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกับมนุษย์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอินพุต (input) ของหุ่นยนต์โคบอทก็คือสัญญาณการเคลื่อนที่ของมนุษย์ จากนั้นหุ่นยนต์โคบอทจะทำการปรับความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของมนุษย์หรือกำหนด

เสมือนตามแต่ว่าหุ่นยนต์โคบอทจะอยู่ในโหมดการทำงานแบบไหน [3] ซึ่งจะเห็นได้ว่าแตกต่างจากหลักการควบคุมหุ่นยนต์ธรรมดาโดยทั่วไป ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทจึงมีจลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทที่พัฒนาขึ้นมา โดยเฉพาะ

จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทจะใช้หลักการของเวกเตอร์สัมผัส (Tangent vector) และเวกเตอร์เคอร์เวเจอร์ (Curvature vector) เป็นหลัก ดังนั้นเราจะทำการแปลงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ทั้งสองข้างต้น (Tangent transformation and Curvature transformation) ซึ่งตำแหน่งที่ปลายแขนของหุ่นยนต์โคบอทก็คือ

$$\bar{R} = [x, y, z] \quad (18)$$

ดังนั้นเราจะได้เวกเตอร์สัมผัส และเวกเตอร์เคอร์เวเจอร์ได้ดังนี้

$$\frac{d\bar{R}}{dt} = \bar{T}s \quad (19)$$

$$k\bar{N} = \frac{d\bar{T}}{ds} \quad (20)$$

ซึ่ง  $\bar{T}$  คือเวกเตอร์สัมผัสหนึ่งหน่วย,  $s$  คือระยะทาง,  $s'$  คืออัตราเร็ว,  $k\bar{N}$  คือเวกเตอร์เคอร์เวเจอร์,  $k$  คือค่าเคอร์เวเจอร์,  $\bar{N}$  คือเวกเตอร์นอร์มอลหนึ่งหน่วย (unit normal vector)

จากนั้นจะสามารถแปลงให้อยู่ในสเปซของข้อต่อ (Joint Space) ได้ จากสมการความสัมพันธ์เวกเตอร์มุมของข้อต่อกับเวกเตอร์ตำแหน่งที่ปลายแขนกล ซึ่งก็คือ

$$\bar{R}_J = L(\bar{R}) \quad (21)$$

ดังนั้นเราสามารถที่จะแปลงค่าต่างๆได้ดังนี้

$$\bar{T}_J = \frac{d\bar{R}_J}{ds_J} = \frac{\partial L}{\partial \bar{R}} \frac{d\bar{R}}{ds} \frac{ds}{ds_J} \quad (22)$$

ซึ่งตัวห้อย  $J$  หมายถึงตัวแปลที่อยู่ในสเปซของข้อต่อ, เทอม  $\partial L / \partial \bar{R}$  คือเมตริกซ์จาโคเบียนเราจะกำหนดเป็น  $J(\bar{R})$ , และสำหรับ  $ds/ds_J$  คือค่าสเกลาร์ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (22) ใหม่ดังนี้

$$\bar{T}_J = \frac{J\bar{T}}{|J\bar{T}|} \quad (23)$$

และเวกเตอร์เคอร์เวเจอร์ในสเปซของข้อต่อสามารถแสดงได้ดังนี้

$$k_J \bar{N}_J = \frac{d\bar{T}_J}{ds_J} = \frac{[\mathbf{I} - \bar{T}_J \bar{T}_J^T]}{|J\bar{T}|^2} = \left[ T^T \frac{\partial J}{\partial \bar{R}} T + Jk\bar{N} \right] \quad (24)$$

เทอม  $\bar{T}^T \frac{\partial J}{\partial \bar{R}} \bar{T}$  สามารถเขียนให้อยู่รูปของเมตริกซ์เฮสเซียน (Hessians) ได้ ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [9]

## 6. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอจลศาสตร์แบบมาตรฐานของหุ่นยนต์ทั่วไป แสดงหลักการหาจลศาสตร์ของชุดปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อ และยังได้แสดงจลศาสตร์แบบหุ่นยนต์โคบอทเอาไว้อีกด้วย ซึ่งสมการจลศาสตร์แบบต่างๆที่ได้กล่าวถึงนี้สามารถที่จะนำไปออกแบบระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติให้สามารถที่จะทำงานในโหมดอิสระแบบเสมือน (Virtual caster mode) และในโหมดผนังแบบเสมือน (Virtual wall mode) ได้ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยจะนำมาเสนอในโอกาสต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณ ธนโชติ ชีพสุมล ที่ได้ช่วยเหลือและค้นคว้าข้อมูลบางส่วนในงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wannasuphoprasit, W., (1999), "Cobots: Collaborative Robots", Ph.D. Dissertation, Northwestern University
- [2] Wannasuphoprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. A. and Colgate, J. E., (1998), "Cobot, A Novel Material Handling Technology," 98-WA/MH-2, Present at the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California
- [3] W. Wannasuphoprasit, R.B. Gillespie, J.E. Colgate, M.A. Peshkin, "Cobot Control", Proceeding of the IEEE 1997 International Conference on Robotics & Automation, pp. 3571-3576, 1997.
- [4] Colgate, J.E., Peshkin, M.A. and Wannasuphoprasit, W., (1996), "Nonholonomic Haptic Display," IEEE International Conference on, Robotics and Automation. Minneapolis, pp. 539-544.
- [5] M. Peshkin, J.E. Colgate, P. Akella, W. Wannasuphoprasit, B. Gillespie, C. Moore, "Cobot architecture", to be published in the IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- [6] C. Moore, "Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997.
- [7] G. Bachman, "An Experimental Investigation of the Cobot Wheel Contact Patch", Master's thesis, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, March 1997

- [8] Carl A. Moore, Michael A. Peshkin, J. Edward Colgate, "Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions"
- [9] B. Gillespie, J.E. Colgate, M. Peshkin, " A General Framework for Cobot Control ", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, August 2001
- [10] P. Akella, M. Peshkin, J.E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, N. Nagesh, J. Wells, S. Holland, T. Pearson, B. Peacock, " Cobot for the automobile assembly line ", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999
- [11] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ธนโชติ ชีพสุมล, "Serial-Link Cobot" ,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พ.ศ. 2544
- [12] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, "การออกแบบและควบคุม ISVT", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พ.ศ. 2544
- [13] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, "หุ่นยนต์โคบอลสามมิติ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 พ.ศ. 2545
- [14] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และ ศุภพน จันทร์พัฒน์, "รูปแบบใหม่ของหุ่นยนต์โคบอล", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 พ.ศ. 2545
- [15] W. Wannasuphoprasit, S. Sirikasemsuk, "The Design and Development of 3DP Cobot Manipulator", Proceedings of IMECE, 2002
- [16] Wannasuphoprasit W., Sirikasemsuk S., "On development of a 3D passive manipulator" 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on, Volume: 2, pp. 1285-1289
- [17] Gregory J. Hamlin, A. C. Sanderson, "A Novel Concentric Multilink Spherical Joint with Parallel Robotics Applications", IEEE International Conference on Robotics and Automation., Vol. 2, pp. 1267-1272, 1994
- [18] Santos, M.J., "Extreme Joystick : A Cobot with Stored Energy", Ph.D. Proposal, Mechanical Engineering Department, Northwestern University., 1997



## On Development of A 3D Passive Manipulator

W. Wannasuphprasit and S. Sirikasemsuk

Dept. of Mechanical Engineering  
Chulalongkorn University  
Bangkok 10330, Thailand  
Email: witaya.w@eng.chula.ac.th

### Abstract

This paper describes development of a 3-Dimensional Workspace Passive Manipulator. We constraint a movement of a sphere to rotate about its own center and transform their 3 rotational motion to a three dimensional workspace  $(x,y,z)$ . The *3DP Manipulator* consists of a two serial links connected to a spherical ball, and three steering wheel joints. Three steering wheels control rotating axis and limit the sphere to only rotate about its own center. The sphere has 3 C-space, roll, pitch, and yaw  $(\phi, \alpha, \beta)$ . The serial links, attached on top of the ball, transform sphere rotating to Cartesian translation motion. The counterbalance design and kinematics of the manipulator are also provided.

### 1. Introduction

Haptic Interfaces are a class of robotic devices that specifically designed for human interaction in simulating virtual environment. Ranges of Haptic research include hardware design, controls, human related experiment, virtual applications, and so on. Most of haptic interfaces are active systems that use servo actuators to create virtual forces to interact with human operator. As point out by Colgate and Brown [2] human can induce instability to the system. Since active systems require high servo gain to produce a high quality virtual environment (such as stiff, smooth, and frictionless wall), safety is a big concern when such as system interacting with operators.

Brakes are passive elements that can create a virtual surface without adding energy to the system. However brakes can implement virtual surfaces with limited directions, and in some configurations can result in a struck mechanism [3]. In addition, brakes absorb energy make them less appeal for smooth and frictionless surfaces.

To solve this intrinsic problem, we purpose to develop a system that *does not add energy to and yet not absorb energy from the system*.

### 1.1 Cobots: Collaborative Robots

Colgate, Peshkin, and Wannasuphprasit, introduced a nonholonomic haptic interface that redirect human operator's applied force to create a virtual surface. This passive device has two-dimensional working space. The device later called Unicycle Cobot, where Cobot stands for Collaborative Robot.

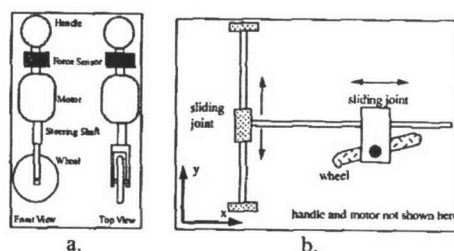


Fig 1: Unicycle Cobot:

Cobots are a class of robotic devices intended for direct cooperation with a human operator. A human operator and a cobot share control within a same workspace. Unlike actuated-joint robots, Cobots utilize steering joint to create nonholonomic constraints between their generalize coordinates. These make cobots physically passive.

The unicycle cobot is a one-wheel device. It consists of a wheel (see Fig 1), a steering mechanism, a force sensor, a x-y supporting frame, and a handle. The axis of the steering shaft (see Fig 1.a) passes through the wheel-ground contact point. Hence, the steering motor cannot transmit any power to the handle and thus make the cobot inheritedly passive. The motor only change the wheel axis directions but can not cause the wheel to roll. The motion in the rolling direction come form human operator through the handle.

The unicycle cobot is controlled in two modes 1) free mode control, and 2) virtual wall control.

**Free Mode Control:** The unicycle cobot has one DOF and that is the motion along the wheel rolling direction.

Free mode control simulates the device as if there is 2 DOF to the user by steering the wheel to minimize the user forces normal to the wheel's rolling direction [3]. This behavior is similar to the caster wheels of a furniture chair.

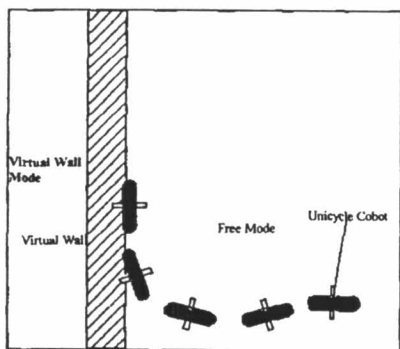


Fig 2: Example of Unicycle Cobot implementing virtual wall

**Virtual Wall Control:** When the user brings the cobot to a virtual wall. The wheel is steered in a direction that is tangential to the constraint surface. If the user wants to move out from the surface, the controller will switch back to *Free mode control*. The example of unicycle cobot exhibit a virtual wall is shown in Fig 2. The virtual walls implemented by the unicycle cobot were very convincing. The walls are smooth, hard, and frictionless.

There are a number of cobots developed in past recent years. By far prototypes of cobots can be broadly classified in two groups by joints they used; wheel and spherical joints. Wheel-joint cobots include Unicycle Cobots [3], Scooter Cobot [6], Door-Unloader Industrial Cobot [7], and Extreme Joystick Cobot [5]. The other type using spherical joint includes a Gantry Cobot developed at Ford, and 3 DOF Arm Cobot developed by Moore et al [1].

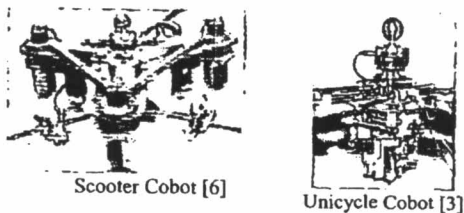


Fig 3: Examples of wheel joint cobots

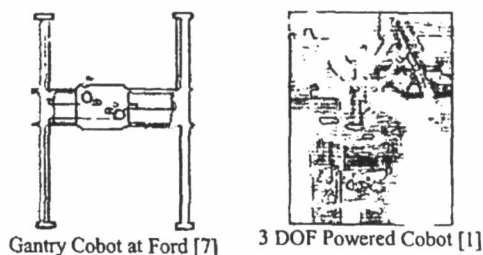


Fig 4: Examples of spherical joint cobots

With the simplicity of the wheel joint, in this work, we develop a 3 dimensional passive cobot utilize wheel joints.

**2. Design of 3D Passive Manipulator**

**2.1 Overall Design**

Our primary goal is to develop a 3 dimensional workspace (x,y,z) passive manipulator, that can be use as a test base for virtual environment experiment, human robot interaction, and to verify control and kinematics.

The preferred design characteristics of the manipulators are low inertia, simplicity, passive<sup>1</sup>, and small footprint. We reviewed an early design of *the extreme joystick Cobot* [5] that has 2 D workspace. We then transform the 3D rotating motion of the sphere to the translational Cartesian motion (x,y,z) of the manipulator.

Refer to Fig 5. The 3-DP manipulator consists of a hollow sphere, three sets of wheel joints that located on a base, a two-link arm, counter balance, and a force sensor.

<sup>1</sup> Yet a power assist are considered for further study

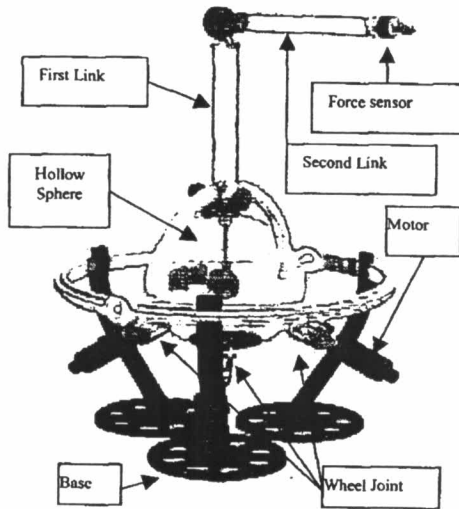


Fig 5. 3DP Cobot Manipulator

Three steering wheel joints support the hollow sphere. Similar to singularity problem on *Scooter Cobot* [4], two wheels are inadequate to constraint sphere in all configurations the third wheel is added to eliminate singularity and make it self support. The sphere has three-configuration space,  $(\phi, \alpha, \beta)$ , roll pitch yaw.

On top of the sphere, there is a two-link arm. The first link of the arm is connected directly to the sphere. The first link translates with the sphere in roll and pitch motions. However it is free to rotate relative to the sphere yaw motion. A circular guide supports the arm and prevents the first link to rotate with the sphere yaw motion. A revolute joint (elbow joint) connects both links together. The force sensor and the handle are attached at the end of the second link as shown in Fig 5.

**2.2 Link Connections**

Refer to Fig 6, the yaw motion (angular motion around the first link's axis) is coupled to the revolute joint of the links via cable transmission. One revolution of the elbow joint results in two revolutions of yaw motion (the rotation around the first link axis). Thus the roll-pitch-yaw motion of the sphere results in x-y-z motion of the end effector.

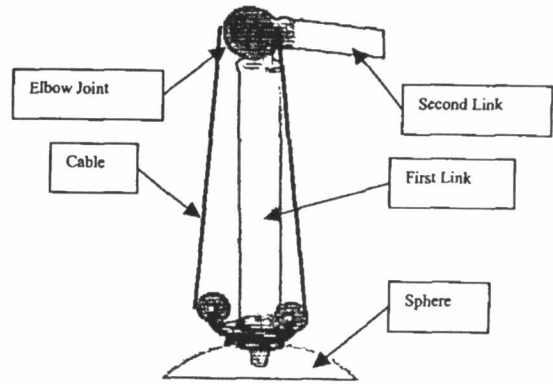


Fig 6. Cable transmission between yaw angle and elbow angle

**2.3 Counter balance**

Since the manipulators are passive and there is gravitational force that causes the arm to move downward, to save space, we add counter balance mechanism inside the sphere. Consider Fig 7, the counterbalance mechanism consists of a serial link and two masses. The joint of this serial link rotate at the same rate but opposite direction with the manipulator elbow joint via a transmission (not shown in Fig 7). The mass, called stationary mass, is placed at the bottom of the sphere. The purpose of this mass is to counter the gravitational effect of the manipulator first link. The other mass is connected to end of a serial link and compensates gravitation for the second link and end effector of the manipulator.

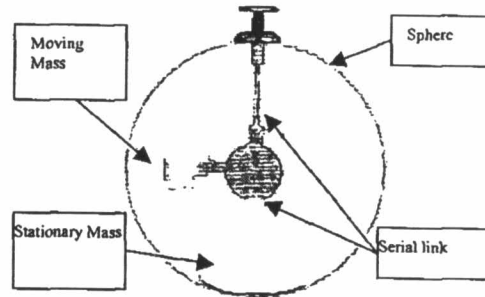


Fig 7. Counter balance mechanism

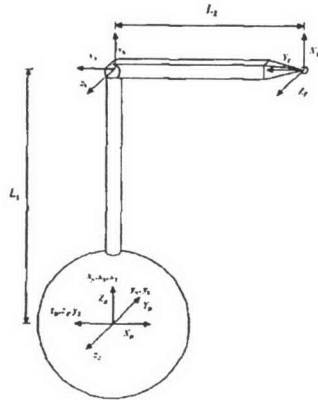


Fig 8. Schematics of 3DP Cobotic Manipulator

**3. Kinematics**

The 3D passive manipulator is a parallel redundant cobot. In case of Scooter[6], the cobot rotates about a point called COR (Center of rotation) where all wheel axes are intersected. By comparison, the motion of the 3DP manipulator is determined by a rotating axis that passes through the center of the sphere.

In rolling contact with a non-slip condition, a wheel constraints the sphere to rotate along its rolling direction. For each wheels, the wheel rolling axis and steering axis create a plane. The sphere's rotating axis is lie in this plane. Only two wheels are required to determine a sphere's rotating axis<sup>2</sup>. The sphere's rotating axis is generated from the intersection of these two planes. However there is a singularity when these two plane are parallel. Thus the third wheel is added and must agree with the others otherwise the sphere will not move at all.

Here we define  $C_i[x,y,z]$ ,  $C_j[\theta_1, \theta_2, \theta_3]$  as a task space and joint space of the manipulator.

**3.1 Forward and Inverse Kinematics**

Refer to Fig 8. The forward kinematics of the manipulator can be written as:

$$R_r(\theta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin(\theta_1) \\ L_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ L_2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

,where  $x,y,z$  is a configuration of the end effector,  $L_1$  and  $L_2$  are effective lengths of lower and upper arms,  $\theta_1, \theta_2$  are

<sup>2</sup> For singularity, the third wheel is required

the joint angles of the ball joint (roll and pitch), and  $\theta_3$  is the elbow angle of the manipulator. Note that the transmission ratio of yaw to  $\theta_3$  is 2.

The inverse kinematics of the manipulator can be derived as:

$$R_i(r) = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}(y,z) \\ \tan^{-1}(b,a) \pm \tan^{-1}(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \\ \tan^{-1}(y \csc \theta_1 - L_1 \cos \theta_2, x + L_1 \sin \theta_2) - \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

, where  $a = -2yL_1 \csc(\theta_1)$ ,  $b = -2xL_1$ , and  $c = L_2^2 - x^2 - y^2 \csc^2(\theta_1) - L_1^2$

**3.2 The moving wheel space**

The wheel space of the manipulator is a 2D planar space that can be thought as a thin flat sheet that lies between the wheel and the sphere. The wheel space is normal to its steering axis and translates with the sphere surface with no slip condition. There are three wheel spaces for this manipulator. These spaces denoted by  $W_i$ ,  $i = 1,2,3$ . Thus it is possible to write a configuration vector  $r_i$  of the wheel space as

$$r_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{u_i}(R) \\ L_{v_i}(R) \end{bmatrix}, i = 1,2,3 \quad (3)$$

**3.3 The Velocity**

The velocity of the end effector can be easily found by  $\frac{dR}{dt} = J_R(q) \frac{dq}{dt}$ , where  $J_R$  is the Jacobian, which can be displayed as

$$J_R = \begin{bmatrix} 0 & -[L_2 S_{23} + L_1 C_2] & -L_2 S_{23} \\ [L_2 C_1 S_{23} + L_1 C_1 C_2] & [L_2 S_1 C_{23} + L_1 S_1 S_2] & L_2 S_1 C_{23} \\ -[L_2 S_1 S_{23} + L_1 S_1 C_2] & [L_2 C_1 C_{23} + L_1 C_1 S_2] & L_2 C_1 C_{23} \end{bmatrix}$$

, where  $C_i = \cos(\theta_i)$ ,  $S_i = \sin(\theta_i)$ ,  $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ , and  $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ .

In order to control this manipulator successfully, we must calculate each wheel rolling velocity. In the design we do not instrument the velocity sensor on the steering wheel joints because of the need for quick and continuous steering without joint limit. Rather we measure the joint velocity of the sphere and infer to wheel rolling velocity with assumption of no slip condition. The wheel rolling velocity can be easily written as:

$$u_i = \bar{I}_i \bullet (\bar{\omega} \times \bar{r}_i), \quad i = 1,2,3$$

Here  $\vec{r}_i$  is positioning vector from the sphere center to the contact point of each wheels,  $\vec{\omega}$  is the angular velocity of the sphere rotating axis.

#### 4 Future and Ongoing Work

##### Modular Design

We currently reevaluate the design so that the base of three wheels can be separated and be used as a Scooter Cobot.

##### Power Assist and Antigravity

It is possible to add power the sphere and thus can compensate for the gravity. The power can be added via wheel rolling direction. However, the wheel mechanism is more complicated with larger inertia, and at least two power wheels are required. Since the sphere is constraint to rotate around its own center, one solution is to power the sphere itself. We currently study a possibility of using gyrotor effect to power the manipulator and counter gravity.

#### 5 Acknowledgements

Authors would like to thank Faculty of Engineering and Graduate school of Chulalongkorn University, as well as National Metal and Materials Technology Center for partly funding this project.

#### References

- [1] Carl A. Moore, Michael A. Peshkin, J. Edward Colgate, *Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions*, 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit MI
- [2] Colgate, J.E., and Brown, J.M. (1994), "Factors Affecting the Z-width of a Haptic Display," Proc. International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA: IEEE R&A Society, 4, pp. 3205-10.
- [3] Colgate, J. E., W. Wannasuphprasit and M. A. Peshkin, *Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators*. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Atlanta. 1996
- [4] M.A. Peshkin, J.E. Colgate, C.A. Moore, W.wannasuphprasit, R.B. Gillespie, and P. Akella, *Cobot Architecture*, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol.17, pp.377-389, Aug. 2001
- [5] Santos, M. J., *Extreme Joystick : A Cobot with Stored Energy*, 1997 Ph.D. Proposal, Mechanical Engineering Department, Northwestern University.
- [6] Wannasuphprasit, W., Gillespie, R. Brent, Colgate, J. E. and Peshkin, M. A., *Cobot Control*, 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Vol. 4, pp. 3571-3576.
- [7] Wannasuphprasit, W., Akella, P., Peshkin, M., Colgate, *Cobots: A Novel Material Handling Technology*,

J.E. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, ASME 98-WA/MH-2, 1998.

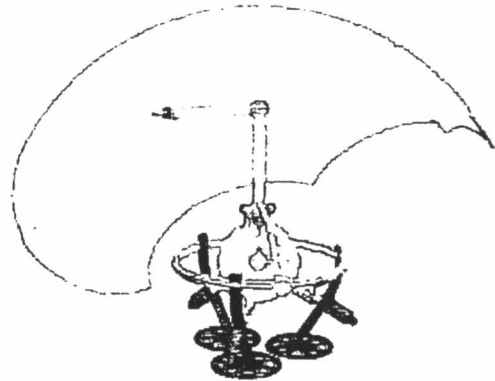


Fig 9. Workspace of 3DP Cobot Manipulator

## The Design and Development of 3DP Cobotic Manipulator

Witaya Wannasuphprasit  
 Sirisak Sirikasemsuk

Dept. of Mechanical Engineering  
 Chulalongkorn University  
 Bangkok 10330, Thailand  
 fmewwn@eng.chula.ac.th

### Abstract

This paper describes development of a 3-Dimensional Workspace Passive Cobotic Manipulator. The cobot has 3 dimensional workspace  $(x,y,z)$ . Inspired by previous works of Scooter<sup>1</sup> and Extreme Joystick<sup>2</sup> cobots, the 3DP Cobotic Manipulator consists of a spherical ball and three steering Cobotic joints and mechanical links. The sphere-rotating axis is constraint to rotate about its own center. The ball has 3 C-space, roll, pitch, and yaw  $(\phi, \alpha, \beta)$ . There is a two-link manipulator attached on top of the ball. The function of this links is to transform a spherical C-space,  $(\phi, \alpha, \beta)$  to the end-effector's C-space  $(x-y-z)$ .

### 1. Introduction

Cobots are a class of robotic device intended for direct cooperation with a human operator. A human operator and a cobot share control within a same workspace. Unlike actuated-joint robots, Cobots utilize a network of steering joints to create nonholonomic constraints between their generalized coordinates. These make cobots physically passive, even though power can be added if needed [4]. After pioneer work done by Colgate et al [1], there are a number of cobots developed in past recent years. By far prototypes of cobots can be broadly classified in two groups according to joint types; wheel and spherical joints. Wheel-joint cobots include Unicycle Cobots[1], Scooter Cobot[5], Industrial Door-Unloader Cobot[6], and Extreme Joystick Cobot[5]. The other type using spherical joint includes a Gantry Cobot

developed at Ford, and 3 DOF Arm Cobot developed by Moore et al [2].

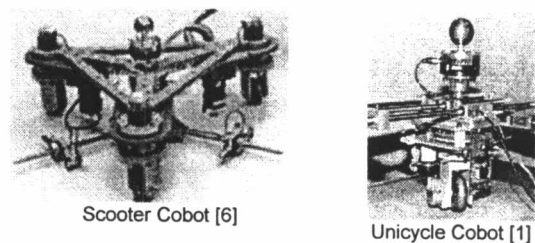


Figure 1: Examples of wheel joint cobots

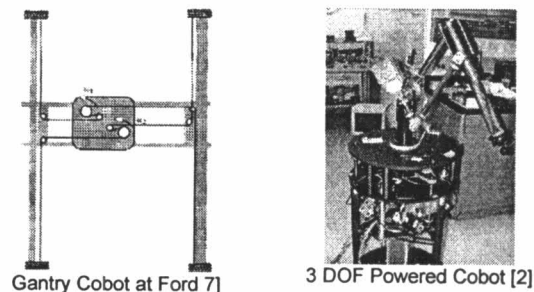


Figure 2: Examples of spherical joint cobots

With the simplicity of the wheel joint, in this work, we develop a 3 dimensional passive cobot manipulator that utilizes these joints.

<sup>1</sup> Developed by Wannasuphprasit, Witaya, Northwestern University

<sup>2</sup> Developed by Santos, M. Julio, Northwestern University

## 2. Design of 3D Passive Manipulator

Our primary goal is to develop a 3 dimensional workspace  $(x,y,z)$  cobot, that can be use as a Cobot test bed to verify control and kinematics and for other academic purposes.

The preferred design characteristics of the cobotic manipulator are 1) low inertia 2) small footprint, 3) passive<sup>3</sup>, 4) simplicity, and 5) large workspace. With these objectives, rather than scooter-like style, we adopted and adapted an early design of *the extreme joystick Cobot*[5].

### 2.1 Sphere Motion

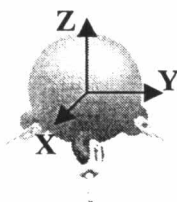


Figure 3: Confined Sphere

We start the design with a sphere that constraint within three steering wheel joints as shown in Fig 2. Similar to a singularity problem on *Scooter* [6], two wheels are inadequate to constraint sphere in all configurations the third wheel is added to eliminate singularity and make it self-support. At any instant, the motion of the sphere can be described as a rotation around a rotating axis. Since the sphere is confined to rotate not translate, this rotating axis must past thru the center of the sphere. Depending on the steering angle positions, the sphere at all time has zero to one DOF, and has three-rotational -configuration work space,  $(\phi, \alpha, \beta)$ , roll pitch yaw.

### 2.2 Rotational to Translational Workspace

In general, a translation configuration workspace such as  $(x,y,z)$  is much applicable. Thus we purposely transform all sphere rotating motion to Cartesian motion  $(\phi, \alpha, \beta) \rightarrow (x,y,z)$ . If, we place a mechanical link on top of the sphere (much like a computer game joystick), roll and pitch rotations of the sphere are mapped naturally to x-y motions of the link. The yaw motion of a game joystick is normally ignored by put a bearing around the stick so that it frees to rotate around the link.

<sup>3</sup> Yet a power assist are considered for further study

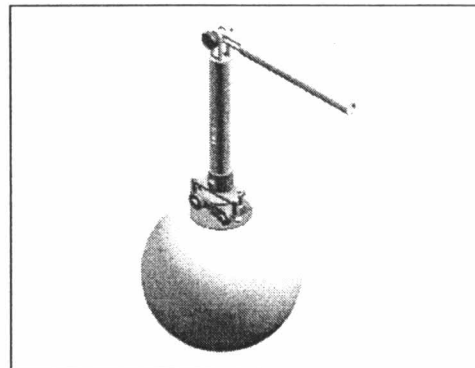


Figure 4: Sphere with a two-link manipulator

In our design, however, we add a serial two-link manipulator on top the sphere. As shown in Fig 4, the first link is connected directly to the top of the sphere. The first link translates with the sphere in roll and pitch motions and free to rotate relative to the sphere yaw motion. The yaw motion (angular motion around the first link's axis) is coupled to the revolute joint of the links via cable transmission. One revolution of the elbow joint results in two revolutions of yaw motion. Thus with this design, the roll-pitch- yaw motion of the sphere results in x-y-z motion of the end effector.

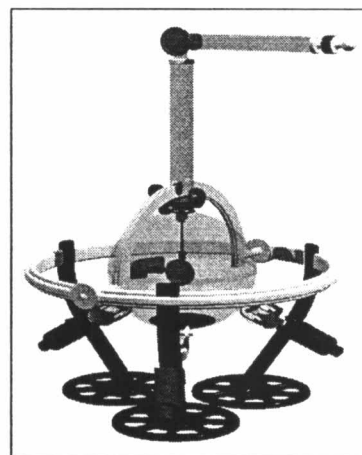


Figure 5: A holding mechanism supporting the manipulator

### 2.3 Holding Mechanism

The first link of the manipulator translates but not rotates with the sphere. These require a holding mechanism to restrain the link rotation while allow translation along the curvature of the sphere. Original design of a holding mechanism is shown in Fig 5. The base ring is stationary and serve as a common base for all

three wheels. A half-cycle guide rail supports the arm and prevents the first link to rotate with the sphere yaw motion. The rail is connected to the base ring with rotating joints. When the rail rotates about these joints the first link moves with the rail. The first link is also allowed to slide along the rail but prevented from rotating (about link axis). While this mechanism will perform adequately, we found it is rather costly and required precision fabrication and assembly.

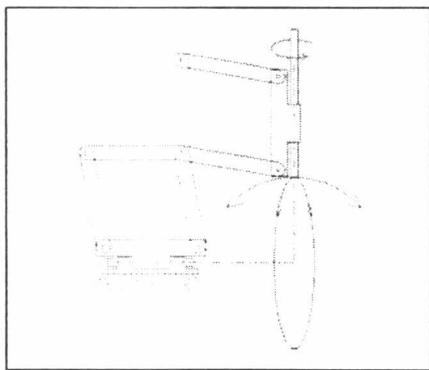


Figure 7: A concentric multilink spherical joint redraw from[3]

After design reviews, we changed our holding mechanism to a concentric multilink spherical joint (CMS joint) previously developed by Hamlin, G.J. and Sanderson, A.C.[3]. This multilink spherical joint is compact, and easy to manufacture. Since there is no sliding motion, the bearing is readily available and less expensive. In addition, all positioning sensors can be placed directly to the joints.

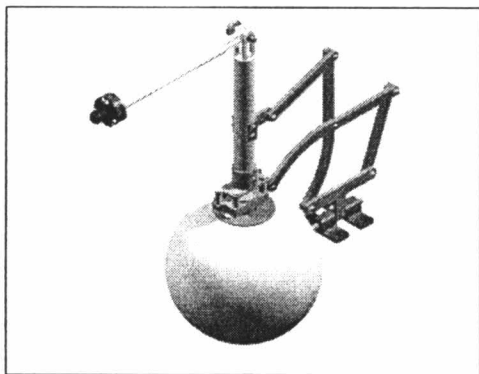


Figure 6: Spherical joint that support the manipulator

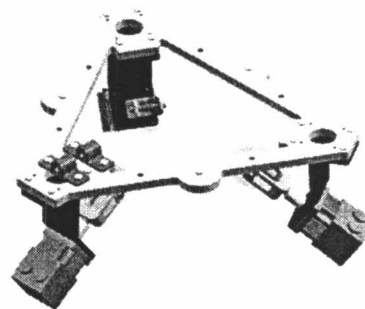


Figure 7a: Modular Steering base configured for sphere supporting

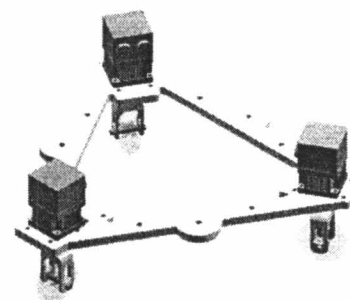


Figure 7b: Modular Steering base configured for scooter

## 2.4 The modular steering base

As shown in Fig 7, the steering base of the device consists of a triangular shape and three identical sets of steering wheel assemblies. Each wheel is directly steered by a brushless motor without a transmission<sup>4</sup>. The wheel assembly is attached at the corner of the triangular base. See Fig 7b. The steering base is also designed to transform to be a scooter-like base if needed.

## 2.5 Overall design

The overall design of the 3DP cobotic manipulator is displayed in Fig 8. One end of the CMS joint is connected to the lower link and the other end is connected to one corner of the steering base. At the connection between the lower link and the sphere, there is an adjustable spring (not shown in figure). The spring function is to preload the sphere with three wheels to ensure positive contacts.

Three feet are evenly placed under the base to support all the weight and to prevent the motors from resting on the floor. To detect operator intension, a force

<sup>4</sup> The cost of direct drive motor and a motor and transmission are about the same.



sensor (ATI MINI45) is used and placed at the end of the manipulator.

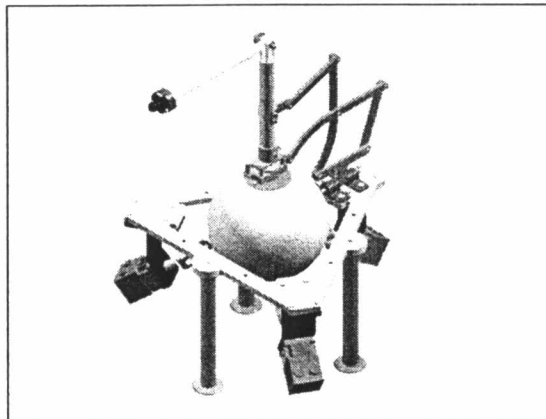


Figure 8: 3DP Cobotic manipulator

### 3 Kinematic relations of wheel directions and sphere axis of rotation

In case of Scooter [6], the cobot rotates about a point called COR where all wheel axes are intersected. By comparison, the motion of the 3DP Cobotic manipulator is determined by a rotating axis that passes through the center of the sphere. For each wheels, the wheel rolling axis and steering axis create a plane. The sphere's rotating axis generate from intersection of these planes. Only two wheels are required to determine a sphere's rotating axis<sup>5</sup>, the third wheel must agree otherwise the sphere will not move at all.

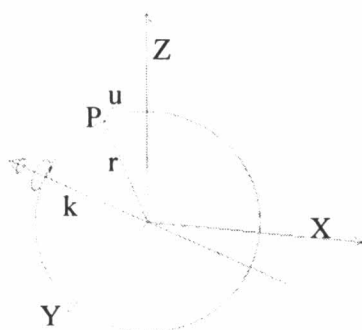


Figure 9: Sphere's axis of rotation and unit velocity vector of a point on the surface.

Consider a sphere in Fig 9. In our device the sphere is confined to rotate about its own center. Any motions of the sphere, at any point in time, can be expressed as a rotation of the sphere around an axis passing through the center<sup>6</sup>. From Fig 9, let  $\vec{k}$  be a vector representing the axis of rotation of the sphere, where the rotating direction follow right hand rule convention. Vector  $\vec{r}$  is a vector that originates from the center and end at point P where P is a particle (any points) on the sphere surface. We interest on a tangent (velocity) unit vector  $\hat{u}$  of the point P. From observation, the unit vector  $\hat{u}$  is normal to both vector  $\vec{k}$  and vector  $\vec{r}$ . Thus the unit vector  $\hat{u}$  must be in the direction of  $\vec{k} \times \vec{r}$ . In fact, the unit vector  $\hat{u}$  can be express as:

$$\hat{u} = \frac{\vec{k} \times \vec{r}}{|\vec{k} \times \vec{r}|} \quad (1)$$

Similar to scooter cobot, we can specify the sphere motion by control the sphere rotation axis (vector  $\vec{k}$ ). If  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$ , and  $\vec{r}_3$  are the vectors from the center to contact points of the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> wheel respectively, we can derive unit tangent vectors of these wheels as:

$$\hat{u}_i = \frac{\vec{k} \times \vec{r}_i}{|\vec{k} \times \vec{r}_i|}, \quad \text{where } i=1,2,3 \quad (2)$$

Thus the steering angles of three wheels must be aligned with these unit tangent vectors otherwise the sphere will have zero DOF<sup>7</sup>.

### 4. Kinematics of The 3DP Cobotic Manipulator

The 3DP Cobotic manipulator is a parallel redundant cobot. Here we define  $C_i[x,y,z]$ ,  $C_j[\theta_1, \theta_2, \theta_3]$  as a task space and joint space of the manipulator.

<sup>5</sup> For singularity, the third wheel is required

<sup>6</sup> This is comparable with a motion of scooter cobot that rotates around a center of rotation

<sup>7</sup> In the other hand, this can be use as a brake

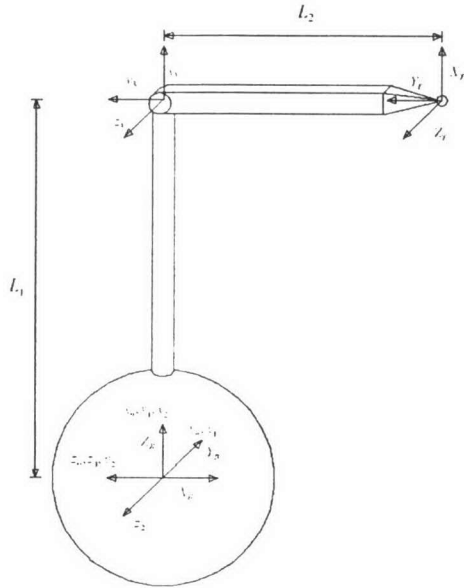


Figure 10. Schematics of 3DP Cobotic Manipulator

#### 4.1 Forward and Inverse Kinematics

Refer to Fig 10. The forward kinematics of the manipulator can be written as:

$$R_T(\theta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin(\theta_2) \\ L_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ L_2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_1 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

,where  $x, y, z$  is a configuration of the end effector,  $L_1$  and  $L_2$  are effective lengths of lower and upper arms,  $\theta_1, \theta_2$  are the joint angles of the ball joint (roll and pitch), and  $\theta_3$  is the elbow angle of the manipulator. Note that the transmission ratio of yaw to  $\theta_3$  is 2.

The inverse kinematics of the manipulator can be derived as:

$$R_J(r) = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}(y, x) \\ \tan^{-1}(b, a) \pm \tan^{-1}(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \\ \tan^{-1}(y \csc \theta_1 - L_1 \cos \theta_2, x + L_1 \sin \theta_2) - \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

, where  $a = -2yL_1 \csc(\theta_1)$ ,  $b = -2xL_1$ , and  $c = L_2^2 - x^2 - y^2 \csc^2(\theta_1) - L_1^2$

#### 4.2 The moving wheel space

The wheel space of the cobot is a 2D planar space that can be thought as a thin flat sheet that lies between the wheel and the sphere. The wheel space is normal to its steering axis and translates with the sphere surface with no slip condition. There are three wheel spaces for this cobot.

These spaces denoted by  $W_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Thus it is possible to write a configuration vector  $r_i$  of the wheel space as

$$r_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ix}(R) \\ L_{iy}(R) \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

#### 4.3 The Velocity

The velocity of the end effector can be easily found by  $\frac{dR}{dt} = J_R(q) \frac{dq}{dt}$ , where  $J_R$  is the Jacobian, which can be displayed as

$$J_R = \begin{bmatrix} 0 & -[L_2 S_{23} + L_1 C_2] & -L_2 S_{23} \\ [L_2 C_1 S_{23} + L_1 C_1 C_2] & [L_2 S_1 C_{23} + L_1 S_1 S_2] & L_2 S_1 C_{23} \\ -[L_2 S_1 S_{23} + L_1 S_1 C_2] & [L_2 C_1 C_{23} + L_1 C_1 S_2] & L_2 C_1 C_{23} \end{bmatrix} \quad (6)$$

, where  $C_i = \cos(\theta_i)$ ,  $S_i = \sin(\theta_i)$ ,  $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ , and  $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ .

In order to control cobot successfully, we must calculate each wheel rolling velocity. In the design we do not instrument the velocity sensor on the cobot wheel because of the need for quick and continuous steering without joint limit. Rather we measure the joint velocity of the sphere and infer to wheel rolling velocity with assumption of no slip condition. The wheel rolling velocity can be easily written as:

$$u_i = \vec{r}_i \bullet (\vec{\omega} \times \vec{r}_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Here  $\vec{r}_i$  is positioning vector from the sphere center to the contact point of each wheels,  $\vec{\omega}$  is the angular velocity of the sphere rotating axis.

## 5 Summary and Future Work

We described the design of the 3DP Cobotic manipulator. We employ three steering wheel joint to confine a sphere motion. A two-link mechanism is connected to the sphere to map sphere rotations to Cartesian translations. The final design is compact, simple, modular, and relatively easy to fabricate and assembly. The prototype is currently manufacturing. The control algorithm and simulation for free mode, unilateral and bilateral constraints of the device are underway.

#### Discussions

It is possible to add power to the sphere and thus can compensate for the gravity. The power can be added via wheel rolling direction. However, the wheel mechanism is more complicated with larger inertia, and at least two power wheels are required. Since the sphere is constraint

to rotate around its own center, one solution is to power the sphere itself. We currently study a possibility of using gyrotor effect to power the manipulator and counter gravity.

## References

- [1] Colgate, J. E., W. Wannasuphprasit and M. A. Peshkin, *Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators*. 1996, International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Atlanta.
- [2] Carl A. Moore, Michael A. Peshkin, J. Edward Colgate, *Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions*, 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit MI
- [3] Hamlin, G.J. and Sanderson A.C.: *A Novel Concentric Multilink Spherical Joints With Parallel Robotics Applications* 1994, IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 2, pp. 1267-1272
- [4] M.A. Peshkin, J.E. Colgate, C.A. Moore, W. Wannasuphoproisit, R.B. Gillespie, and P. Akella, *Cobot Architecture*, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol.17,pp. 377-389, Aug. 2001.
- [5] Santos, M. J., *Extreme Joystick : A Cobot with Stored Energy*, 1997 Ph.D. Proposal, Mechanical Engineering Department, Northwestern University.
- [6] Wannasuphprasit, W., Gillespie, R. Brent, Colgate, J. E. and Peshkin, M. A., *Cobot Control*, 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Vol. 4, pp. 3571-3576.
- [7] Wannasuphprasit, W., Akella, P., Peshkin, M., Colgate, *Cobots: A Novel Material Handling Technology*, J.E. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, ASME 98-WA/MH-2, 1998.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ.2521 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนเทพศิรินทร์ร่มเกล้า สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี ในปีการศึกษา 2538 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2543