



การทำตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

OPTIMAL 3D SOUND SOURCE LOCALIZATION USING A NUMERICAL METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING)

Department of ELECTRICAL ENGINEERING

Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
โดย นายเชาวพัฒน์ ชนิดกิจเจริญพร
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ สอดศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจิระจำเนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา เจริญจินดา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ สอดศรี)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรัฏฐ์ เหมือนชู)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สรศักดิ์ ดำนวนรพงศ์)

630920049 : วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง, ความต่างเวลาที่เสียงมาถึง, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, วิธีจุดภายใน

นาย เขาวพัฒนา ชนิดกิจเจริญพร: การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ สอดศรี

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติโดยใช้จำนวนไมโครโฟนไม่เกิน 4 ตัว และใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุด การศึกษาเริ่มจากใช้ไมโครโฟน 3 ตัวจัดเรียงแบบสมมาตรหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 2 มิติ ควอดแดรนต์ที่ 1 ด้วย 2 วิธี ได้แก่ วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขร่วมกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ในวิธีการแรกจะใช้การสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field และนำค่าความต่างเวลาที่เสียงมาถึงไมโครโฟน (Time difference of arrival, TDOA) แต่ละคู่ที่ได้จากวิธีการแปลงเฟสสหสัมพันธ์ไขว้ชนิดเจเนอรัล (Generalized cross correlation phase transform, GCC-PHAT) มาหามุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงถึงจุดกึ่งกลางของคูไมโครโฟน ค่าเฉลี่ยจุดตัดกันของเส้นทางเดินเสียงจะเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง สำหรับวิธีที่สองจะนำค่า TDOA และสมการระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance) มาสร้าง Objective function และหาค่าระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสม โดยเป็นค่าที่อยู่ภายในเงื่อนไขขอบเขตที่ทำให้ Objective function มีค่าต่ำสุดด้วยวิธีการจุดภายใน (Interior point method) ทำการทดลองหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 12 ตำแหน่งในควอดแดรนต์ที่ 1 และอยู่ระยะนาบเดียวกับไมโครโฟน พบว่าทั้งวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขสามารถระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระยะ Far field ได้แม่นยำ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.53% และ 1.01% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ระยะ Near field วิธีหาคำตอบเชิงตัวเลขให้ความแม่นยำสูงกว่าโดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 1.58% เมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.04% ที่ได้จากการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง ทั้งนี้เนื่องจากวิธีหาคำตอบเชิงตัวเลขไม่ได้มีการสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จึงสามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงทั้ง Near field และ Far field ได้

การศึกษาการหาตำแหน่งแหล่งในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์กระทำโดยใช้การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัววางอยู่บนระยะนาบเดียวกันทั้งแบบสมมาตร และอสมมาตร ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งทั้ง 4 ควอดแดรนต์ในบริเวณ Near field และ Far field ที่อยู่ห่างจากระนาบของไมโครโฟนถูกนำมาใช้ในการทดลอง พบว่าการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ห่างจากระนาบของไมโครโฟนจะมีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสูงตามระยะห่างที่มากขึ้นทั้งวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข ซึ่งตำแหน่งที่ห่างจากระนาบของไมโครโฟนเท่ากับ 0.3 เมตร 0.6 เมตร 0.9 เมตร และ 1.2 เมตร

มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 13.17% 36.46% 45.68% 59.85% และ 9.40% 36.21% 45.54% 56.85% เมื่อใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ใกล้กับระนาบของไมโครโฟน (อยู่ห่าง 0.3 เมตร จากระนาบไมโครโฟน) ที่ตำแหน่ง 45 องศาจากจุดกำเนิด หรืออยู่ในแนวกึ่งกลางในแต่ละควอดแดรนต์ การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตรให้ความแม่นยำสูงกว่ามากโดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 6.79% เมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 47.51% และ 32.29% จากวิธีจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีหาคำตอบเชิงตัวเลขด้วยการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร ทั้งนี้สาเหตุมาจากการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตรส่งผลให้เกิดค่า TDOA ที่แตกต่างกันชัดเจนขึ้นสำหรับแต่ละคู่อุปกรณ์ไมโครโฟน การนำมาใช้ร่วมกับการหาคำตอบเชิงตัวเลขอาจช่วยให้สามารถหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงทุกตำแหน่งทั้ง Near field และ Far field ได้

วิธีการใหม่สำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 3 มิติถูกนำเสนอโดยใช้ไมโครโฟน 4 ตัวจัดเรียงแบบสมมาตร และไม่ได้อยู่ระนาบเดียวกัน แล้วใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุดด้วย Interior point method ซึ่ง Objective function จะถูกสร้างจากค่า TDOA ที่ตรวจจับได้ ร่วมกับสมการ Euclidean distance ในพิกัด 3 มิติ อนึ่งเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการใหม่ที่สร้างขึ้นจึงนำวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงมาพัฒนาเพิ่มเติมสำหรับใช้หาตำแหน่งในพิกัด 3 มิติ ซึ่งจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 ถือเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง การทดสอบดำเนินการโดยใช้เสียงอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งทั้งใน Near field และ Far field ครอบคลุมพื้นที่ในทุกควอดแดรนต์ และบางตำแหน่งอยู่ที่ทิศทาง 45 องศาจากจุดกำเนิด หรือแนวกึ่งกลางในแต่ละควอดแดรนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีจุดตัดของพื้นผิวทรงกรวยให้ผลที่แม่นยำเฉพาะบางตำแหน่ง ซึ่งอยู่ในระยะ Far field และใกล้กับแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขสามารถให้ผลการระบุตำแหน่งใน 3 มิติได้ทุกตำแหน่งครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ทั้ง Near field และ Far field โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 1.24%

630920049 : Major (ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING)

Keyword : Sound source localization, Time difference of arrival, Numerical method, Interior point method

MR. Chaowapat CHANITKITJAROENPORN : Optimal 3D Sound Source Localization using a Numerical Method Thesis advisor : Associate Professor Dr. CHUKIET SODSRI

This work presents a method for sound source localization in 3- dimensional coordinates using less than 4 microphones and numerical approach to find an optimal position of a sound source. The study started with using 3 microphones in a symmetric arrangement to locate a 2-dimensional (2D) sound source positions in the first quadrant. Two approaches; one of using the intersection of direct traveling sound wave paths as the sound source position and second of applying numerical solution to an objective function, were used and compared. In the first approach, far field sound source locations were assumed and time difference of arrivals (TDOAs) to pairs of microphones, obtained by utilizing generalized cross correlation phase transform (GCC-PHAT), were used to derive linear lines of the direct traveling waves from the sound source to the center of microphone pairs. The intersections of these direct lines were averaged and accepted as the sound source position. For the second approach, TDOAs together with Euclidean distances were employed to created an objective function and minimization of the function with some constraints was performed, by using interior point method to yield an optimal sound source position. Experiments were done to locate 12 sound source positions reside in the first quadrant and the same plane as microphones. Results displayed that both direct-path intersection and numerical approaches were able to accurately locate the source positions in far field with minimal averaged errors of 1.53% and 1.01%, respectively. However, at near field the numerical approach yielded higher accuracy with 1.58% error average, compared to 4.04% averaged error from the direct line intersection approach. This was due to that the numerical approach was proposed and applied without a need of far field assumption, then it able to locate both near and far field positions.

Study of 2D sound localizations in 4 quadrants with 4 microphones in the same plane, and with both symmetric and asymmetric arrangements were also done. Twenty sound source positions in both near and far fields, all 4 quadrants, and 0.3 m, 0.6 m, 0.9

m, and 1.2 m away from microphone plane, were used in experiments. It was found that, for locating sound sources not in the microphones plane, the further away the sources from the plane, the more averaged errors both direct path intersection and numerical approaches yielded; i.e. resulted averaged errors for 0.3 m, 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m sound source positions away from the microphones plane were 13.17%, 36.46%, 45.68%, 59.85% and 9.40%, 36.21%, 45.54%, 56.85% when the direct path intersection and numerical approaches were used with symmetric microphone arrangement, respectively. However, considered where the sound source located near the microphone plane (i.e. 0.3 m away from the plane) at 45 degree of x-y plane, asymmetric arrangement yielded much higher accuracy with 6.79% localization error compared to that of 47.51% and 32.29% from the direct path intersection and numerical approach with symmetric microphone arrangement. Since asymmetric arrangement allowed distinct TDOAs for microphone pairs, with integration of numerical approach it may permitted capability of localization of sound sources in all position both near and far fields.

A new approach for 3D sound source localization was then proposed by using 4 microphones arranged in nonsymmetric geometry and not in the same plane, and applying numerical approach to minimize objective function via interior point method utilization. The objective function was created from measured TDOAs with Euclidean distance in 3D space. For a purpose of efficiency comparison, the direct path intersection approach was also further developed for 3D sound source localization, in which the intersection of 3 cones' surfaces was considered as the sound source location. Twenty impulsive sound sources in near and far fields, all quadrant, and some at 45 degree from origin were used for efficiency test. Experiment results showed that the direct path or cone surface intersection approach yielded very limited accuracy. Only few positions in far field and near a particular axis could be accurately located. In contrast, the purpose approach permitted very accuracy localization of all positions in all quadrant, near and far fields with minimal average error of 1.24%.

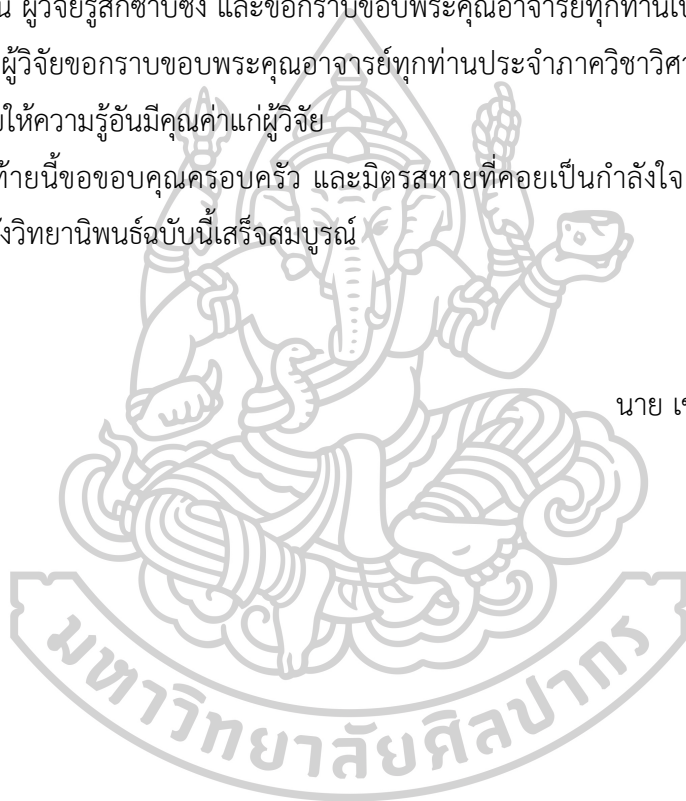
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ สอดศรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยช่วยเหลือ ให้แนวคิด และคำปรึกษา ตลอดการทำวิจัยที่ผ่านมา รวมทั้งขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา เจวจินดา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรัฏฐ์ เหมือนชู ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน และรองศาสตราจารย์ ดร. สรศักดิ์ ตำนวรพงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะแก่การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูง

ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศิลปากรที่คอยให้ความรู้อันมีคุณค่าแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว และมิตรสหายที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

นาย เซาวพัฒน์ ชนิตกิจเจริญพร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 แนวคิด และสมมุติฐานของงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2	6
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง.....	6
2.2 การแปลงเฟสสหสัมพันธ์แบบไขว้ชนิดเจเนรัล (Generalized cross correlation phase transform, GCC-PHAT)	7
2.3 การหามุมจากความต่างของเวลาที่เสียงมาถึง (Calculation of incidence angle based on the value of TDOA).....	8
2.4 พื้นผิวทรงกรวย (Cone surface)	9

2.5 เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)	10
2.6 สมการระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance equation)	12
2.7 วิธีจุดภายใน (Interior point method).....	13
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง	16
บทที่ 3	24
การศึกษาและทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ.....	24
3.1 กำหนดโปรแกรม และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.1.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	24
3.1.3 ภาพรวมของระบบ	25
3.2 การวางตำแหน่งไมโครโฟนสำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ	26
3.3.1 การวางตำแหน่งไมโครโฟน 3 ตัวสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 1 ควอดแดรนต์	26
3.3.1 การวางตำแหน่งไมโครโฟน 4 ตัวสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 4 ควอดแดรนต์	26
3.3 การศึกษาการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง.....	27
3.3.1 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1	27
3.3.2 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์.....	30
3.4 การศึกษาการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance	39
3.4.1 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1	39
3.4.2 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ โดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance	42
3.5 การออกแบบการทดลอง.....	43

3.5.1 การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1	43
3.5.2 การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์	44
3.5.3 การประมวลสัญญาณ	46
3.6 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	49
3.6.1 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1	49
3.6.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์	51
บทที่ 4	59
การออกแบบและทดลองวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ	59
4.1 การกำหนดโปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	59
4.1.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	59
4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	59
4.1.3 ภาพรวมของระบบ	60
4.2 การวางตำแหน่งไมโครโฟนสำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ	60
4.3 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance	62
4.4 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของ เส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง	65
4.4.1 การหาค่ามุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง	65
4.4.2 การสร้างพื้นผิวทรงกรวยจากค่ามุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง	68
4.4.3 การหาจุดตัดของพื้นผิวทรงกรวย	72
4.5 การออกแบบการทดลอง	73
4.5.1 การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ	73
4.5.2 การประมวลสัญญาณ	74
4.6 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	76

4.6.1 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติด้วยการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง.....	76
4.6.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติด้วยการใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance	79
บทที่ 5	82
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	82
5.1 บทสรุปของงานวิจัย	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
รายการอ้างอิง	85
ประวัติผู้เขียน	89



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดิน	50
ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข	51
ตารางที่ 3 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร.....	52
ตารางที่ 4 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข และการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร	53
ตารางที่ 5 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของ และการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร.....	54
ตารางที่ 6 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ โดยใช้วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง	77
ตารางที่ 7 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ โดยใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance	80



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การคำนวณหามุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางของคู่มือโครโฟน	8
รูปที่ 2 พื้นผิวทรงกรวยในระนาบ 3 มิติ	9
รูปที่ 3 การใช้เมทริกซ์การหมุนรอบแกน $+z$ เป็นมุม α	10
รูปที่ 4 การใช้เมทริกซ์การหมุนรอบแกน $+x$ เป็นมุม β	11
รูปที่ 5 การใช้เมทริกซ์การหมุนรอบแกน $+y$ เป็นมุม γ	11
รูปที่ 6 ระยะห่าง d ระหว่างจุด P และจุด Q	12
รูปที่ 7 การหาค่ามุมของแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้สมมติฐาน Far field (Pourmohammad, A., & Mohammad, S. (2012)).....	17
รูปที่ 8 วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้ทิศทางที่เสียงมาถึงและทิศทางของเสียงสะท้อน (Ishi, C., Even, J., & Hagita, N. (2013)).....	18
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงกับ DOA ที่โดรนตรวจจับได้ (Wakabayashi, M., Okuno, H., & Kumon, M. (2020)).....	19
รูปที่ 10 สองเฟสหลักในการประมวลผลหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (Yang, P., Xu, J., & Wang, S. (2017)).....	20
รูปที่ 11 โครงสร้างของการติดตั้งไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว (Lee, S., Park, Y., & Park, Y. (2015)).....	21
รูปที่ 12 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันสำหรับการหาทิศทางของเสียง.....	22
รูปที่ 13 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบอโต้เอ็นโค้ดเดอร์สำหรับหา DOA.....	23
รูปที่ 14 ภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (ก) สำหรับหาตำแหน่งใน 2 มิติ 1 ควอดแดรนต์ และ (ข) สำหรับหาตำแหน่งใน 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์.....	25
รูปที่ 15 ตำแหน่งการวางไมโครโฟน 3 ตัวสำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภักต์ 2 มิติ ควอดแดรนต์ที่ 1.....	26
รูปที่ 16 ตำแหน่งการวางไมโครโฟน 4 ตัว (ก) แบบสมมาตร (ข) แบบอสมมาตร.....	27

รูปที่ 17 การคำนวณหามุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของคลื่นเสียง (ก) คู่ไมโครโฟน
ตัวที่ 1 กับ 2 (ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 2 กับ 3 และ (ค) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3..... 28

รูปที่ 18 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า
45 องศา และน้อยกว่า 135 องศา (ก) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข)
คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1..... 31

รูปที่ 19 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า
135 องศา และน้อยกว่า 225 องศา (ก) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3 กับ 2
(ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1..... 32

รูปที่ 20 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า
225 องศา และน้อยกว่า 315 องศา (ก) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1
(ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2..... 33

รูปที่ 21 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า
-45 องศา และน้อยกว่า 45 องศา (ก) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1 (ข)
คู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4..... 34

รูปที่ 22 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 45 องศา (ก) คู่ไมโครโฟนตัว
ที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 4 กับ 1 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2
กับ 4..... 35

รูปที่ 23 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 135 องศา (ก) คู่ไมโครโฟน
ตัวที่ 3 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 2 กับ 4 (ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4
กับ 1..... 36

รูปที่ 24 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 225 องศา (ก) คู่ไมโครโฟน
ตัวที่ 2 กับ 4 ตัวที่ 4 กับ 1 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2
กับ 4..... 37

รูปที่ 25 กลุ่มของคู่ไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 315 องศา (ก) คู่ไมโครโฟน
ตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 2 กับ 4 (ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3
กับ 2..... 38

รูปที่ 26 ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนในพิภด 2 มิติ..... 39

รูปที่ 27 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 12 จุดสำหรับใช้ในการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1.....	43
รูปที่ 28 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1.....	44
รูปที่ 29 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 จุดสำหรับใช้ในการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง.....	45
รูปที่ 30 (ก) การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ (ข) การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัวแบบสมมาตร และ (ค) การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัวแบบอสมมาตร	46
รูปที่ 31 สัญญาณอิมพัลส์ที่ไมโครโฟนตรวจจับได้	46
รูปที่ 32 สัญญาณอิมพัลส์ที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว (ก) ไมโครโฟนตัวแรก (ข) ไมโครโฟนตัวที่สอง (ค) ไมโครโฟนตัวที่สาม และ (ง) ไมโครโฟนตัวที่สี่.....	48
รูปที่ 33 ตัวอย่างค่า TDOA ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT.....	48
รูปที่ 34 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการใช้ (ก) วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง (ข) วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข.....	49
รูปที่ 35 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลองโดยใช้ (ก) วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียงร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร (ข) วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร และ (ค) วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร.....	55
รูปที่ 36 ค่าความคลาดเคลื่อนของ TDOA ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (ก) เมื่อใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร (ข) เมื่อใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร	57
รูปที่ 37 ภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ.....	60
รูปที่ 38 เส้นทางเคลื่อนที่ของเสียงจากแหล่งกำเนิดไปยังไมโครโฟนอะเรย์ (มุมมองด้านข้าง) ...	61
รูปที่ 39 การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัวแบบอสมมาตรสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 3 มิติ. 62	
รูปที่ 40 ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนในพิกัด 3 มิติ.....	62
รูปที่ 41 การหามุมตกกระทบของเส้นทางเดินเสียงสำหรับคู่อิมพัลส์ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3.....	65

รูปที่ 42 การหามุมตกกระทบของเส้นเดินทางเสียงสำหรับคู่มือโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2.....	66
รูปที่ 43 การหามุมตกกระทบของเส้นทางเดินเสียงสำหรับคู่มือโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3.....	67
รูปที่ 44 การหาค่ามุม α_{13} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน z ของคู่มือโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3.....	69
รูปที่ 45 การหาค่ามุม α_{32} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน z ของคู่มือโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2.....	70
รูปที่ 46 การหาค่ามุม β_{43} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน x ของคู่มือโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3.....	71
รูปที่ 47 จุดตัดของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวย.....	72
รูปที่ 48 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 จุดสำหรับใช้ในการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ (ก) มุมมอง 3 มิติ (ข) มุมมองด้านบน และ (ค) มุมมองด้านข้าง.....	73
รูปที่ 49 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ.....	74
รูปที่ 50 สัญญาณอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้โดยไมโครโฟน 4 ตัว.....	75
รูปที่ 51 ตัวอย่างสัญญาณอิมพัลส์ที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว (ก) ไมโครโฟนตัวแรก (ข) ไมโครโฟนตัวที่สอง (ค) ไมโครโฟนตัวที่สาม และ (ง) ไมโครโฟนตัวที่สี่.....	75
รูปที่ 52 ตัวอย่างค่า TDOA ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT.....	76
รูปที่ 53 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากวิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียง (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง.....	78
รูปที่ 54 กรณิการตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวยมากกว่า 1 จุด.....	79
รูปที่ 55 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง.....	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (Sound source localization) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การตรวจจับทิศทางของเสียงผู้พูด การค้นหาแหล่งที่มาของเสียงสำหรับหุ่นยนต์ การตรวจจับเสียงผู้บุกรุกสำหรับกล้องและระบบรักษาความปลอดภัย และการหาตำแหน่งของเสียงปืนในทางการทหาร เป็นต้น โดยทั่วไปการค้นหาทิศทางหรือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงจะเป็นการใช้ไมโครโฟน 2 ตัวขึ้นไป นำมาจัดเรียงในรูปแบบเรขาคณิตโดยมีระยะห่างระหว่างกัน ซึ่งจะสามารถหาค่าความต่างเวลาที่เสียงมาถึงของคู่อิโคโนโฟน (Time difference of arrival, TDOA) ได้จากการใช้การแปลงเฟสสหสัมพันธ์ไขว้ชนิดเจเนอรัล (Generalized cross correlation phase transform, GCC-PHAT) [1] และด้วยการรู้ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ จะสามารถนำไปใช้หาทิศทางที่เสียงมาถึง (Direction of arrival, DOA) ของแหล่งกำเนิดเสียงได้ [2-4] อย่างไรก็ตาม การสมมุติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะฟาร์ฟิลด์ (Far field) และคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟน 2 ตัวในลักษณะขนานกัน อาจส่งผลให้การคำนวณหาค่า DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงที่ระยะเนียร์ฟิลด์ (Near field) ให้ผลที่ไม่แม่นยำ การใช้วิธีการจำแนกสัญญาณหลายสัญญาณ (Multiple signal classification, MUSIC) สามารถหา DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงโดยตรงได้ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณเสียงที่ได้รับจากไมโครโฟนอะเรย์ [5] วิธี Steered response power phase transform (SRP-PHAT) สำหรับการหา DOA สามารถกระทำได้เช่นกัน [6] โดยที่ค่ากำลังสูงสุดของ Beamformer จะแสดงทิศทางของคลื่นจากแหล่งกำเนิดเสียง อย่างไรก็ตามวิธีการ MUSIC และ SRP-PHAT ต้องการไมโครโฟนจำนวนมากกว่า เมื่อเทียบกับการหา DOA โดยใช้ GCC-PHAT

ในปัจจุบันได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolution neural network, CNN) มาประยุกต์ใช้สำหรับการหา DOA ของแหล่งกำเนิดเสียง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความทนทานในสภาพแวดล้อมที่มีเสียงรบกวน [7-9] อย่างไรก็ตามโครงข่ายประสาทเทียมมีความ

ต้องการชุดข้อมูลจำนวนมากสำหรับการเรียนรู้คุณลักษณะสัญญาณเสียงของแหล่งกำเนิด ซึ่งอาจไม่สามารถรวบรวมชุดข้อมูลให้เพียงพอในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมจริงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบการเรียนรู้ไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning neural network) สำหรับการหา DOA ได้เช่นกัน [10] แม้ว่าจะไม่ต้องรวบรวมชุดข้อมูลจำนวนมากสำหรับการฝึกสอน แต่อาจให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำน้อยกว่า เนื่องจากข้อมูลดิบที่ได้รับมาไม่ได้มีการระบุประเภทของชุดข้อมูล (Unlabeled data)

การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาที่ท้าทายกว่าการหาทิศทางของเสียง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหาตำแหน่งสำหรับพิภัก 3 มิติ ในบทความ [11] มีการใช้ไมโครโฟน 4 ตัวด้วยการจัดเรียงแบบสมมาตร และค่า TDOA เพื่อคำนวณหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 3 มิติ อย่างไรก็ตามด้วยการสมมติว่าแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จะทำให้การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในระยะ Near field ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำ นอกจากนี้เมื่อสมการ Nonlinear hyperbolic closed-form ถูกจัดรูปใหม่ให้มีความเป็นเชิงเส้น และเรียบง่ายขึ้น การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในบางบริเวณในพิภัก 3 มิติอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ในบทความ [12] มีการใช้วิธี MUSIC ร่วมกับข้อมูลเสียงสะท้อน และข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่อประมาณตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้ไมโครโฟนอะเรย์ 16 ตัว ซึ่งสามารถทำให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามหากสภาพพื้นที่ในห้องมีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ทิศทางการสะท้อนของเสียงที่ได้คำนวณไว้เปลี่ยนตามไปด้วย ในบทความที่ [13-15] วิธีการ MUSIC ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับโดรนสำหรับภารกิจค้นหาและกู้ภัย ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นจะประมาณได้จากข้อมูลเสียงที่รวบรวมจากเส้นทางการบินของโดรน ซึ่งวิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับใช้ในการหาแหล่งกำเนิดเสียงภายนอกอาคารที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ เนื่องจากแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการประมาณยังไม่แม่นยำเพียงพอที่จะใช้ในพื้นที่ขนาดเล็ก ในบทความ [16] อัลกอริทึม Weighted K-Nearest Neighbors (WKNN) ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจากฐานข้อมูลซึ่งเป็นการรวบรวมค่า TDOA ของตำแหน่งอ้างอิงหลายตำแหน่ง อย่างไรก็ตามเมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน อาจจำเป็นต้องมีการเก็บรวบรวมฐานข้อมูล TDOA ใหม่สำหรับสภาพแวดล้อมนั้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติ โดยจะนำวิธีการ GCC-PHAT มาใช้สำหรับหาค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ โดยที่จะใช้ไมโครโฟน 4 ตัวมาจัดเรียงแบบสมมาตรเพื่อลดความผิดพลาดของการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในกรณีที่ค่า TDOA มีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการนำค่า TDOA มาสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) สำหรับคำนวณย้อนกลับสู่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงขึ้นมา 2 วิธีการ วิธีที่ 1) สร้าง Objective function ด้วยการสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จะสามารถนำค่า TDOA ไปหามุมที่แหล่งกำเนิดเสียงกระทำกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของไมโครโฟนแต่ละคู่เพื่อนำไปสร้างเป็นพื้นผิวทรงกรวยได้ โดยที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงคือจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวย และวิธีที่ 2) สร้าง Objective function จากสมการระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance) ระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนแต่ละตัว ที่ซึ่งตำแหน่งแหล่งของแหล่งกำเนิดเสียงจะขึ้นอยู่กับค่า TDOA โดยตรง ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุดหาโดยวิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งทางผู้วิจัยได้นำอัลกอริทึมวิธีจุดภายใน (Interior point method) มาใช้สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติที่เหมาะสมที่สุด ในส่วนของการทดลองจะใช้ไมโครโฟน 4 ตัว ค้นหาแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นทั้ง 20 จุด โดยผลการทดลองจะแสดงถึงความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติ โดยมีจุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยคือ

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง
- 2) เพื่อศึกษาทฤษฎีและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอัลกอริทึม Interior point method สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง
- 3) เพื่อพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

1.3 แนวคิด และสมมุติฐานของงานวิจัย

ด้วยการสมมุติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field วิธีเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงจะสามารถใช้สำหรับหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติได้จากการนำค่ามุมที่กระทำจุดกึ่งกลางแนวแกนของไมโครโฟนแต่ละคู่ที่คำนวณได้จากค่า TDOA มาสร้างเป็นพื้นผิวทรงกรวย แล้วจึงทำการหาจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยที่ซึ่งเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง อีกวิธีหนึ่งสำหรับการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 3 มิติในงานวิจัยนี้ สามารถทำได้โดยหาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนแต่ละตัวด้วยการใช้สมการ Euclidean distance เนื่องจากวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สมมุติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จึงคาดว่า การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ระยะ Near field สามารถให้ผลที่แม่นยำได้ เพื่อที่จะหาคำตอบของ Objective function ทั้ง 2 วิธีการ จึงนำอัลกอริทึม Interior point method มาหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเป็นค่าที่ทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุด

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีดังนี้

- 1) ทำการศึกษาแนวคิดการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 และ 3 มิติที่เหมาะสมที่สุด
- 2) ทำการทดสอบและประเมินความแม่นยำของวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นกับแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ (Impulse)

1.5 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ไมโครโฟนอย่างน้อยจำนวน 4 ตัว
- 2) วิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ต้องใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม LabView และ MATLAB

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้วิธีการใหม่สำหรับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ ด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้อย่างแม่นยำ
- 2) สามารถนำไปต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น การรับรู้ตำแหน่งของเสียงสำหรับหุ่นยนต์บริการ การตรวจจับตำแหน่งของเสียงผู้พูด เป็นต้น



บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของการทบทวนวรรณกรรมจะนำเสนอทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง เนื้อหาในส่วนนี้ประกอบด้วย ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง การหาความต่างของเวลาที่เสียงมาถึง การหาค่ามุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือโครโฟน พื้นผิวทรงกรวย เมทริกซ์การหมุน สมการระยะทางแบบยูคลิด การหาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้วิธีจุดภายใน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยการใช้วิธีการต่างๆ

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

มนุษย์มีความสามารถในการรับรู้และจำแนกเสียงที่ได้ยินมาจากทิศทางไหนได้โดยอาศัย 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ระยะห่างระหว่างหูของมนุษย์ทั้ง 2 ข้าง ซึ่งจะทำให้คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่หูข้างที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดเสียงก่อนหูข้างที่อยู่ไกลกว่า และ 2) โครงสร้างใบหูของมนุษย์ที่สามารถทำให้คลื่นเสียงบางย่านความถี่ที่เข้ามากระทบกับใบหูเกิดการเลี้ยวเบนได้ แต่อย่างไรก็ตามมนุษย์สามารถจำแนกเสียงได้เพียงแค่อัตราทิศทางอย่างคร่าวๆ ไม่สามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงได้อย่างชัดเจน อีกทั้งเนื่องจากหูของมนุษย์สามารถรับเสียงได้ในช่วงความถี่ 20 – 20,000 เฮิรตซ์ ทำให้ไม่สามารถได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงหรือต่ำกว่าที่กล่าวมาได้ จึงต้องมีวิธีในการสร้างระบบสำหรับระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง เพื่อให้สามารถรู้ได้ว่าเสียงที่ได้ยินมาจากทิศทางหรือระยะห่างเท่าใด

วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจะเป็นการนำไมโครโฟนมาทำหน้าที่แทนหูของมนุษย์ ซึ่งมักจะนิยมใช้ไมโครโฟน 3 – 4 ตัวขึ้นไปนำมาจัดวางในลักษณะเรขาคณิต โดยไมโครโฟนจะทำหน้าที่รับสัญญาณเสียงของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาทิศทาง หรือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียง จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันวิธีการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงสามารถกระทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การนำค่า TDOA ที่ได้จาก GCC-PHAT มาใช้สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิสัย 3 มิติ

2.2 การแปลงเฟสสหสัมพันธ์แบบไขว้ชนิดเจเนรัล (Generalized cross correlation phase transform, GCC-PHAT)

GCC-PHAT เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับหาค่าการหน่วงเวลา (Time delay) ระหว่างสัญญาณ 2 สัญญาณ ซึ่งวิธีการนี้จะมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า และให้ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของตำแหน่งที่เกิดการหน่วงเวลาที่เด่นชัดกว่าวิธีการดั้งเดิมที่เป็นการใช้สหสัมพันธ์ไขว้ (Cross correlation) โดยที่การหาค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่สามารถกระทำได้ผ่านการคำนวณในโดเมนความถี่ดังต่อไปนี้

ให้ $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ แทนสัญญาณเสียงที่ไมโครโฟนตัวที่ 1 และ 2 ตรวจจับได้ในโดเมนเวลา ซึ่ง GCC-PHAT หรือ $R_{x_1x_2}(\tau)$ ระหว่างสัญญาณของไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว สามารถหาได้จากการแปลงฟูเรียร์ผกผัน (Inverse Fourier transform) ของสเปกตรัมกำลังไขว้ (Cross power spectrum) ดังสมการที่ (2.1)

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{PHAT}(f) G_{x_1x_2}(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (2.1)$$

ค่า $\Psi_{PHAT}(f)$ หรือฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting function) สำหรับ GCC-PHAT สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2) $G_{x_1x_2}(f)$ หรือ Cross power spectrum ระหว่างสัญญาณของไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว แสดงดังสมการที่ (2.3) โดย $X_1(f)$ และ $X_2(f)$ คือ ฟังก์ชันที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ของสัญญาณ $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ ตามลำดับ

$$\Psi_{PHAT}(f) = \frac{1}{|G_{x_1x_2}(f)|} \quad (2.2)$$

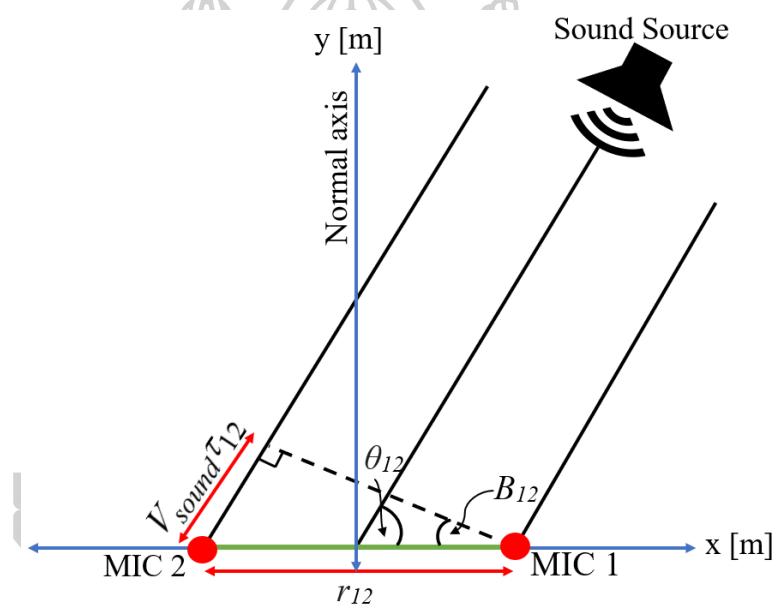
$$G_{x_1x_2}(f) = X_1^*(f)X_2(f) \quad (2.3)$$

ค่าความต่างของเวลาที่เสียงมาถึงไมโครโฟนตัวที่ 1 เทียบกับไมโครโฟนตัวที่ 2 (τ_{12}) สามารถหาได้จากตำแหน่งความต่างเวลาที่ทำให้เกิดค่าแอมพลิจูดสูงสุดของ GCC-PHAT ($R_{x_1x_2}(\tau)$) แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$\tau_{12} = \arg \max_{\tau} R_{x_1x_2}(\tau) \quad (2.4)$$

2.3 การหามุมจากความต่างของเวลาที่เสียงมาถึง (Calculation of incidence angle based on the value of TDOA)

ด้วยการสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field (แหล่งกำเนิดเสียงมีระยะห่างจากไมโครโฟนอะเรย์มากกว่า หรือเท่ากับ 5 เท่าของระยะห่างคู่อิโคโนโฟนที่ห่างที่สุด) จะสามารถประมาณได้ว่าคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดจะเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนทั้ง 2 ตัวในลักษณะขนานกันดังรูปที่ 1 จากการทราบระยะห่างระหว่างไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว (r_{12}) และค่า TDOA ของคู่อิโคโนโฟนที่ได้จาก GCC-PHAT จะสามารถหามุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางของคู่อิโคโนโฟน (θ_{12}) ได้จากกฎของตรีโกณมิติซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.5) และ (2.6)



รูปที่ 1 การคำนวณหามุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางของคู่อิโคโนโฟน

$$B_{12} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{12}}{r_{12}} \right)^2} \right) \quad (2.5)$$

$$\theta_{12} = 90^\circ - B_{12} \quad (2.6)$$

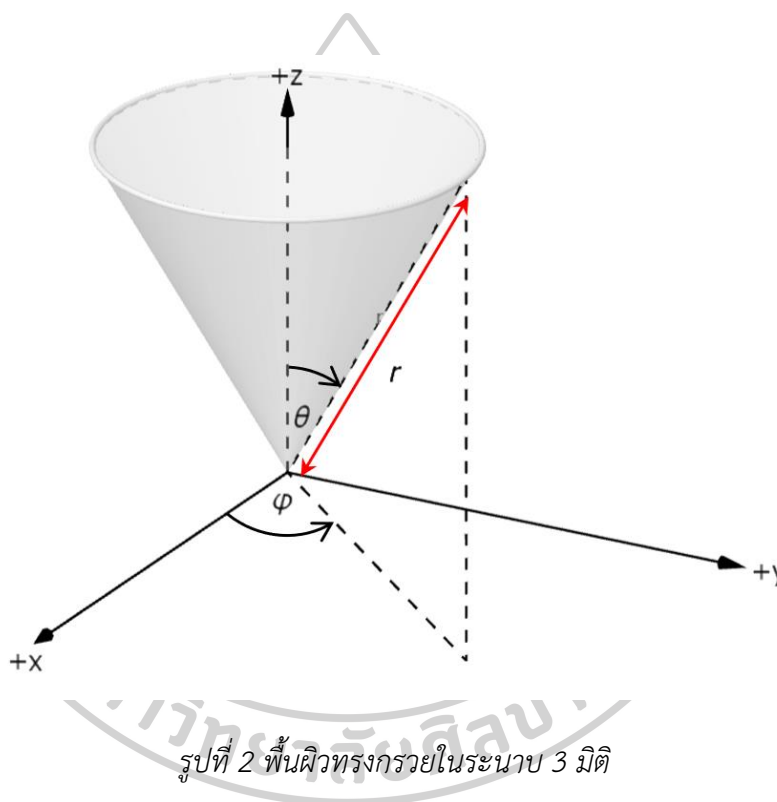
โดยที่ r_{12} คือ ระยะห่างระหว่างไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว [m]

τ_{12} คือ TDOA ระหว่างไมโครโฟน 2 ตัว [s]

V_{sound} คือ ความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ [m/s]

2.4 พื้นผิวทรงกรวย (Cone surface)

สมการของพื้นผิวทรงกรวยในระนาบ 3 มิติสามารถคำนวณได้ด้วยการนำระบบพิกัดทรงกลม (Spherical coordinates) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นระบบสำหรับใช้ในการกำหนด หรือบอกตำแหน่งในระนาบ 3 มิติ โดยจะประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ r , θ และ φ โดยที่ r คือ รัศมีของทรงกรวย θ คือ มุมยกที่กระทำกับแกน z และ φ คือ มุมกวาดในระนาบ $x-y$ ซึ่งกวาดจากแกน $+x$ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2π แสดงได้ดังรูปที่ 2 และสมการทรงกรวยดังสมการที่ (2.6), (2.7) และ (2.8)



$$x = r \sin \theta \cos \varphi \quad (2.6)$$

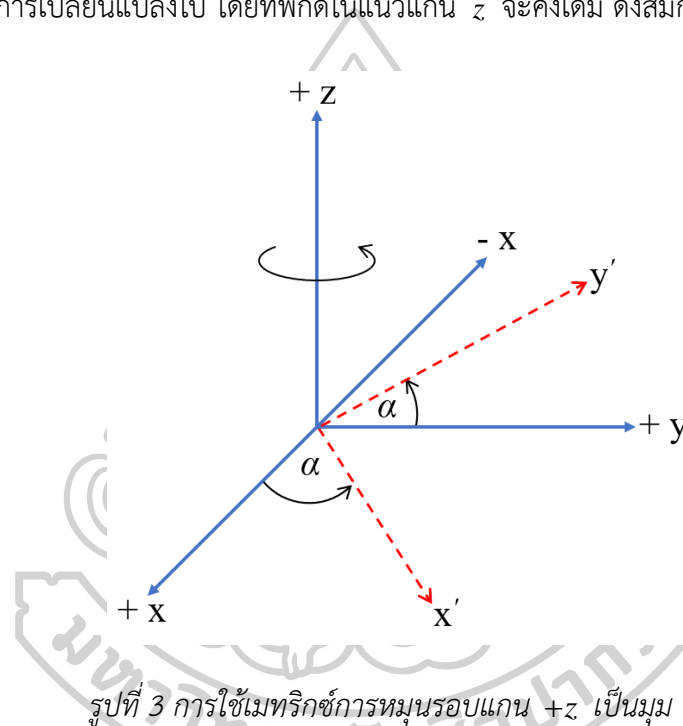
$$y = r \sin \theta \sin \varphi \quad (2.7)$$

$$z = r \cos \theta \quad (2.8)$$

2.5 เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)

เมทริกซ์การหมุน คือ เมทริกซ์ที่นำมาใช้สำหรับเคลื่อนย้ายรูปทรงเรขาคณิตหรือจุดต่างๆ ใน พิกัด 3 มิติจากระนาบใดๆ ไปยังระนาบที่ต้องการ [17] สามารถกระทำได้ด้วยการกำหนดแกนหมุน และกำหนดมุมการหมุน โดยทั่วไปเมทริกซ์การหมุนจะถูกนำมาใช้สำหรับหมุนรอบแกนหลักทั้ง 3 แกนดังนี้

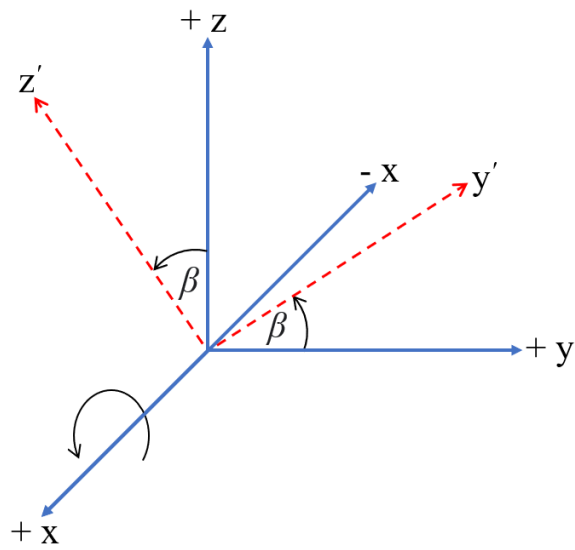
สำหรับการหมุนรอบแกน z ดังรูปที่ 3 พิกัดของรูปทรงเรขาคณิตหรือจุดต่างๆ ในแนวแกน x และ y มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่พิกัดในแนวแกน z จะคงเดิม ดังสมการที่ (2.9)



$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ x \sin \alpha + y \cos \alpha \\ z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

โดยที่ α คือ มุมการหมุนทวนเข็มนาฬิกาจากแกน $+x$ [rad]

สำหรับการหมุนรอบแกน x ดังรูปที่ 4 พิกัดในแนวแกน y และ z เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ พิกัดในแนวแกน x จะคงเดิม ดังสมการที่ (2.10)

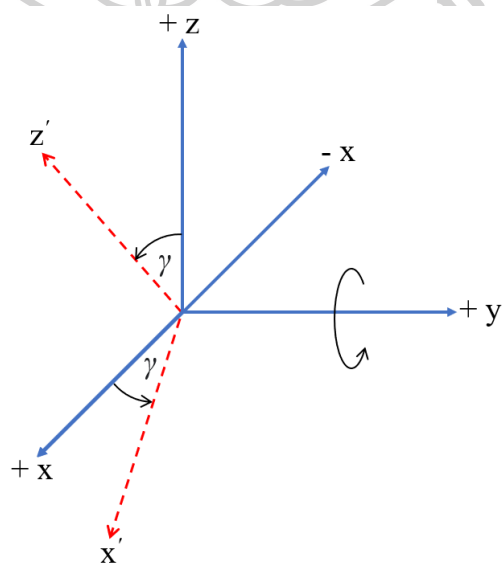


รูปที่ 4 การใช้เมทริกซ์การหมุนรอบแกน +x เป็นมุม β

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \cos \beta - z \sin \beta \\ y \sin \beta + z \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

โดยที่ β คือ มุมการหมุนทวนเข็มนาฬิกาจากแกน +y [rad]

สำหรับการหมุนรอบแกน y ดังรูปที่ 5 พิกัดในแนวแกน x และ z เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ พิกัดในแนวแกน y จะคงเดิม ดังสมการที่ (2.11)



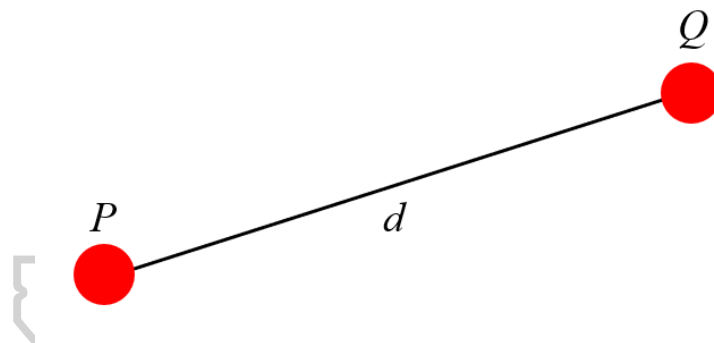
รูปที่ 5 การใช้เมทริกซ์การหมุนรอบแกน +y เป็นมุม γ

$$\begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \gamma + z \sin \gamma \\ y \\ z \cos \gamma - x \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยที่ γ คือ มุมการหมุนทวนเข็มนาฬิกาเทียบกับแกน $+z$ [rad]

2.6 สมการระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean distance equation)

สมการ Euclidean distance เป็นสมการที่มีไว้ใช้ในการหาระยะห่างที่สั้นที่สุดระหว่างจุดสองจุดในแนวเส้นตรง จากรูปที่ 6 ให้จุด $P = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ และ จุด $Q = (q_1, q_2, \dots, q_N)$ เป็นจุดใดๆ ในพิกัดคาร์ทีเซียนแบบ N มิติ ระยะห่างระหว่างจุด P และ Q หาได้จากสมการที่ (2.12) หรือสมการที่ (2.13)



รูปที่ 6 ระยะห่าง d ระหว่างจุด P และจุด Q

$$d(P, Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_N - q_N)^2} \quad (2.12)$$

$$d(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - q_i)^2} \quad (2.13)$$

2.7 วิธีจุดภายใน (Interior point method)

Interior point method เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นแบบมีเงื่อนไข (Linear and non-linear constraint optimization problem) ภายในโดเมนของคำตอบที่เป็นไปได้ [18] ซึ่งจะสามารถลดจำนวนรอบในการลู่อู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้เป็นอย่างมาก โดยทั่วไปปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดไม่เป็นเชิงเส้นแบบมีเงื่อนไขสำหรับการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) $f(x)$ จะแสดงได้ดังนี้ [18-20]

$$\begin{aligned} \min_x \quad & f(x) \\ \text{subject to} \quad & h(x) = 0 \\ & \text{และ/หรือ} \quad g(x) \geq 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่ $h(x)$ คือ เงื่อนไขความเท่ากัน (Equality constraint)

$g(x)$ คือ เงื่อนไขความไม่เท่ากัน (Inequality constraint)

เพื่อควบคุมให้การลู่อู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ภายในโดเมนที่เป็นไปได้ จึงมีการเพิ่มฟังก์ชันแบเรียร์ (Barrier function) ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันลอการิทึมเข้าไปใน Objective function [18, 20] จะได้ Objective function ดังสมการที่ (2.15) และจะเรียกว่าปัญหาแบเรียร์ (Barrier problem) โดยที่ μ คือ แบเรียร์พารามิเตอร์ (Barrier parameter) และ s คือ ตัวแปรส่วนขาด (Slack variable) ที่ถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อปรับฟังก์ชันของ Inequality constraint ให้กลายเป็น Equality constraint ดังสมการที่ (2.19)

Barrier parameter μ จะถูกอัปเดตและลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งถ้าค่า μ เท่ากับศูนย์ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ Objective function ของ Barrier problem ในสมการที่ (2.15) จะเท่ากับกับคำตอบจาก Objective function ในสมการที่ (2.14)

$$\min_{x,s} \quad f(x) - \mu \sum_{i=1}^M \ln(s_i) \quad (2.15)$$

subject to $h(x) = 0$

และ/หรือ $g(x) - s = 0$

โดย $s \geq 0$

ขั้นตอนวิธีในการหาคำตอบของ Barrier problem จะเริ่มจากการนำ Objective function และ เงื่อนไขทั้งหมดในสมการ (2.15) มาเขียนในรูปของสมการลากรางจ์ (Lagrangian) ดังสมการที่ (2.16)

$$L(x, s, \lambda_y, \lambda_z) = f(x) - \mu \sum_{i=1}^M \ln(s_i) - \lambda_y^T h(x) - \lambda_z^T (g(x) - s) \quad (2.16)$$

โดยที่ λ_y^T คือ ตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange Multiplier) ของ Equality constraint

λ_z^T คือ ตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange Multiplier) ของ Inequality constraint

เพื่อที่จะแก้สมการลากรางจ์จึงทำการนำวิธี Karush–Kuhn–Tucker (KKT) เข้ามาช่วย โดยจะเป็นการหาอนุพันธ์อันดับ 1 ของฟังก์ชันเทียบกับตัวแปร x , s , λ_y^T และ λ_z^T ดังสมการที่ (2.17)

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \nabla f(x) - A_E^T(x) \lambda_y - A_I^T(x) \lambda_z = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial s} = -\mu S^{-1} e + \lambda_z = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_y} = h(x) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_z} = g(x) - s = 0 \quad (2.20)$$

โดยที่ $A_E^T(x)$ คือ Jacobian ของ Equality constraint ($A_E^T(x) = \left[\frac{\partial h_1}{\partial x}, \dots, \frac{\partial h_M}{\partial x} \right]$)

$A_I^T(x)$ คือ Jacobian ของ Inequality constraint ($A_I^T(x) = \left[\frac{\partial g_1}{\partial x}, \dots, \frac{\partial g_M}{\partial x} \right]$)

S คือ Diagonal matrices ของเวกเตอร์ s ($S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_N)$)

จากสมการที่ (2.17-2.20) จะสามารถหาทิศทางในการค้นหา (Search directions) Δx , Δs , $\Delta \lambda_y$ และ $\Delta \lambda_z$ ได้โดยการนำ Newton's method มาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะกลายเป็นดังสมการที่ (2.21)

$$\begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 L & 0 & A_E^T(x) & A_I^T(x) \\ 0 & S^{-1}Z & 0 & -I \\ A_E(x) & 0 & 0 & 0 \\ A_I(x) & -I & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta s \\ -\Delta \lambda_y \\ -\Delta \lambda_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla f(x) - A_E^T(x)\lambda_y - A_I^T(x)\lambda_z \\ z - \mu S^{-1}e \\ h(x) \\ g(x) - s \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

หลังจากได้รับค่า Search directions จากสมการที่ (2.21) เรียบร้อยแล้ว ค่า Δx , Δs , $\Delta \lambda_y$ และ $\Delta \lambda_z$ จะถูกนำไปใช้สำหรับการอัปเดตค่า x^+ , s^+ , λ_y^+ และ λ_z^+ ดังสมการที่ (2.22-2.25)

$$x^+ = x + \alpha_s^{\max} \Delta x \quad (2.22)$$

$$s^+ = s + \alpha_s^{\max} \Delta s \quad (2.23)$$

$$\lambda_y^+ = \lambda_y + \alpha_z^{\max} \Delta \lambda_y \quad (2.24)$$

$$\lambda_z^+ = \lambda_z + \alpha_z^{\max} \Delta \lambda_z \quad (2.25)$$

โดยที่ α_s และ α_z คือ ความกว้างช่วงคำนวณ (Step size) ซึ่งคำนวณได้จาก Fraction to the boundary rule ดังสมการที่ (2.26) และ (2.27)

$$\alpha_s^{\max} = \max\{\alpha \in (0, 1] : s + \alpha \Delta s \geq (1 - \tau)s\}, \quad \tau \in (0, 1) \quad (2.26)$$

$$\alpha_z^{\max} = \max\{\alpha \in (0, 1] : \lambda_z + \alpha \Delta \lambda_z \geq (1 - \tau)\lambda_z\}, \quad \tau \in (0, 1) \quad (2.27)$$

เมื่อทำการอัปเดตค่าตัวแปร x , s , λ_y และ λ_z แล้ว จะนำไปแทนลงในฟังก์ชันข้อผิดพลาด (Error function) ของสมการ KKT (สมการที่ (2.17-2.20)) จะได้

$$E(x, s, \lambda_y, \lambda_z) = \max \left\{ \left\| \nabla f(x) - A_E^T(x) \lambda_y - A_I^T(x) \lambda_z \right\|, \left\| -\mu S^{-1} e + \lambda_z \right\|, \|h(x)\|, \|g(x) - s\| \right\} \quad (2.28)$$

เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของ Objective function จะต้องทำการคำนวณซ้ำตามสมการที่ (2.21) จนถึงสมการที่ (2.28) และอัปเดตค่าตัวแปร x , s , λ_y และ λ_z ไปจนค่า $E(x^k, s^k, \lambda_y^k, \lambda_z^k; \mu^k) \leq \mu^k$ จึงหยุดการทำซ้ำ

เนื่องจากค่า Barrier parameter μ จำเป็นต้องมีค่าลดลงทุกๆ การวนซ้ำจนมีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อให้คำตอบของ Barrier problem ในสมการที่ (2.16) เป็น Objective function ในสมการที่ (2.14) จึงต้องมีการอัปเดตค่า μ สำหรับการวนซ้ำรอบถัดไปดังสมการที่ (2.29)

$$\mu_{k+1} = \sigma_k \frac{s_k^T \lambda_{zk}}{M} \quad (2.29)$$

โดยที่ M คือ จำนวนของ Constraints

$$\sigma_k = \left(\frac{\mu_p}{s_k^T \lambda_{zk} / M} \right)^3$$

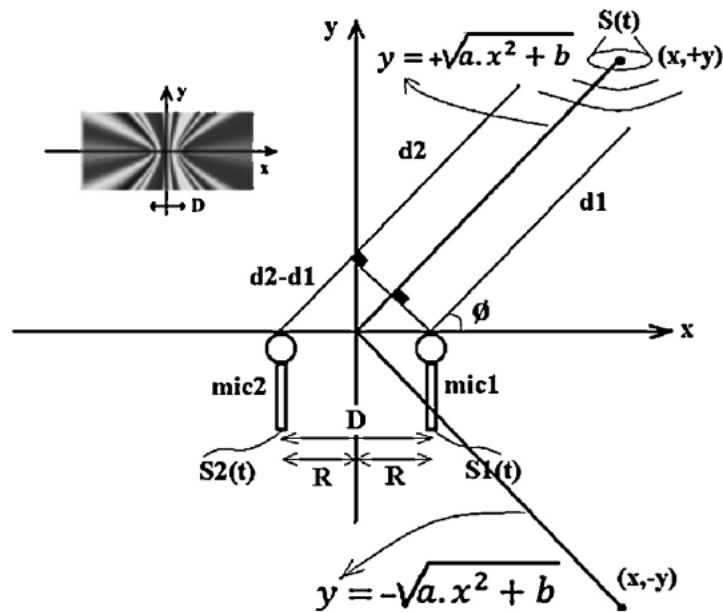
$$\mu_p = \frac{(s + \alpha_s \Delta s)(\lambda_z + \alpha_z \Delta \lambda_z)}{M}$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

1) Real Time High Accuracy 3-D PHAT-Based Sound Source Localization Using a Simple 4-Microphone Arrangement. (Pourmohammad, A., & Mohammad, S. (2012))

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงทั้งในพิภพ 2 และ 3 มิติ โดยได้นำวิธีการ GCC-PHAT มาใช้สำหรับหาค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ จากการใช้สมมุติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จะทำให้สามารถคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดเสียงได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 ค่ามุมที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้ในการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง โดยใช้สมการ Closed-form hyperbolic ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณย้อนกลับสู่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

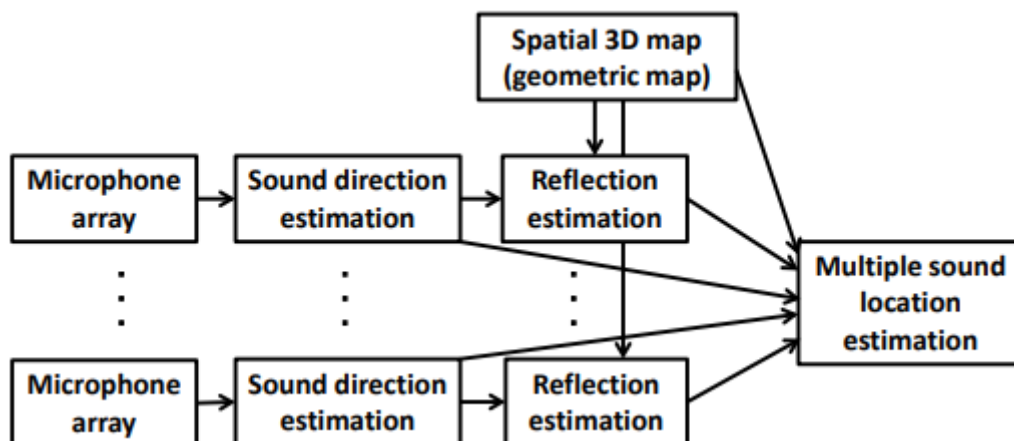
โดยการนำสมการ Hyperbolic มาจัดรูปใหม่ให้เป็นสมการเชิงเส้น และทำการหาคำตอบด้วยการใช้การแก้สมการโพลิโนเมียล โดยได้ออกแบบการทดลองด้วยการใช้ไมโครโฟนจำนวน 4 ตัว เพื่อตรวจจับแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นเสียงของเฮลิคอปเตอร์ ผลการทดลองจากการระบุตำแหน่ง พบว่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่คำนวณได้มีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยกว่า 5 %



รูปที่ 7 การหาค่ามุมของแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้สมมติฐาน Far field (Pourmohammad, A., & Mohammad, S. (2012))

2) Using multiple microphone arrays and reflections for 3D localization of sound source. (Ishi, C., Even, J., & Hagita, N. (2013))

ในสภาพแวดล้อมจริงคลื่นเสียงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเมื่อไปตกกระทบกับพื้นผิวต่างๆ ที่มีความแข็งเกร็งทางอะคูสติกส์ เช่น ผนังปูน พื้น เพดาน ย่อมมีการสะท้อนกลับเกิดขึ้นเสมอ โดยเสียงสะท้อนที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง เช่น สะท้อนกับผนังปูน พื้น เพดาน มักจะถือว่าเป็นปัญหาสำหรับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการเพิ่มความแม่นยำด้วยการนำไมโครโฟนอะเรย์มาใช้สำหรับหา DOA ด้วยวิธีการ MUSIC และหาทิศทางของเสียงสะท้อนโดยใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ของห้อง แล้วจึงนำ DOA และทิศทางของเสียงสะท้อนไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ ดังรูปที่ 8

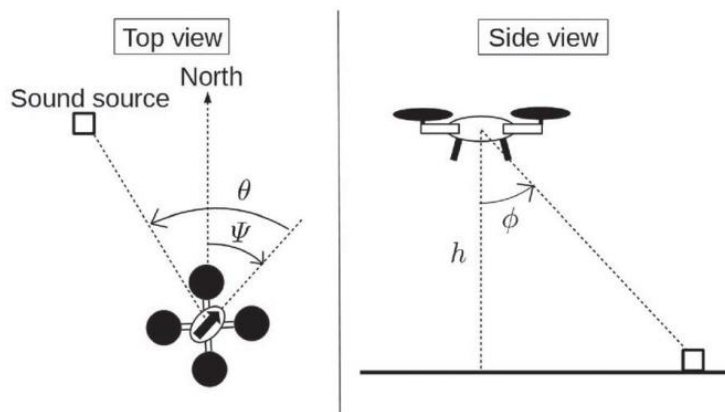


รูปที่ 8 วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้ทิศทางที่เสียงมาถึงและทิศทางของเสียงสะท้อน
(Ishi, C., Even, J., & Hagita, N. (2013))

ในบทความมีการออกแบบระบบด้วยการใช้ไมโครโฟนอะเรย์ 16 ตัว จำนวน 2 ชุด ติดตั้งไว้บนเพดาน และเปรียบเทียบตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ระบุได้ทั้ง 2 วิธี 1) การใช้เพียงค่า DOA จากการใช้ MUSIC ในการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 2) การใช้ทั้ง DOA และทิศทางของเสียงสะท้อน จากผลการทดลองพบว่า การระบุตำแหน่งด้วยการใช้ DOA ร่วมกับทิศทางของเสียงสะท้อนสามารถให้ผลที่แม่นยำเพิ่มขึ้น 10% โดยเฉลี่ย

3) Drone audition listening from the sky estimates multiple sound source positions by integrating sound source localization and data association. (Wakabayashi, M., Okuno, H., & Kumon, M. (2020))

งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการ MUSIC สำหรับหา DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงมาประยุกต์ใช้กับโดรน เพื่อประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นสำหรับภารกิจค้นหาและกู้ภัย โดยได้ทำการนำไมโครโฟนอะเรย์จำนวน 16 ตัวมาติดตั้งไว้กับโดรน และควบคุมเส้นทางการบินโดรนเพื่อตรวจจับและเก็บข้อมูลสัญญาณเสียงของแหล่งกำเนิด ซึ่งจะสามารถหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ดังรูปที่ 9



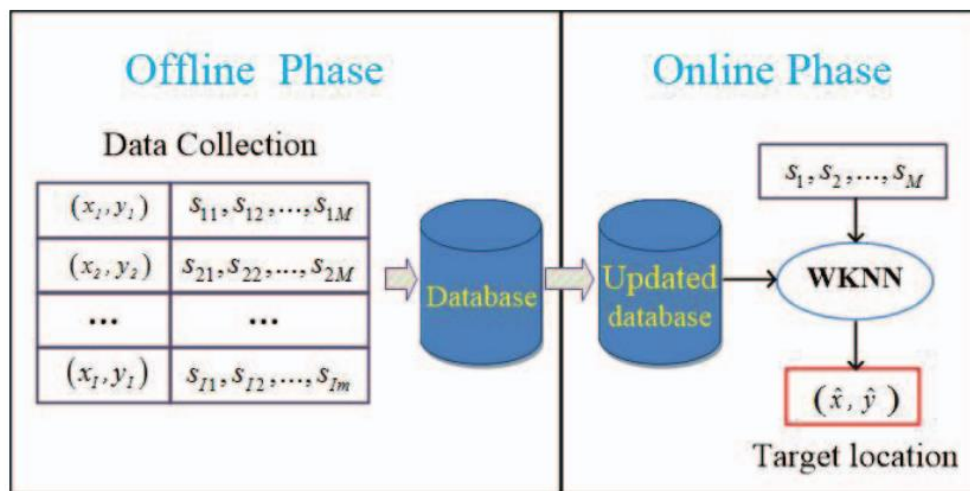
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงกับ DOA ที่โดรนตรวจจับได้
(Wakabayashi, M., Okuno, H., & Kumon, M. (2020))

อย่างไรก็ตามจากเสียงรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น เสียงมอเตอร์ และเสียงลมรอบๆ โดรนจะเป็นอุปสรรคต่อการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการใช้ อัลกอริทึม Global nearest neighbor with classification measurement (GNN-c) ในการจำแนกแหล่งกำเนิดเสียงหลายแหล่งที่ตรวจจับได้เพื่อกำจัดแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นเสียงรบกวนต่างๆ ออก ทำการทดลองกับแหล่งกำเนิดเสียง 2 รูปแบบ ได้แก่ เสียงตะโกน กับ เสียงนกหวีด จากผลการทดลองพบว่าวิธีการนี้สามารถให้ผลการประมาณตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ค่าความผิดพลาดไม่เกิน 3 เมตร

4) Position Fingerprint Localization Method Based on Linear Interpolation in Robot Auditory System. (Yang, P., Xu, J., & Wang, S. (2017))

งานวิจัยนี้ได้มีการนำเทคนิค Position fingerprint มาใช้สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 เฟสในการประมวลผลดังรูปที่ 10 เฟสแรกจะเป็นออฟไลน์เฟสที่จะทำการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูล TDOA ของแหล่งกำเนิดเสียงตามจุดอ้างอิงต่างๆ เพื่อนำมาสร้างเป็นฐานข้อมูล Position fingerprint ส่วนในออนไลน์เฟสจะทำการนำเสนอวิธีการอัปเดตฐานข้อมูลแบบออนไลน์ด้วยการใช้อัลกอริทึม KNN สำหรับประมาณตำแหน่งร่วมกับการใช้ Linear interpolation เพื่อให้มีตำแหน่งอ้างอิงจำลองมากขึ้นสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการคำนวณ โดยที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยใช้อัลกอริทึม WKNN สำหรับ

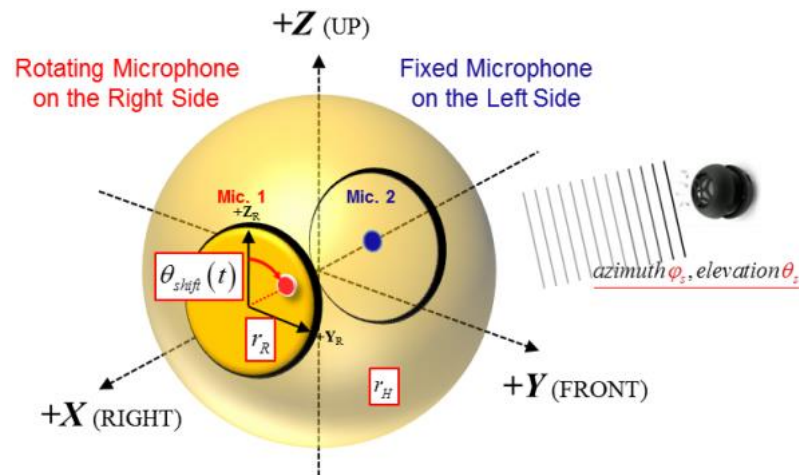
ประมาณค่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 2 มิติ การทดลองจะเป็นการใช้ตำแหน่งอ้างอิง 20 จุด และทดสอบกับแหล่งกำเนิดเสียงจากลำโพงบลูทูธ 12 จุด ซึ่งผลที่ได้มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 0.0813 เมตร



รูปที่ 10 สองเฟสหลักในการประมวลผลหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (Yang, P., Xu, J., & Wang, S. (2017))

5) Three-dimensional Sound Source Localization Using Inter-channel Time Difference Trajectory. (Lee, S., Park, Y., & Park, Y. (2015))

โดยทั่วไปการทำ DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงด้วยการใช้ค่า TDOA ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT จำเป็นต้องมีไมโครโฟนอย่างน้อย 3 - 4 ตัวขึ้นไป ซึ่งหากใช้ไมโครโฟนเพียงแค่ 2 ตัว จะไม่สามารถระบุได้ว่าทิศทางของเสียงมาจากด้านหน้าหรือด้านหลัง งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการใช้ไมโครโฟน 2 ตัวสำหรับหา DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 3 มิติ ด้วยการใช้ออเตอร์หมุนไมโครโฟนตัวที่ 1 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาในระนาบ $y-z$ ที่ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แกน $+x$ โดยที่ไมโครโฟนตัวที่ 2 จะติดตั้งไว้อยู่กับที่บนแกน $-x$ แสดงดังรูปที่ 11



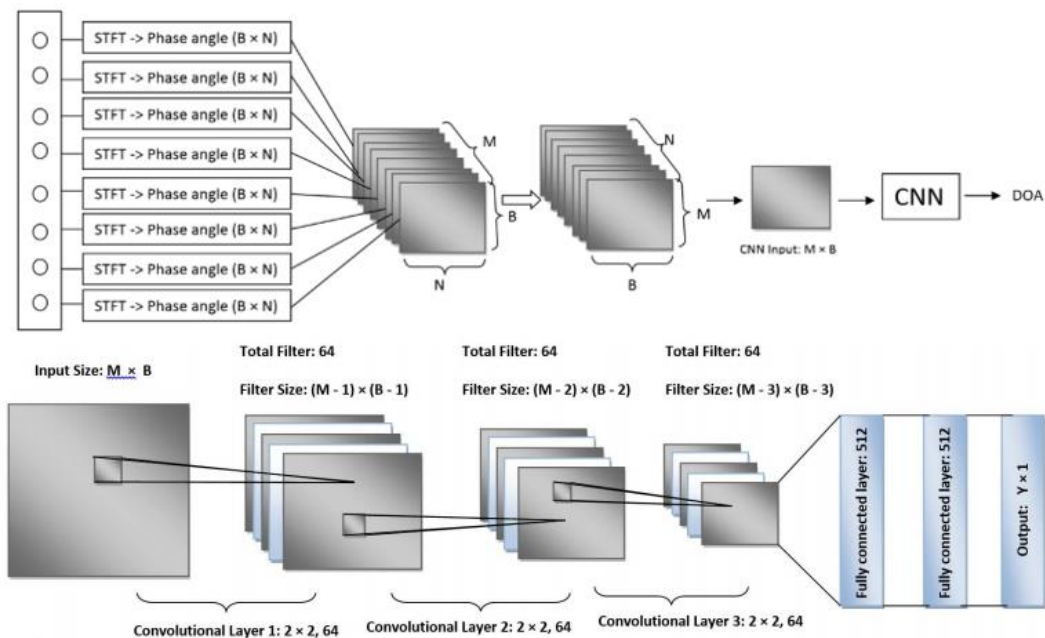
รูปที่ 11 โครงสร้างของการติดตั้งไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว (Lee, S., Park, Y., & Park, Y. (2015))

ค่า TDOA ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT และค่ามุมของไมโครโฟนตัวที่ 1 ที่ถูกมอเตอร์หมุนไปกระทำกับแกน $+Z_R$ จะนำมาใช้สำหรับหาค่ามุมกวาด (θ) และมุมยก (φ) ที่ซึ่งเป็น DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ ทำการทดลองเพื่อทดสอบวิธีการที่ได้นำเสนอกับเสียงพูด โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทางมุมกวาด 45 องศา และมุมยก 0 องศา พบว่าวิธีการนี้สามารถให้ผลการประมาณค่า DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงได้ค่อนข้างแม่นยำ

6) Localization of Steady Sound Source and Direction Detection of Moving Sound Source using CNN. (Mane, S., Mali, S., & Mahajan, S. (2019))

ในกรณีที่มีสภาพแวดล้อมมีสัญญาณรบกวนสูง การหา DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงด้วยการคำนวณจากค่า TDOA หรือการหาโดยตรงด้วยการใช้วิธี MUSIC หรือ SRP-PHAT จะมีประสิทธิภาพและความแม่นยำที่ลดลง งานวิจัยนี้จึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network, CNN) มาประยุกต์ใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของการหา DOA โดยนำสัญญาณเสียงที่ไมโครโฟนตรวจจับได้มาทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยการใช้การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short-time Fourier transform, STFT) แล้วจึงนำเฟสของสัญญาณไปใช้เป็นอินพุทของ CNN สำหรับใช้ในการจำแนกเพื่อหา DOA ของเสียง แสดงดังรูปที่ 12 ทำการทดลองโดยใช้ไมโครโฟน 8 ตัว ตรวจจับสัญญาณเสียงของแหล่งกำเนิดภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความก้องกังวาน (Reverberant time, RT60) จากการทดลองพบว่าในสภาพแวดล้อมที่มีค่า RT60 เท่ากับ 0.16

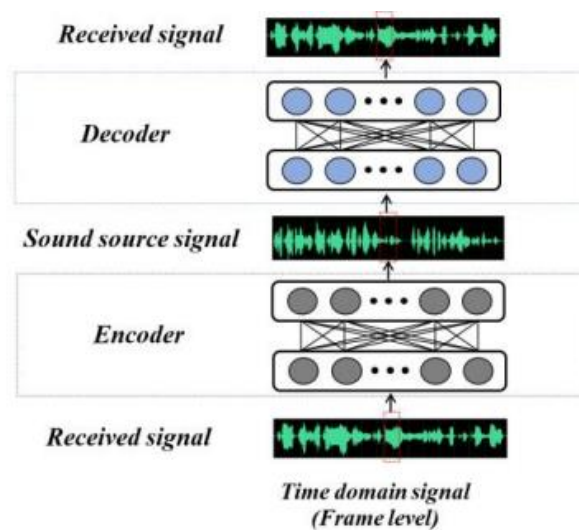
วินาที, 0.36 วินาที และ 0.61 วินาที มีเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของการหา DOA อยู่ที่ 92.1%, 86.4% และ 68.8%



รูปที่ 12 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันสำหรับการหาทิศทางของเสียง

7) A Time-domain Unsupervised Learning Based Sound Source Localization Method. (Huang, Y., Wu, X., & Qu, T. (2020))

งานวิจัยนี้เป็นการนำเอาหลักการของอะคูสติกส์ทรานซ์เฟอร์ฟังก์ชัน (Acoustic transfer function) ที่ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับสัญญาณเสียงที่ไม่โครโฟนตรวจจับได้ มาสร้างเป็นโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบอโต้เอ็นโค้ดเดอร์ (Auto – encoder Neural network) ที่ซึ่งเป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) แสดงดังรูปที่ 13 ไมโครโฟนจำนวน 6 ตัวถูกนำมาใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณเสียงเพื่อใช้เป็นอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียม โดยจากผลการทดลองพบว่าการหา DOA ของแหล่งกำเนิดเสียงในกรณีที่มีสภาพแวดล้อมมีค่า SNR ต่ำกว่า 1 dB ให้ผลที่แม่นยำกว่าการหา DOA โดยใช้วิธีการ MUSIC และ SRP-PHAT เป็นอย่างมาก



รูปที่ 13 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบอโต้เอ็นโค้ดเดอร์สำหรับหา DOA

จากการศึกษาวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยอาศัยค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT จำเป็นต้องใช้การสมมุติฐานว่าแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field สำหรับประมาณให้คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนในลักษณะขนานกันเพื่อความเรียบง่ายในการคำนวณ แต่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในกรณีที่แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Near field ซึ่งหากใช้วิธี MUSIC ในการหา DOA และนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจะไม่จำเป็นต้องใช้สมมุติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้จำนวนไมโครโฟนที่มากกว่าวิธี GCC-PHAT เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูง

สำหรับกรณีที่สภาพแวดล้อมมีสัญญาณรบกวนสูงการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้สำหรับหา DOA สามารถช่วยแก้ปัญหาได้ แต่มีข้อจำกัดในด้านการรวบรวมชุดข้อมูลสำหรับใช้ฝึกสอนที่กระทำได้ค่อนข้างยาก โดยสามารถหลีกเลี่ยงการรวบรวมชุดข้อมูลด้วยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมประเภท Unsupervised learning ได้ แต่อาจให้ผลลัพธ์ได้ไม่แม่นยำเท่ากับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้การเรียนรู้แบบผู้สอน (Supervised learning) เนื่องจากข้อมูลดิบที่นำมาใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Unsupervised learning ไม่ได้ระบุประเภทของชุดข้อมูลไว้

บทที่ 3

การศึกษาและทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ

ในส่วนนี้เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติด้วย 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance โดยการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ กำหนดโปรแกรม และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การวางตำแหน่งไมโครโฟน วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1 วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ การออกแบบการทดลอง และผลการทดลอง

3.1 กำหนดโปรแกรม และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

ในการออกแบบและพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้โปรแกรม MATLAB เนื่องจากโปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณต่างๆ ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองและทดสอบวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น สำหรับการนำไปใช้งานกับระบบจริงทางผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม LABVIEW เนื่องจากภายในโปรแกรมมี Tool box ที่สะดวกสำหรับการรับสัญญาณอินพุตจากอุปกรณ์ และการประมวลสัญญาณ อีกทั้งยังสามารถนำวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB มาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงด้วยการใช้โมดูล MathScript

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

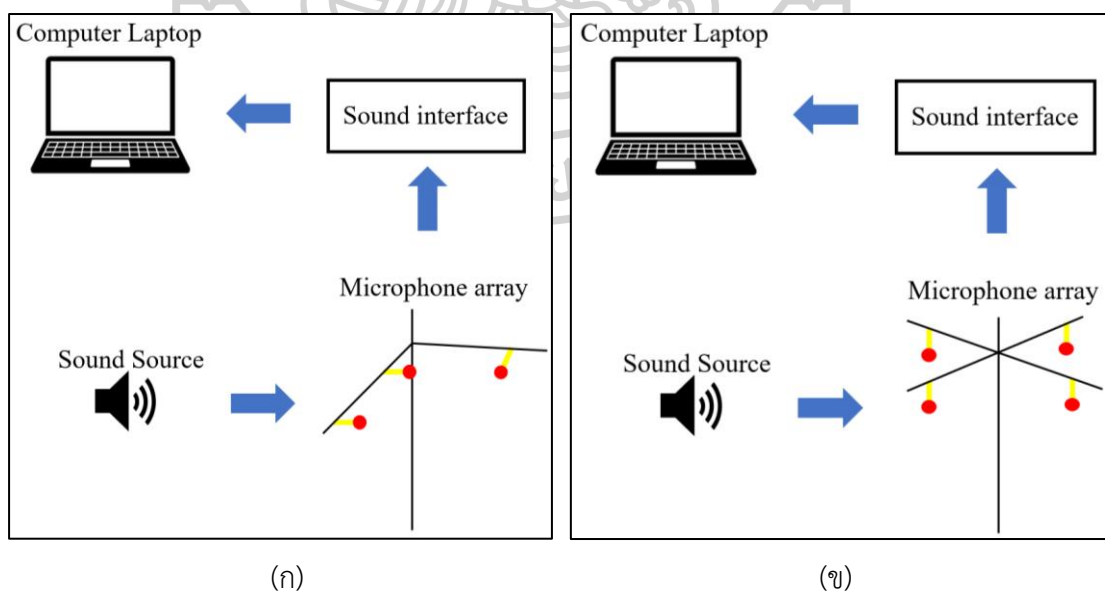
3.1.2.1 คอมพิวเตอร์โน้ตบุคยี่ห้อ ASUS รุ่น GL552VW intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60 GHz up to 3.50 GHz หน่วยความจำ 8 GB ระบบปฏิบัติการ Window 10

3.1.2.2 ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ยี่ห้อ Audio-Technica ที่มีการตอบสนองความถี่ (Frequency response) ที่ 50 – 18,0000 Hz จำนวน 4 ตัว

3.1.2.3 Sound interface ยี่ห้อ Behringer รุ่น UMC404HD ซึ่งมี 4 อินพุท และ อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling rate) 192 kHz

3.1.3 ภาพรวมของระบบ

ระบบการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ สำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 14 ซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป Sound interface และไมโครโฟนอะเรย์ โดยรูปที่ 14(ก) แสดงระบบสำหรับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 1 ควอดแดรนต์ที่ 1 ซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์บริการสำหรับการหาตำแหน่งของเสียงผู้เรียกได้ และสำหรับรูปที่ 14(ข) จะแสดงระบบการระบุตำแหน่งในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหาตำแหน่งในกรณีที่เกิดเสียงเกิดขึ้นรอบทิศทางของไมโครโฟนอะเรย์ เช่น การหาตำแหน่งของผู้พูดในโต๊ะประชุม การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงเริ่มจากใช้คอมพิวเตอร์แล็ปท็อปที่มีโปรแกรม LabView ความคุมไมโครโฟนสำหรับตรวจจับ และบันทึกสัญญาณเสียงของแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นผ่านทาง Sound interface ซึ่งใช้ระยะเวลาในการบันทึก 2 วินาที โดยที่ Sound interface จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล และส่งข้อมูลที่ได้กลับไปยังคอมพิวเตอร์แล็ปท็อปเพื่อทำการประมวลสัญญาณ และคำนวณหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยวิธีการที่จะนำเสนอในลำดับถัดไปโดยใช้โปรแกรม LabView

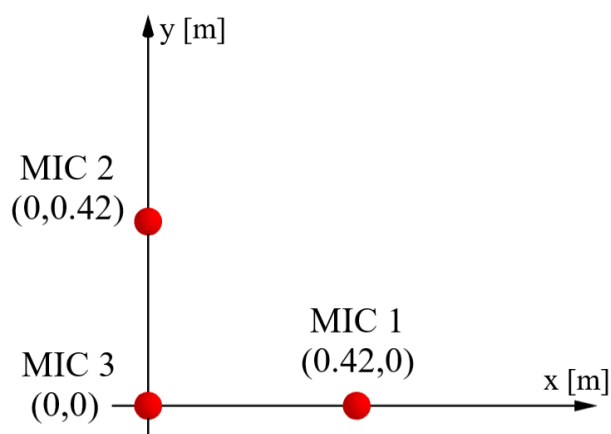


รูปที่ 14 ภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (ก) สำหรับหาตำแหน่งใน 2 มิติ 1 ควอดแดรนต์ และ (ข) สำหรับหาตำแหน่งใน 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์

3.2 การวางตำแหน่งไมโครโฟนสำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ

3.3.1 การวางตำแหน่งไมโครโฟน 3 ตัวสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 1 ควอดแดรนต์

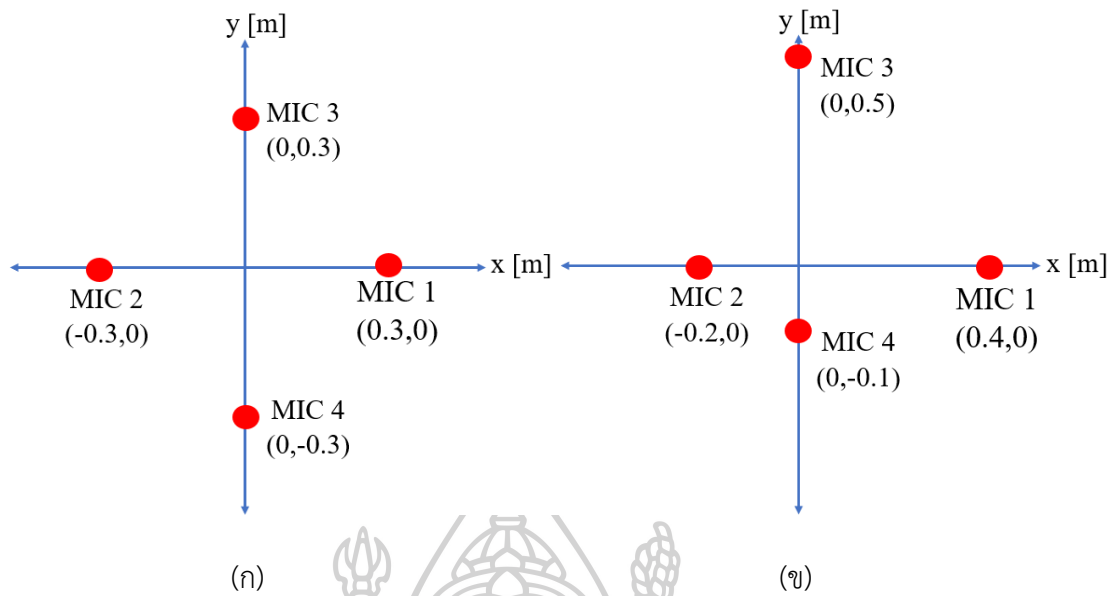
การทดสอบวิธีหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ ควอดแดรนต์ที่ 1 จะทำการนำไมโครโฟนจำนวน 3 ตัวมาจัดเรียงแบบเรขาคณิตในระนาบ $x-y$ ซึ่งกำหนดให้ไมโครโฟนตัวที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0.42$ เมตร $y = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร $y = 0.42$ เมตร และไมโครโฟนตัวที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร $y = 0$ เมตร ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตำแหน่งการวางไมโครโฟน 3 ตัวสำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ
ควอดแดรนต์ที่ 1

3.3.1 การวางตำแหน่งไมโครโฟน 4 ตัวสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 4 ควอดแดรนต์

การทดลองหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์จะทำการใช้ไมโครโฟนจำนวน 4 ตัวจัดเรียงอยู่บนระนาบ $x-y$ ซึ่งจะเปรียบเทียบการจัดเรียงไมโครโฟนทั้งแบบสมมาตร และแบบอสมมาตร สำหรับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตรจะกำหนดให้ไมโครโฟนตัวที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0.3$ เมตร และ $y = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = -0.3$ เมตร และ $y = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร และ $y = 0.3$ เมตร และไมโครโฟนตัวที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร และ $y = -0.3$ เมตร ดังรูปที่ 16(ก) ในส่วนของการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตรจะกำหนดให้ไมโครโฟนตัวที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0.4$ เมตร และ $y = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = -0.2$ เมตร และ $y = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร และ $y = 0.5$ เมตร และไมโครโฟนตัวที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร และ $y = -0.1$ เมตร ดังรูปที่ 16(ข)

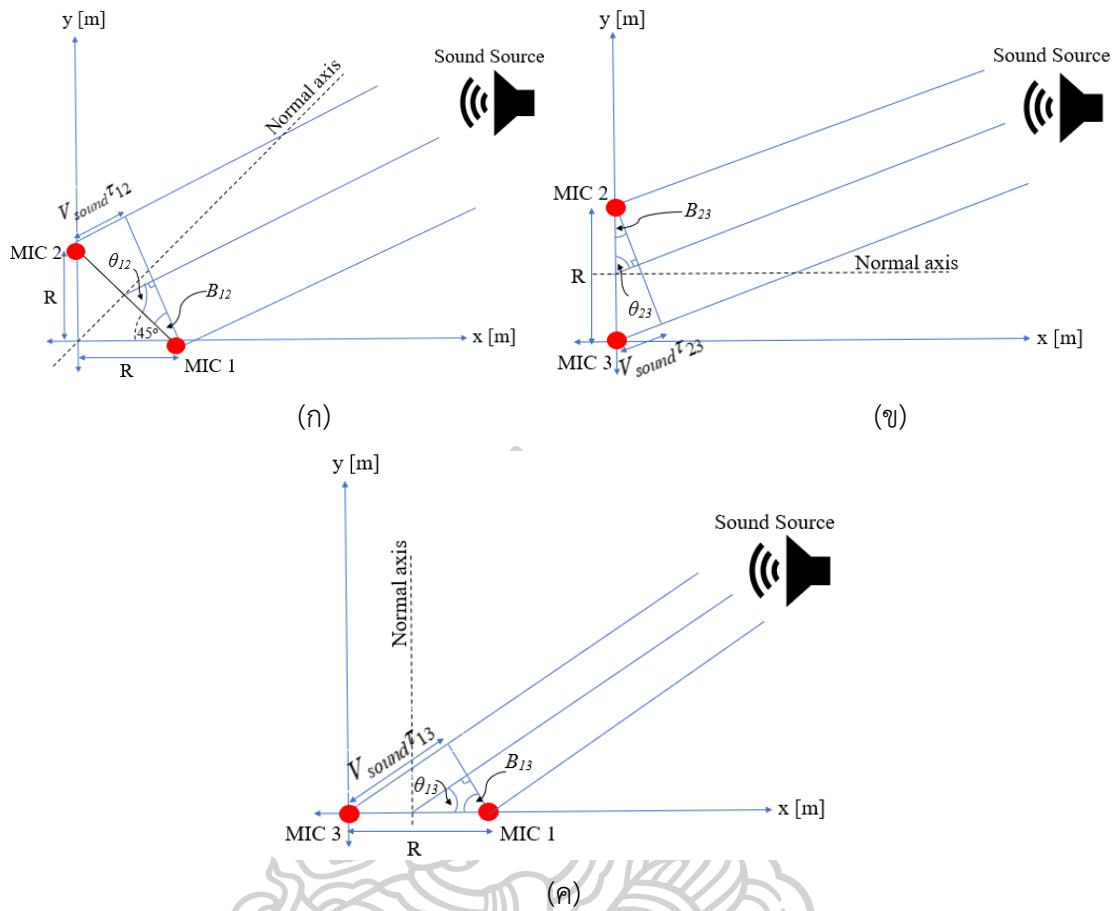


รูปที่ 16 ตำแหน่งการวางไมโครโฟน 4 ตัว (ก) แบบสมมาตร (ข) แบบอสมมาตร

3.3 การศึกษาการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง

3.3.1 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1

การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเดินทางเสียงสามารถกระทำได้ด้วยการสมมุติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จะสามารถประมาณได้ว่าคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่คู่มือไมโครโฟนในลักษณะขนานกัน จากการใช้ไมโครโฟน 3 ตัวจัดเรียงในลักษณะเรขาคณิตดังแสดงในรูปที่ 17 (ก), (ข) และ (ค) ค่ามุม B_{12} , B_{23} และ B_{13} สำหรับคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 3 และตัวที่ 1 กับ 3 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1), (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ



รูปที่ 17 การคำนวณมุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของคลื่นเสียง (ก) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 (ข) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 2 กับ 3 และ (ค) คู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3

$$B_{12} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{12}}{\sqrt{2}R} \right)^2} \right) \quad (3.1)$$

$$B_{23} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{23}}{R} \right)^2} \right) \quad (3.2)$$

$$B_{13} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{13}}{R} \right)^2} \right) \quad (3.3)$$

โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว [m]

τ คือ TDOA ระหว่างไมโครโฟน 2 ตัว [s]

V_{sound} คือ ความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ [m/s]

มุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ของทางตรงคลื่นเสียงที่ตกกระทบกับจุดกึ่งกลางของคู่อไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 (θ_{12}) (แสดงในรูปที่ 22 (ก)) สามารถหาได้จากค่าของ TDOA โดยหากค่า τ_{12} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ หมายความว่าคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 2 จะสามารถคำนวณหาค่ามุม θ_{12} ได้ดังสมการที่ (3.4) และถ้า τ_{12} น้อยกว่าศูนย์ แสดงว่าคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 2 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 1 ค่ามุม θ_{12} คำนวณได้ดังสมการที่ (3.5)

$$\theta_{12} = 90^\circ - B_{12}, \text{ สำหรับ } \tau_{12} < 0 \quad (3.4)$$

$$\theta_{12} = 90^\circ + B_{12}, \text{ สำหรับ } \tau_{12} > 0 \quad (3.5)$$

ในทำนองเดียวกัน มุมของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ตกกระทบกับจุดกึ่งกลางของคู่อไมโครโฟนตัวที่ 2 กับ 3 (θ_{23}) (แสดงในรูปที่ 22 (ข)) สามารถหาได้จากค่าของ TDOA โดยที่ถ้า τ_{23} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (หมายความว่าคลื่นเสียงมาถึงไมโครโฟนตัวที่ 2 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 3) ค่า θ_{23} คำนวณได้ดังสมการ (3.6) ถ้า τ_{23} น้อยกว่าศูนย์ (หมายความว่าคลื่นเสียงมาถึงไมโครโฟนตัวที่ 3 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 2) ค่า θ_{23} คำนวณได้ดังสมการ (3.7)

$$\theta_{23} = 90^\circ - B_{23}, \text{ สำหรับ } \tau_{23} < 0 \quad (3.6)$$

$$\theta_{23} = 90^\circ + B_{23}, \text{ สำหรับ } \tau_{23} > 0 \quad (3.7)$$

เช่นเดียวกับกับคู่อไมโครโฟนก่อนหน้า มุมของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดที่ตกกระทบกับจุดกึ่งกลางของไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 (θ_{13}) (ดังรูปที่ 22 (ค)) สามารถหาได้จากค่าของ TDOA ถ้า τ_{13} มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (หมายความว่าคลื่นเสียงมาถึง MIC1 ก่อน MIC3) ค่า θ_{13} คำนวณได้ดังสมการ (3.8) ถ้า τ_{13} น้อยกว่าศูนย์ (หมายความว่าคลื่นเสียงมาถึง MIC3 ก่อน MIC1) ค่า θ_{13} คำนวณได้ดังสมการ (3.9)

$$\theta_{13} = 90^\circ - B_{13}, \text{ สำหรับ } \tau_{13} < 0 \quad (3.8)$$

$$\theta_{13} = 90^\circ + B_{13}, \text{ สำหรับ } \tau_{13} > 0 \quad (3.9)$$

จากการรู้มุมของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงที่ตกกระทบกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่อไมโครโฟน ชุดของสมการเส้นตรงในรูปของ $y = mx + c$ จะใช้แทนเส้นทางตรงของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่จากตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงไปยังจุดกึ่งกลางของคู่อไมโครโฟน ค่าความชัน m ของ

สมการเส้นตรงคำนวณได้จากสมการที่ (3.10), (3.11) และ (3.12) สำหรับคู่มicroโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ไมโครโฟนตัวที่ 2 กับ 3 และไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตามลำดับ โดยค่า c ที่เป็นจุดตัดแกน y สำหรับสมการเส้นตรงแต่ละเส้นจะได้รับการแทนค่าความชัน และพิกัด (x, y) ณ จุดกึ่งกลางของคู่มicroโฟนลงในสมการเส้นตรง

$$m_{12} = \tan(\theta_{12} - 45^\circ) \quad (3.10)$$

$$m_{23} = \tan(90^\circ - \theta_{23}) \quad (3.11)$$

$$m_{13} = \tan(\theta_{13}) \quad (3.12)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากจุดที่ตัดกันของสมการเส้นตรงทั้ง 3 เส้น แต่ในการทดลองกับสภาพแวดล้อมจริงที่มีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น สมการเส้นตรงอาจไม่ได้ตัดกันที่จุดเดียว ดังนั้นค่าเฉลี่ยของจุดตัดของสมการเส้นตรงทั้ง 3 จะถือว่าเป็นตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ

3.3.2 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์

การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ด้วยการใช้วิธีจุดตัดของเส้นทางเดินเสียงร่วมกับไมโครโฟน 4 ตัว กระทำได้โดยสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field ค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มicroโฟนแต่ละคู่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13) และ (3.14)

$$\theta_{mn} = 90^\circ - \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{mn}}{r_{mn}} \right)^2} \right), \text{ สำหรับ } \tau_{mn} < 0 \quad (3.13)$$

$$\theta_{mn} = 90^\circ + \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{mn}}{r_{mn}} \right)^2} \right), \text{ สำหรับ } \tau_{mn} > 0 \quad (3.14)$$

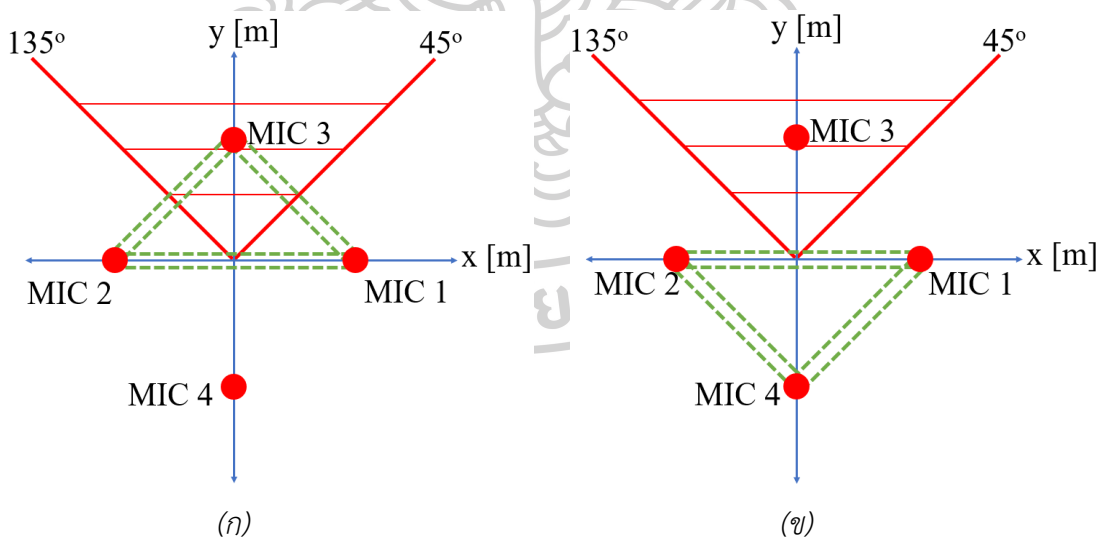
โดยที่ r_{mn} คือ ระยะห่างระหว่างไมโครโฟนตัวที่ m และ n [m]

τ_{mn} คือ TDOA ระหว่างไมโครโฟนตัวที่ m และ n [s]

V_{sound} คือ ความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ [m/s]

จากการใช้ไมโครโฟนจำนวน 4 ตัวจะสามารถสร้างสมการเส้นตรงของคู่อไมโครโฟนได้ทั้งหมด 6 สมการ แต่เนื่องจากอาจเกิดกรณีที่สมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นมีการทับกัน หรืออยู่ใกล้กันมากเกินไป สำหรับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในทิศทางต่างๆ ซึ่งจะส่งผลต่อความผิดพลาดในการหาจุดตัดได้ ทางผู้วิจัยจึงนำลำดับของไมโครโฟนที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าถึงตัวแรก และตัวสุดท้ายมาใช้ในการประมาณทิศทางของแหล่งกำเนิดเสียง เพื่อทำการเลือกกลุ่มของคู่อไมโครโฟน 3 จาก 6 คู่อมาใช้สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า 45 องศา และน้อยกว่า 135 องศา (บริเวณแรงเงาสีแดง) ที่ซึ่งสัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 3 เป็นตัวแรก และเข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 เป็นตัวสุดท้าย จะทำการเลือกกลุ่มของคู่อไมโครโฟน 3 จาก 6 คู่อ เป็นจำนวน 2 กลุ่มสำหรับการหาคำตอบ ดังรูปที่ 18 โดยรูปที่ 18 (ก) แสดงกลุ่มของคู่อไมโครโฟนกลุ่มแรก ซึ่งประกอบด้วยคู่อไมโครโฟนทั้งหมด 3 คู่อ ได้แก่ คู่อไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2 (ดั่งเส้นประสีเขียว) รูปที่ 18 (ข) แสดงกลุ่มของคู่อไมโครโฟนกลุ่มที่สองประกอบด้วยคู่อไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1 (ดั่งเส้นประสีเขียว)



รูปที่ 18 กลุ่มของคู่อไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า 45 องศา และน้อยกว่า 135 องศา (ก) คู่อไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข) คู่อไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงสำหรับคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1 ได้ดังนี้

$$m_{12} = \tan(\theta_{12}) \quad (3.15)$$

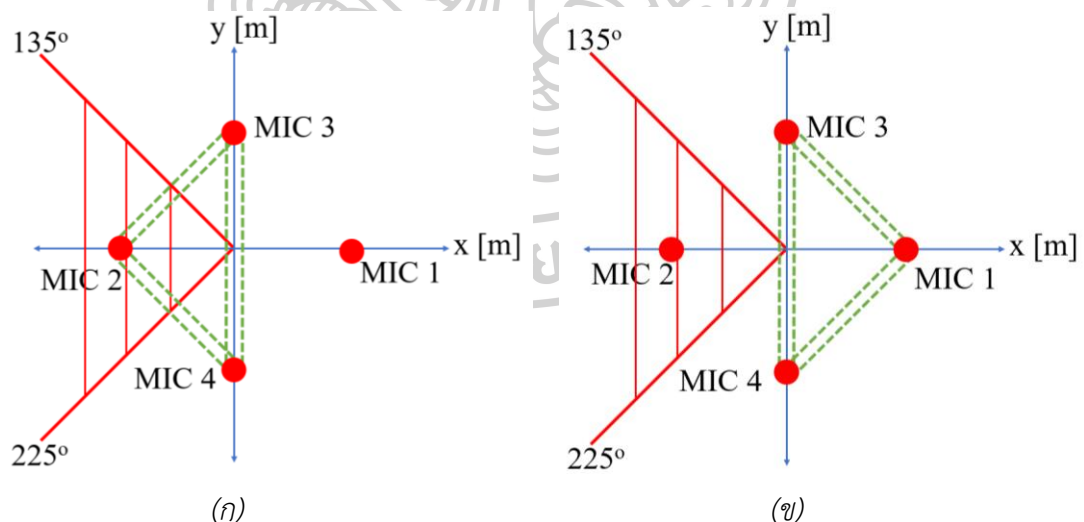
$$m_{13} = \tan(\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.16)$$

$$m_{32} = \tan(\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.17)$$

$$m_{24} = \tan(-\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.18)$$

$$m_{41} = \tan(-\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.19)$$

3.3.1.2 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า 135 องศา และน้อยกว่า 225 องศา ซึ่งคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 2 เป็นตัวแรก และเข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 เป็นตัวสุดท้าย จะทำการเลือกกลุ่มของคู่มือไมโครโฟน 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะประกอบด้วย คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3 กับ 2 (ดังรูปที่ 19 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1 (ดังรูปที่ 19 (ข))



รูปที่ 19 กลุ่มของคู่มือไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า 135 องศา และน้อยกว่า 225 องศา (ก) คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข) คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของไมโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 ตัวที่ 3 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1 ได้ดังนี้

$$m_{43} = \tan(-\theta_{43} - 90^\circ) \quad (3.20)$$

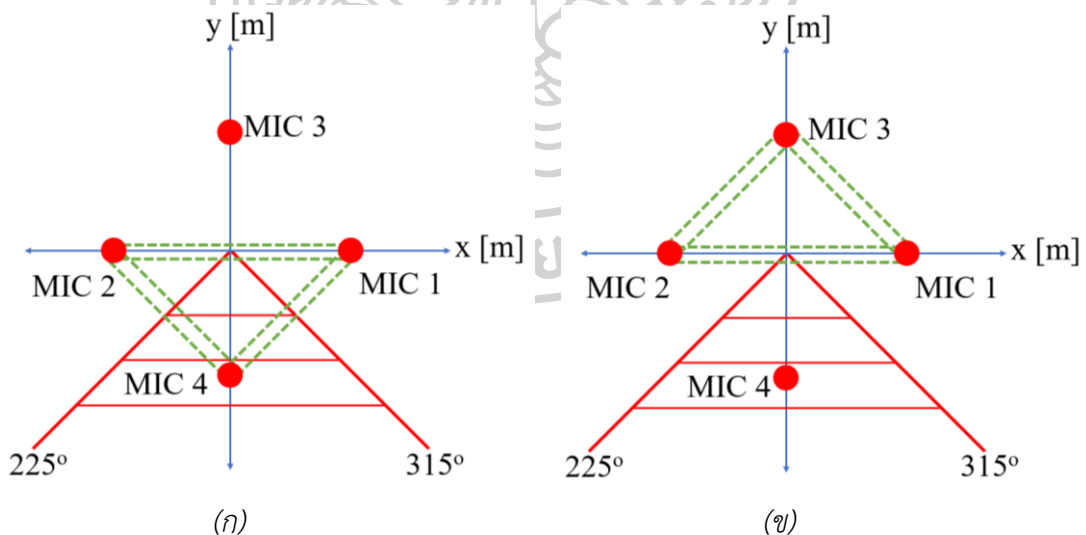
$$m_{24} = \tan(\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.21)$$

$$m_{32} = \tan(\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.22)$$

$$m_{13} = \tan(-\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.23)$$

$$m_{41} = \tan(-\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.24)$$

3.3.1.3 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า 225 องศา และน้อยกว่า 315 องศา (สัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 เป็นตัวแรก และเข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 3 เป็นตัวสุดท้าย) กลุ่มของไมโครโฟนกลุ่มแรกประกอบด้วย ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1 (ดังรูปที่ 20 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2 (ดังรูปที่ 20 (ข))



รูปที่ 20 กลุ่มของไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า 225 องศา และน้อยกว่า 315 องศา (ก) ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1
(ข) ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 ตัวที่ 2 กับ 4 ตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 3 กับ 2 ได้ดังนี้

$$m_{12} = \tan(-\theta_{12}) \quad (3.25)$$

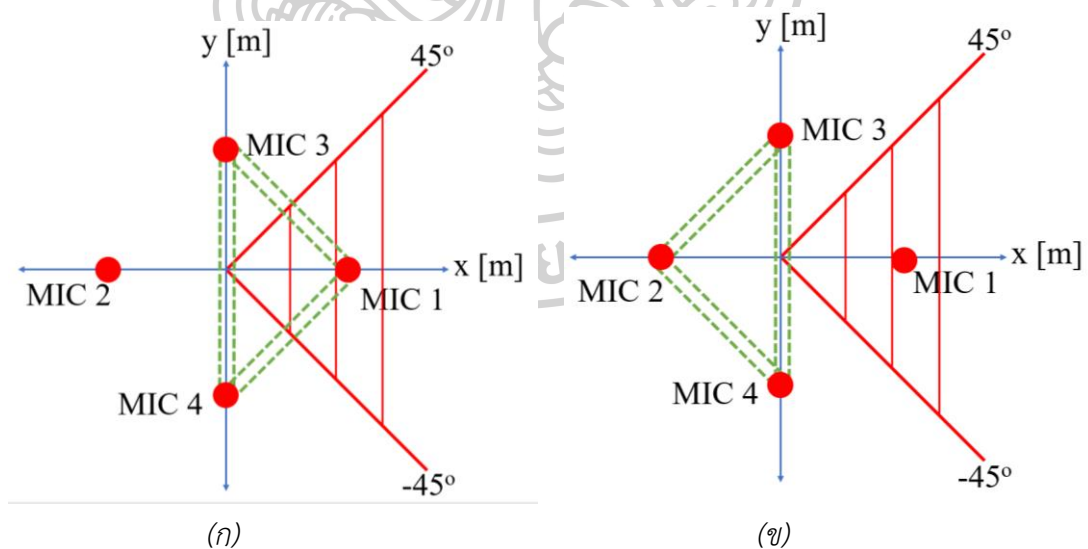
$$m_{24} = \tan(\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.26)$$

$$m_{41} = \tan(\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.27)$$

$$m_{13} = \tan(-\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.28)$$

$$m_{32} = \tan(-\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.29)$$

3.3.1.4 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า -45 องศา และน้อยกว่า 45 องศา (สัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 เป็นตัวแรก และเข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 2 เป็นตัวสุดท้าย) กลุ่มของคู่มือไมโครโฟนกลุ่มแรกประกอบด้วย คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1 (ดังรูปที่ 21 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4 (ดังรูปที่ 21 (ข))



รูปที่ 21 กลุ่มของคู่มือไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทางที่ทำมุมกับจุดกำเนิดมากกว่า -45 องศา และน้อยกว่า 45 องศา (ก) คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 4 กับ 1 (ข) คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของไมโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับคู่อิทธิมาตรไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4 ได้ดังนี้

$$m_{43} = \tan(\theta_{43} - 90^\circ) \quad (3.30)$$

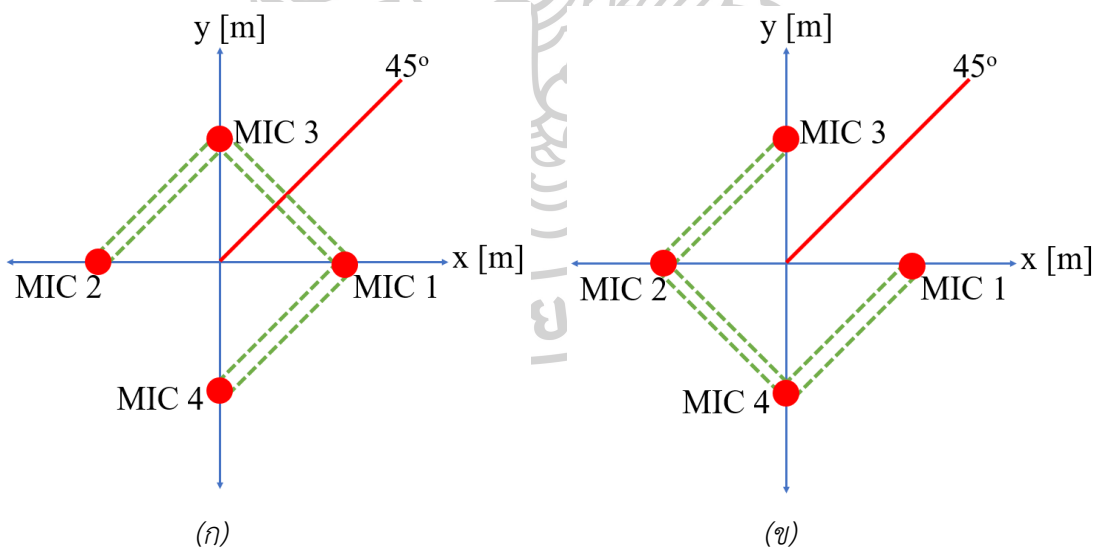
$$m_{13} = \tan(\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.31)$$

$$m_{41} = \tan(\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.32)$$

$$m_{32} = \tan(-\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.33)$$

$$m_{24} = \tan(-\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.34)$$

3.3.1.5 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 45 องศา (สัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 พร้อมกัน และเข้าสู่ตัวที่ 2 กับ 4 เป็นลำดับถัดมา) กลุ่มของคู่อิทธิมาตรไมโครโฟนกลุ่มแรกประกอบด้วย คู่อิทธิมาตรไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 4 กับ 1 และตัวที่ 3 กับ 2 (ดังรูปที่ 22 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยคู่อิทธิมาตรไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4 (ดังรูปที่ 22 (ข))



รูปที่ 22 กลุ่มของคู่อิทธิมาตรไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 45 องศา (ก) คู่อิทธิมาตรไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 4 กับ 1 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข) คู่อิทธิมาตรไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับคู่มือโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4 ได้ดังนี้

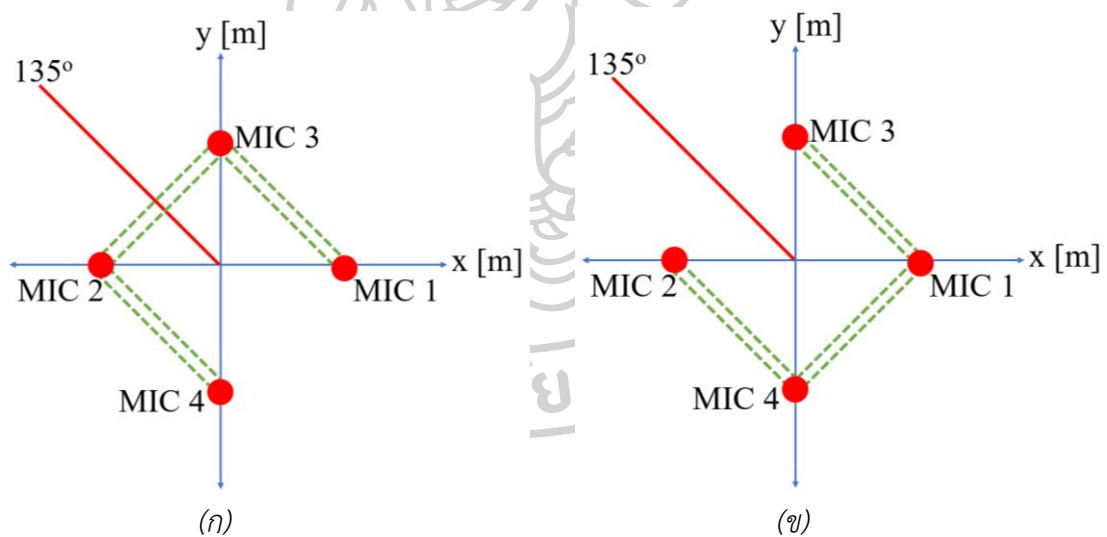
$$m_{13} = \tan(-\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.35)$$

$$m_{41} = \tan(-\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.36)$$

$$m_{32} = \tan(\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.37)$$

$$m_{24} = \tan(-\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.38)$$

3.3.1.6 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 135 องศา (สัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 พร้อมกัน และเข้าสู่ตัวที่ 1 กับ 4 เป็นลำดับถัดมา) กลุ่มของคู่มือโครโฟนกลุ่มแรกประกอบด้วย คู่มือโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 2 กับ 4 (ดังรูปที่ 23 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยคู่มือโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1 (ดังรูปที่ 23 (ข))



รูปที่ 23 กลุ่มของคู่มือโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 135 องศา (ก) คู่มือโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 2 กับ 4 (ข) คู่มือโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับคู่มือโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 ตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1 ได้ดังนี้

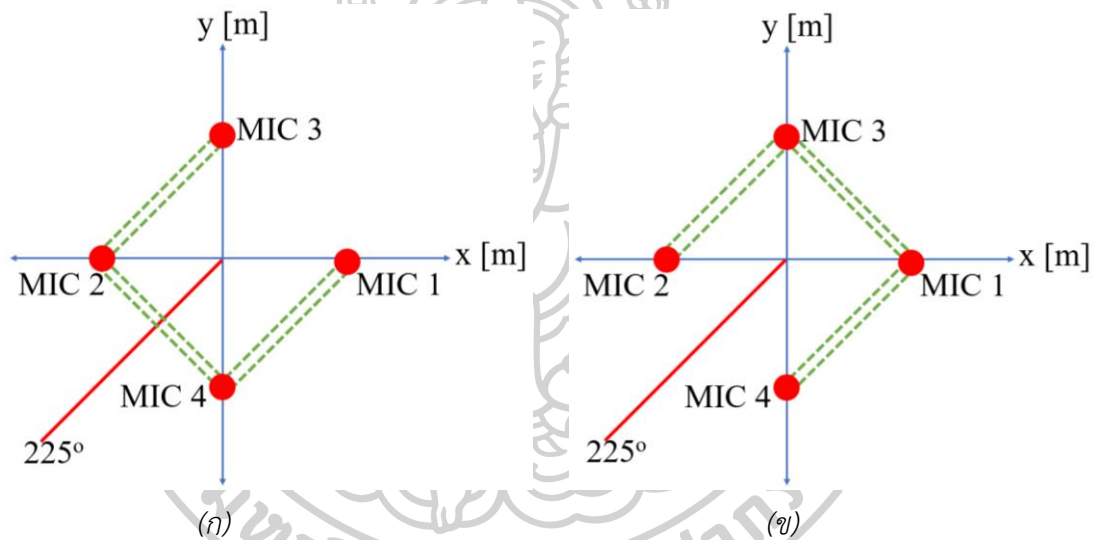
$$m_{32} = \tan(-\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.39)$$

$$m_{13} = \tan(\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.40)$$

$$m_{24} = \tan(-\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.41)$$

$$m_{41} = \tan(-\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.42)$$

3.3.1.7 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 225 องศา (สัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 2 กับ 4 พร้อมกัน และเข้าสู่ตัวที่ 1 กับ 3 เป็นลำดับถัดมา) กลุ่มของคู่มิโครโฟนกลุ่มแรกประกอบด้วย คู่มิโครโฟนตัวที่ 2 กับ 4 ตัวที่ 4 กับ 1 และตัวที่ 3 กับ 2 (ดังรูปที่ 24 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยคู่มิโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4 (ดังรูปที่ 24 (ข))



รูปที่ 24 กลุ่มของคู่มิโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 225 องศา (ก) คู่มิโครโฟนตัวที่ 2 กับ 4 ตัวที่ 4 กับ 1 และตัวที่ 3 กับ 2 (ข) คู่มิโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 2 กับ 4

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มิโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับคู่มิโครโฟนตัวที่ 2 กับ 4 ตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 1 กับ 3 ได้ดังนี้

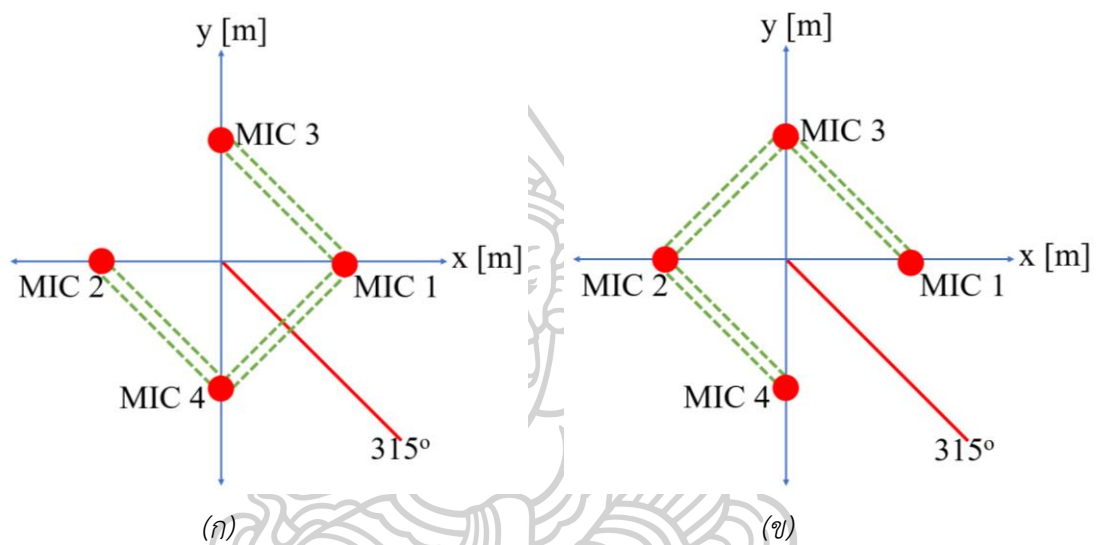
$$m_{24} = \tan(\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.43)$$

$$m_{41} = \tan(-\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.44)$$

$$m_{32} = \tan(-\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.45)$$

$$m_{13} = \tan(-\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.46)$$

3.3.1.8 กรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 315 องศา (สัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 4 พร้อมกัน และเข้าสู่ตัวที่ 2 กับ 3 เป็นลำดับถัดมา) กลุ่มของคูไมโครโฟนกลุ่มแรกประกอบด้วย คูไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 2 กับ 4 (ดังรูปที่ 25 (ก)) กลุ่มที่สองประกอบด้วยคูไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3 กับ 2 (ดังรูปที่ 25 (ข))



รูปที่ 25 กลุ่มของคูไมโครโฟนสำหรับกรณีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 315 องศา (ก) คูไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 1 กับ 3 และตัวที่ 2 กับ 4 (ข) คูไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3 กับ 2

จากค่ามุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคูไมโครโฟนต่างๆ ที่คำนวณได้ จะสามารถหาค่าความชันของสมการเส้นตรงสำหรับคูไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 1 ตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 3 กับ 2 ได้ดังนี้

$$m_{41} = \tan(\theta_{41} + 45^\circ) \quad (3.47)$$

$$m_{13} = \tan(-\theta_{13} - 45^\circ) \quad (3.48)$$

$$m_{24} = \tan(-\theta_{24} - 45^\circ) \quad (3.49)$$

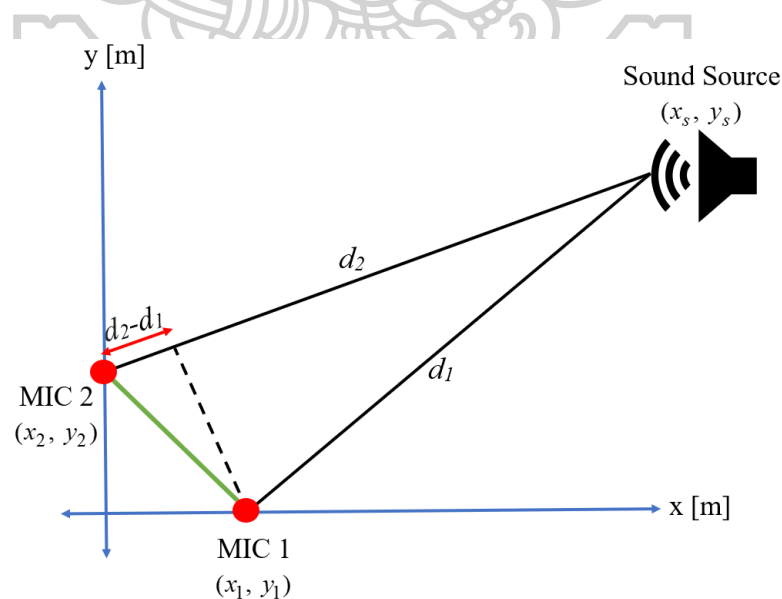
$$m_{32} = \tan(-\theta_{32} + 45^\circ) \quad (3.50)$$

จากค่าความชันของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงที่ได้ จะสามารถหาค่า c ที่ซึ่งเป็นจุดตัดแกน y ของสมการเส้นตรงได้โดยการแทนค่าความชัน และพิกัด (x, y) ณ จุดกึ่งกลางของคู่มือไมโครโฟนลงในสมการเส้นตรง $y = mx + c$ ด้วยการใช้กลุ่มของคู่มือไมโครโฟนทั้งหมด 2 กลุ่มสำหรับสร้างสมการเส้นตรงของเส้นทางเดินเสียง และหาจุดที่ตัดกัน จะทำให้มีคำตอบที่เป็นค่าเฉลี่ยของจุดตัดของสมการเส้นตรง 3 เส้น ทั้งหมด 2 คำตอบ โดยที่ค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ได้จากกลุ่มของคู่มือไมโครโฟนทั้ง 2 กลุ่มจะถือว่าเป็นตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นในพิกัด 2 มิติ

3.4 การศึกษาการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติโดยใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance

3.4.1 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1

วิธีที่สองสำหรับการหาคำตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ หรือที่ทางผู้วิจัยเรียกว่าวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข สามารถกระทำได้โดยการหาระยะห่างระหว่างตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งการวางไมโครโฟนแต่ละตัว ซึ่งวิธีการนี้ไม่ได้มีการใช้สมมติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field เพื่อประมาณให้คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนแบบขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 26 ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนในพิกัด 2 มิติ

จากสมการ Euclidean distance จะสามารถหาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนตัวที่ 1 (d_1) ได้ดังสมการที่ (3.51) และหาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนตัวที่ 2 (d_2) ได้จากสมการที่ (3.52)

$$d_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} \quad (3.51)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} \quad (3.52)$$

โดยที่ x_s และ y_s คือ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ

x_1 และ y_1 คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ 1

x_2 และ y_2 คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ 2

จากสมการระยะทาง $s = vt$ ความต่างของระยะทางที่เสียงเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว แสดงได้ดังสมการที่ (3.53) และเมื่อแทนค่า d_1 และ d_2 จากสมการที่ (3.50) และ (3.52) ลงในสมการที่ (3.53) จะทำให้ได้เป็นสมการที่ (3.54)

$$d_2 - d_1 = V_{sound} \tau_{12} \quad (3.53)$$

$$\sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} - \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} = V_{sound} \tau_{12} \quad (3.54)$$

ทำการนำสมการที่ (3.54) มาขยายข้างให้กลายเป็นสมการที่ (3.55) ด้วยการรู้ค่าความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ (V_{sound}) ตำแหน่งการวางไมโครโฟน และค่า TDOA ที่ได้จากวิธีการ GCC-PHAT จะทำให้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงขึ้นอยู่กับค่า TDOA โดยตรง ซึ่งตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นในพิกัด 2 มิติคือค่า x_s และ y_s ใดๆ ที่เมื่อแทนลงไปในสมการที่ (3.55) ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} - \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2} - V_{sound} \tau_{12} = 0 \quad (3.55)$$

อย่างไรก็ตาม จากสมการที่ (3.55) ค่า x_s และ y_s ซึ่งเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นอาจมีได้มากกว่า 1 ชุดคำตอบ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นไปได้ขึ้นอยู่กับ ค่า τ_{12} เพียงค่าเดียว ส่งผลให้อาจมีคำตอบของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงตำแหน่งอื่นที่ทำ

ให้สมการที่ (3.55) มีค่าเท่ากับศูนย์ได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น จากการวางไมโครโฟน 3 ตัว ดังรูปที่ 15 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง ที่ $x_s = 1$ เมตร และ $y_s = 1$ เมตร มีค่า $\tau_{12} = 0$ วินาที ซึ่งเท่ากับกับที่ ตำแหน่ง $x_s = 2$ เมตร และ $y_s = 2$ เมตร

ดังนั้นจากการใช้ไมโครโฟน 3 ตัวจะสามารถจับคู่ไมโครโฟนได้ทั้งหมด 3 คู่ ซึ่งสมการความต่างของระยะทางที่เสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนที่ได้จาก Euclidean distance ของไมโครโฟนแต่ละคู่จะถูกรวมเข้าด้วยกันและกลายเป็นดังสมการที่ (3.56) โดยที่คำตอบของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นไปได้ (x_s และ y_s) จะขึ้นอยู่กับค่า TDOA ทั้ง 3 ค่า ของไมโครโฟนแต่ละคู่ ซึ่งจะทำให้สามารถให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงได้อย่างถูกต้อง

$$\sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=2}^N \left(\sqrt{(x_s - x_n)^2 + (y_s - y_n)^2} - \sqrt{(x_s - x_m)^2 + (y_s - y_m)^2} - V_{sound} \tau_{mn} \right) = 0, \quad m \neq n \quad (3.56)$$

โดยที่ x_m และ y_m คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ m

x_n และ y_n คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ n

N คือ จำนวนไมโครโฟน

เนื่องจากการแก้สมการที่ (3.56) เพื่อหาพิกัด x_s และ y_s ของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติมีความซับซ้อน ทางผู้วิจัยจึงใช้การหาคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical solution) ด้วยการนำสมการที่ (3.56) มาสร้างเป็น Objective function สำหรับหาดำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ ควอดแดรนต์ที่ 1 ดังสมการที่ (3.57) โดยค่า x_s และ y_s ที่ทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุดจะเป็นคำตอบของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งหาได้จากการใช้ Interior point method

$$\min_S \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \text{abs}(\|S - M_n\|_2 - \|S - M_m\|_2 - V_{sound} \tau_{mn}) \quad (3.57)$$

subject to $0 \leq S \leq S_{up}$

โดย S คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง ($S = (x_s, y_s)$)

M_m คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งไมโครโฟนตัวที่ m ($M_m = (x_m, y_m)$)

M_n คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งไมโครโฟนตัวที่ n ($M_n = (x_n, y_n)$)

S_{up} คือ ขอบเขตบน (Upper boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

3.4.2 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ โดยใช้วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance

ด้วยการใช้ไมโครโฟน 4 ตัวเพื่อหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ จะสามารถจับคู่ไมโครโฟนได้ทั้งหมด 6 คู่ ซึ่งสมการความต่างของระยะทางที่เสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนที่ได้จาก Euclidean distance ของไมโครโฟนแต่ละคู่จะถูกรวมเข้าด้วยกันเขียนได้ดังสมการที่ (3.58)

$$\sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \left(\sqrt{(x_s - x_n)^2 + (y_s - y_n)^2} - \sqrt{(x_s - x_m)^2 + (y_s - y_m)^2} - V_{sound} \tau_{mn} \right) = 0 \quad (3.58)$$

โดยที่ x_m และ y_m คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ m

x_n และ y_n คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ n

N คือ จำนวนไมโครโฟน

เพื่อที่จะหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจากค่า x_s และ y_s ที่ทำให้สมการที่ (3.58) มีค่าเท่ากับศูนย์ ผู้วิจัยจึงนำสมการที่ (3.58) มาสร้างเป็น Objective function สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ ดังสมการที่ (3.59) และใช้การหาคำตอบเชิงตัวเลขเพื่อหาค่า x_s และ y_s ที่ทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุดด้วย Interior point method

$$\min_S \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \text{abs}(\|S - M_n\|_2 - \|S - M_m\|_2 - V_{sound} \tau_{mn}) \quad (3.59)$$

subject to $S_{lo} \leq S \leq S_{up}$

โดย S คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง ($S = (x_s, y_s)$)

M_m คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งไมโครโฟนตัวที่ m ($M_m = (x_m, y_m)$)

M_n คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งไมโครโฟนตัวที่ n ($M_n = (x_n, y_n)$)

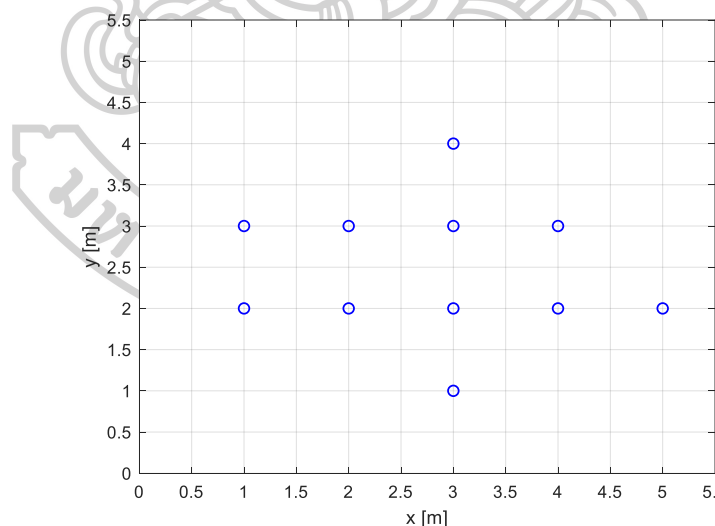
S_{lo} คือ ขอบเขตล่าง (Lower boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

S_{up} คือ ขอบเขตบน (Upper boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

3.5 การออกแบบการทดลอง

3.5.1 การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1

ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง 12 ตำแหน่งในควอดแดรนต์แรกที่มีทั้งตำแหน่งที่อยู่ในระยะ Near field และ Far field ดังรูปที่ 27 ถูกนำมาใช้สำหรับทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1 ทั้ง 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข เสียงอิมพัลส์ถูกสร้างขึ้นที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยการใช้เสียงปืน โดยจะกำหนดให้แหล่งกำเนิดเสียงทั้ง 12 ตำแหน่งอยู่ในระนาบเดียวกันกับไมโครโฟนอะเรย์ (อยู่ในระนาบ $x-y$)



รูปที่ 27 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 12 จุดสำหรับการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1

การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองการระบุตำแหน่งในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1 แสดงดังรูปที่ 28 ซึ่งประกอบด้วยไมโครโฟน 3 ตัว Sound interface ที่มี Sampling rate 192 kHz และ

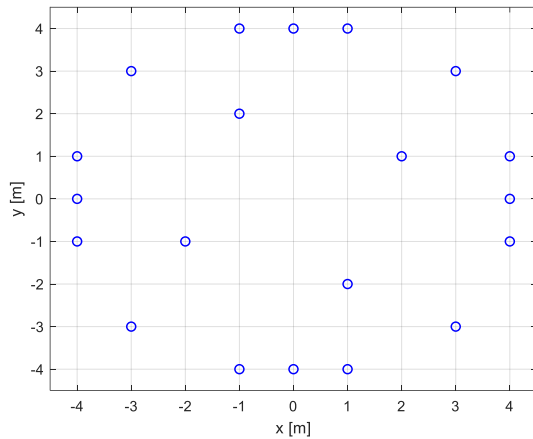
คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป ในระหว่างทำการทดลองจะต้องไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นกับไมโครโฟน เนื่องจากสัญญาณเสียงจะต้องเคลื่อนที่ในเส้นทางตรง เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีที่คลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดสะท้อนกับผนัง หรือพื้น และเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนก่อนที่เสียงอิมพัลส์ของแหล่งกำเนิดเสียงจะเข้าสู่ไมโครโฟนครบทุกตัว ไมโครโฟนทั้ง 3 ตัวจะต้องวางให้ห่างจากผนังหรือพื้นมากกว่าระยะห่างของคู่อิมพัลส์ไมโครโฟนที่ห่างที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้คู่อิมพัลส์ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 2 มีระยะห่างระหว่างกันมากที่สุดอยู่ที่ 0.594 เมตร



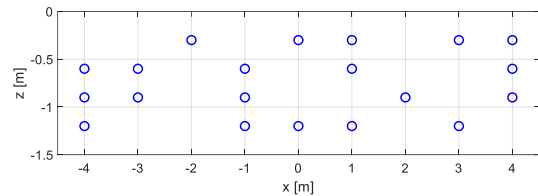
รูปที่ 28 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1

3.5.2 การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์

สำหรับการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ด้วยวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข จะทำการใช้แหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งที่ซึ่งมีทั้งตำแหน่งที่อยู่ในระยะ Near field และ Far field และอยู่ครอบคลุมทุก ควอดแดรนต์ เพื่อที่จะทดสอบการระบุตำแหน่งในกรณีที่แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันกับไมโครโฟน จะกำหนดให้แหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นอยู่ต่ำกว่าระนาบ $x-y$ เป็นระยะต่างๆ ได้แก่ 0.3 เมตร 0.6 เมตร 0.9 เมตร และ 1.2 เมตร ดังรูปที่ 29



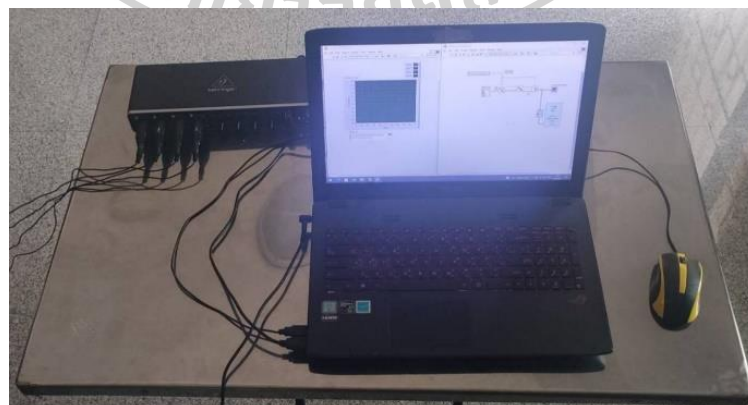
(ก)



(ข)

รูปที่ 29 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 จุดสำหรับใช้ในการทดสอบการระบุตำแหน่ง แหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง

ในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 4 ควอดแดรนต์จะแสดงดังรูปที่ 30 (ก) ประกอบด้วย Sound interface และคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป โดยไมโครโฟน 4 ตัวจะนำมาทดลองด้วยการจัดเรียงแบบสมมาตร (ดังรูปที่ 30 (ข)) และอสมมาตร (ดังรูปที่ 30 (ค)) ซึ่งมีระยะห่างของคู่มิโครโฟนที่ห่างที่สุดอยู่ที่ 0.6 เมตร และ 0.64 เมตร ตามลำดับ เนื่องจากในการทดลองส่วนนี้ แหล่งกำเนิดเสียงจะอยู่ต่ำกว่าระนาบ $x-y$ มากสุดเป็นระยะ 1.2 เมตร ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เสียงสะท้อนเข้าสู่ไมโครโฟนก่อนที่เสียงอิมพัลส์จะเคลื่อนที่ถึงไมโครโฟนครบทั้ง 4 ตัว จึงทำการวางไมโครโฟนอะเรียลให้อยู่สูงจากพื้นเป็นระยะ 2 เมตร



(ก)



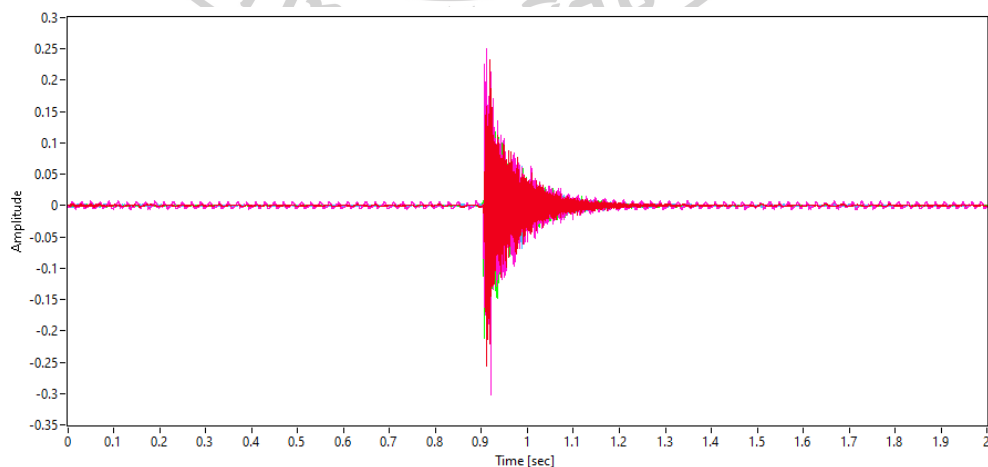
(ข)

(ค)

รูปที่ 30 (ก) การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 2 มิติ 4
ควอดแดรนต์ (ข) การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัวแบบสมมาตร และ (ค) การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัว
แบบอสมมาตร

3.5.3 การประมวลสัญญาณ

รูปที่ 31 แสดงสัญญาณอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้โดยไมโครโฟน 4 ตัวด้วยระยะเวลาการบันทึก 2 วินาที และใช้ Sampling rate 192 kHz อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวางไมโครโฟนอะเรียให้ห่างจากผนังหรือพื้นมากกว่าระยะห่างของคู่อิมโครโฟนที่ห่างที่สุด หลังจากที่เกิดคลื่นเสียงอิมพัลส์ของแหล่งกำเนิดเข้าสู่ไมโครโฟนครบทุกตัวแล้วย่อมมีเสียงสะท้อนเข้ามาต่อท้ายด้วยเสมอ ดังนั้นเพื่อให้สัญญาณเสียงที่นำไปใช้หาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงมีเพียงส่วนที่เป็นเสียงอิมพัลส์เท่านั้น เราจึงใช้การพิจารณาความยาวสำหรับตัดสัญญาณเพื่อเอาส่วนที่เป็นเสียงสะท้อนออกทั้งหมด ดังนี้



รูปที่ 31 สัญญาณอิมพัลส์ที่ไมโครโฟนตรวจจับได้

เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณที่ทำการตัดมามีเสียงอิมพัลส์เคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนครบทุกตัวเรียบร้อยแล้ว ความยาวการตัดสัญญาณของไมโครโฟนตัวแรกจะขึ้นอยู่กับระยะห่างสูงสุดของคู่อิมพัลส์ของไมโครโฟนตั้งสมการที่ (3.60) จากการจัดเรียงไมโครโฟน 3 ตัว ไมโครโฟน 4 ตัวแบบสมมาตร และไมโครโฟน 4 ตัวแบบอสมมาตร ซึ่งมีระยะห่างของคู่อิมพัลส์สูงสุดอยู่ที่ 0.594 เมตร 0.6 เมตร และ 0.64 เมตร จะได้ความยาวการตัดสัญญาณ เท่ากับ 327 329 และ 352 Sample ตามลำดับ (ที่อุณหภูมิ 30 องศา) โดยการตัดสัญญาณจะเริ่มที่ช่วงเวลาที่สัญญาณอิมพัลส์เข้าสู่ไมโครโฟน

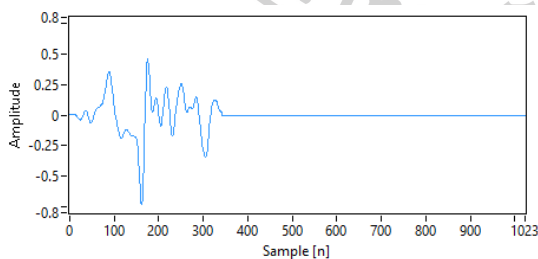
$$L = \frac{S}{V_{sound}} f_s \quad (3.60)$$

โดยที่ S คือ ระยะห่างสูงสุดของคู่อิมพัลส์ [m]

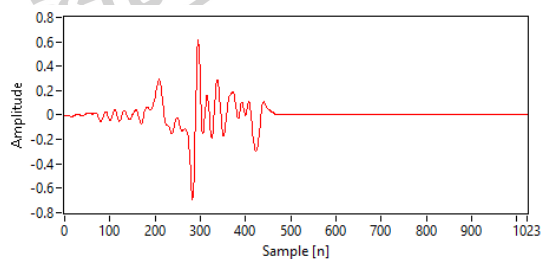
V_{sound} คือ ความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ [m/s]

f_s คือ Sampling rate [Hz]

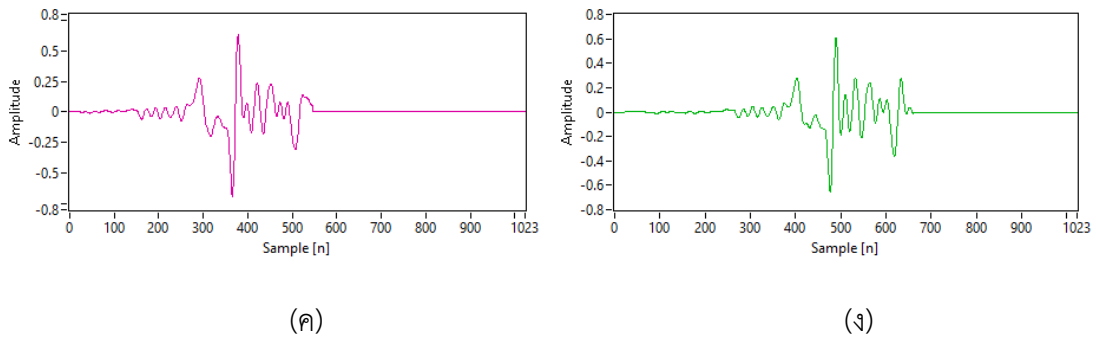
สำหรับไมโครโฟนตัวอื่นๆ ที่สัญญาณอิมพัลส์เข้าหลังจากไมโครโฟนตัวแรก จะทำการตัดสัญญาณให้ยาวกว่าไมโครโฟนตัวแรกเพื่อให้สัญญาณอิมพัลส์ของแต่ละไมโครโฟนมีลักษณะคล้ายกันแล้วจึงทำการเติมศูนย์ (Zero padding) ต่อท้ายสัญญาณอิมพัลส์ของไมโครโฟนแต่ละตัว เพื่อให้สัญญาณเสียงมีความยาวเท่ากันอยู่ที่ 1024 Sample ตัวอย่างสัญญาณที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัวแสดงดังรูปที่ 32



(ก)

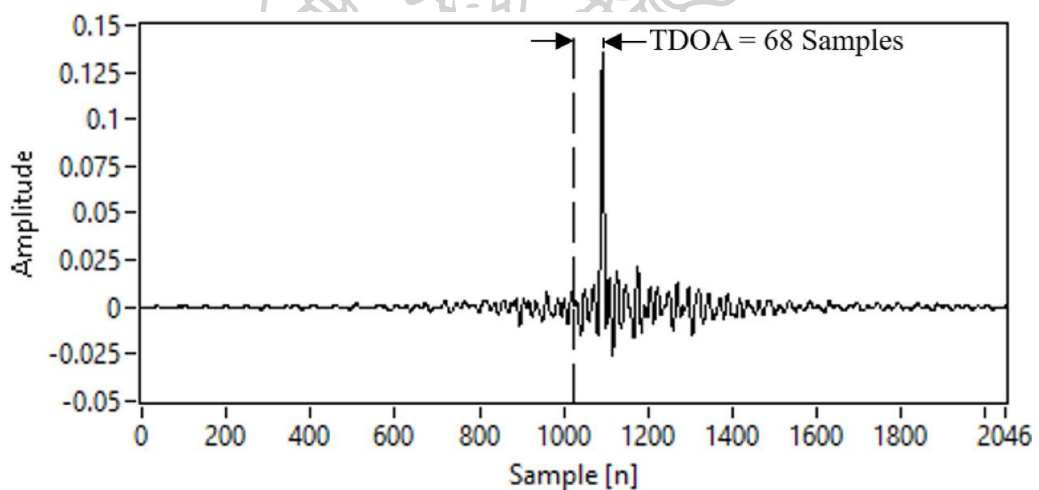


(ข)



รูปที่ 32 สัญญาณอิมพัลส์ที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว (ก) ไมโครโฟนตัวแรก (ข) ไมโครโฟนตัวที่สอง (ค) ไมโครโฟนตัวที่สาม และ (ง) ไมโครโฟนตัวที่สี่

สัญญาณเสียงที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว จะนำมาหาค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ด้วยวิธี GCC-PHAT จากสัญญาณความยาว 1024 Sample จะได้ความยาวข้อมูลของการทำ Cross-correlation เท่ากับ 2047 Sample ($P = L + M - 1$) ดังแสดงในรูปที่ 33



รูปที่ 33 ตัวอย่างค่า TDOA ที่ได้จากรีวิธี GCC-PHAT

ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่สามารถหาได้จากตำแหน่งค่าการหน่วงเวลาที่ทำให้เกิดค่าแอมพลิจูดสูงสุดที่ซึ่ง Delay ไปจากจุดกึ่งกลาง (ตำแหน่งที่ 1023) ดังสมการที่ (3.61) โดยถ้าค่าแอมพลิจูดสูงสุดเกิดขึ้นที่ด้านขวาของจุดกึ่งกลาง หมายถึงสัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวแรกของคู่มิโครโฟนก่อน ในทางกลับกันถ้าค่าแอมพลิจูดสูงสุดเกิดขึ้นที่ด้านซ้ายของจุดกึ่งกลางจะหมายถึงสัญญาณเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่ไมโครโฟนตัวหลังของคู่มิโครโฟนก่อน

$$TDOA \text{ in sample} = \text{Peak index} - 1023 \quad (3.61)$$

จากการรู้ค่า Sampling rate ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณ (192 kHz) จะสามารถแปลงค่า TDOA ในหน่วย Sample ให้อยู่ในหน่วยวินาทีได้ดังสมการที่ (3.62)

$$TDOA \text{ in second} = \frac{TDOA \text{ in sample}}{f_s} \quad (3.62)$$

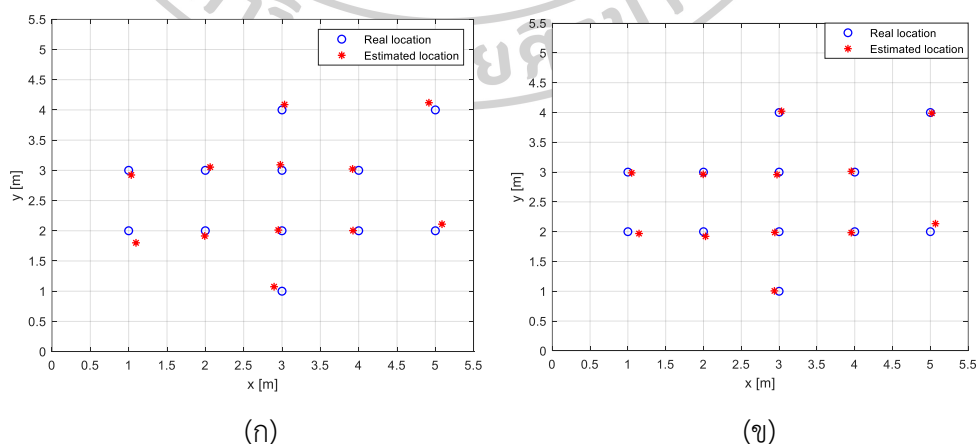
โดย f_s คือ Sampling rate [Hz]

3.6 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

หลังจากหาค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ด้วยวิธี GCC-PHAT เรียบร้อยแล้ว ค่า TDOA ที่ได้จะถูกนำไปใช้เพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข

3.6.1 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1

ผลของการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1 จากการใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินของเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ โดยรูปที่ 34 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นจริง (เครื่องหมายวงกลมสีน้ำเงิน) กับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลอง (เครื่องหมายดอกจันสีแดง)



รูปที่ 34 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการใช้ (ก) วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง (ข) วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดิน

จุดที่	ตำแหน่ง แหล่งกำเนิดเสียงที่ สร้างขึ้น		ตำแหน่งแหล่งกำเนิด เสียงที่ได้จากการทดลอง		เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนเฉลี่ย
	$x [m]$	$y [m]$	$x [m]$	$y [m]$		
	1*	1	2	1.0957	1.8005	5.74%
2*	2	2	1.9923	1.9139	2.33%	
3	1	3	1.0341	2.9233	1.95%	1.53%
4	2	3	2.0632	3.0533	2.20%	
5	3	1	2.8967	1.0740	2.30%	
6	3	2	2.9514	2.0111	0.95%	
7	3	3	2.9780	3.0918	1.18%	
8	3	4	3.0330	4.0885	1.81%	
9	4	2	3.9260	2.0030	1.45%	
10	4	3	3.9204	3.0226	0.99%	
11	5	2	5.0865	2.1096	2.26%	
12	5	4	4.9158	4.1190	0.16%	

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field

จากผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง (ดังแสดงในตารางที่ 1) พบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ของการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ระยะ Far field ได้อย่างแม่นยำ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.16% ถึง 2.30% และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.53% แต่สำหรับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง $x = 1$ เมตร $y = 2$ เมตร และ $x = 2$ เมตร $y = 2$ เมตร ที่อยู่ในระยะ Near field มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 5.74% และ 2.33% ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.04% ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความแม่นยำที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการระบุตำแหน่งที่ระยะ Far field (ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.53%)

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข

จุดที่	ตำแหน่ง แหล่งกำเนิดเสียงที่ สร้างขึ้น		ตำแหน่งแหล่งกำเนิด เสียงที่ได้จากการทดลอง		เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนเฉลี่ย
	$x [m]$	$y [m]$	$x [m]$	$y [m]$		
	1*	1	2	1.1476	1.9688	1.91%
2*	2	2	2.0266	1.9219	1.25%	
3	1	3	1.0501	2.9870	0.12%	
4	2	3	1.9963	2.9618	0.94%	
5	3	1	2.9376	1.0062	1.81%	
6	3	2	2.9433	1.9878	1.49%	
7	3	3	2.9720	2.9573	1.18%	1.01%
8	3	4	3.0317	4.0212	0.72%	
9	4	2	3.9542	1.9835	1.08%	
10	4	3	3.9551	3.0129	0.56%	
11	5	2	5.0675	2.1345	2.11%	
12	5	4	5.0194	3.9878	0.12%	

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field

จากตารางที่ 2 ที่ซึ่งแสดงผลลัพธ์การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งทั้ง 12 ตำแหน่งอยู่ระหว่าง 0.12% ถึง 2.11% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระยะ Near field และ Far field เท่ากับ 1.58% และ 1.01% ตามลำดับ ซึ่งวิธีการนี้สามารถให้ผลได้แม่นยำแม้ว่าแหล่งกำเนิดเสียงจะอยู่ในระยะ Near field เนื่องจากวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขไม่ได้มีการนำสมมติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field เข้ามาใช้

3.6.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้การหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข ร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร แสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองด้วยการใช้วิธีการหาค่าตอบเชิง

ตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตรแสดงดังตารางที่ 5 และรูปที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นกับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร

จุดที่	ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้น		ระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงจากระนาบของไมโครโฟน [m]	ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลอง		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
	x [m]	y [m]		x [m]	y [m]		
1*	-2	-1		-1.8625	-0.9171	7.16%	
2	0	-4		0.0240	-3.8582	3.54%	
3	4	0	0.3	4.1514	0.0251	3.79%	13.17%
4	1	4		1.0726	4.1458	3.86%	
5	3	3		1.5381	1.6104	47.51%	
6*	-1	2		-0.7175	1.2613	35.11%	
7	-4	0		-3.0156	0.0222	24.61%	
8	1	-4	0.6	0.6939	-2.8388	29.12%	36.46%
9	4	1		3.0941	0.8387	22.25%	
10	-3	3		-1.3926	1.3189	71.19%	
11*	2	1		1.1045	0.4830	46.09%	
12	-1	-4		-1.3319	-5.5704	38.91%	
13	-4	1	0.9	-5.4348	1.2644	35.33%	45.68%
14	4	-1		5.3788	-1.3441	34.47%	
15	-3	-3		-0.7830	-0.8019	73.58%	
16*	1	-2		0.3823	-0.8255	59.32%	
17	0	4		0.0415	5.9618	49.05%	
18	-1	4	1.2	-1.4142	5.8899	51.43%	59.85%
19	-4	-1		-5.8169	-1.6106	50.89%	
20	3	-3		0.3272	-0.3577	88.57%	

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field

ตารางที่ 4 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้
วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข และการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร

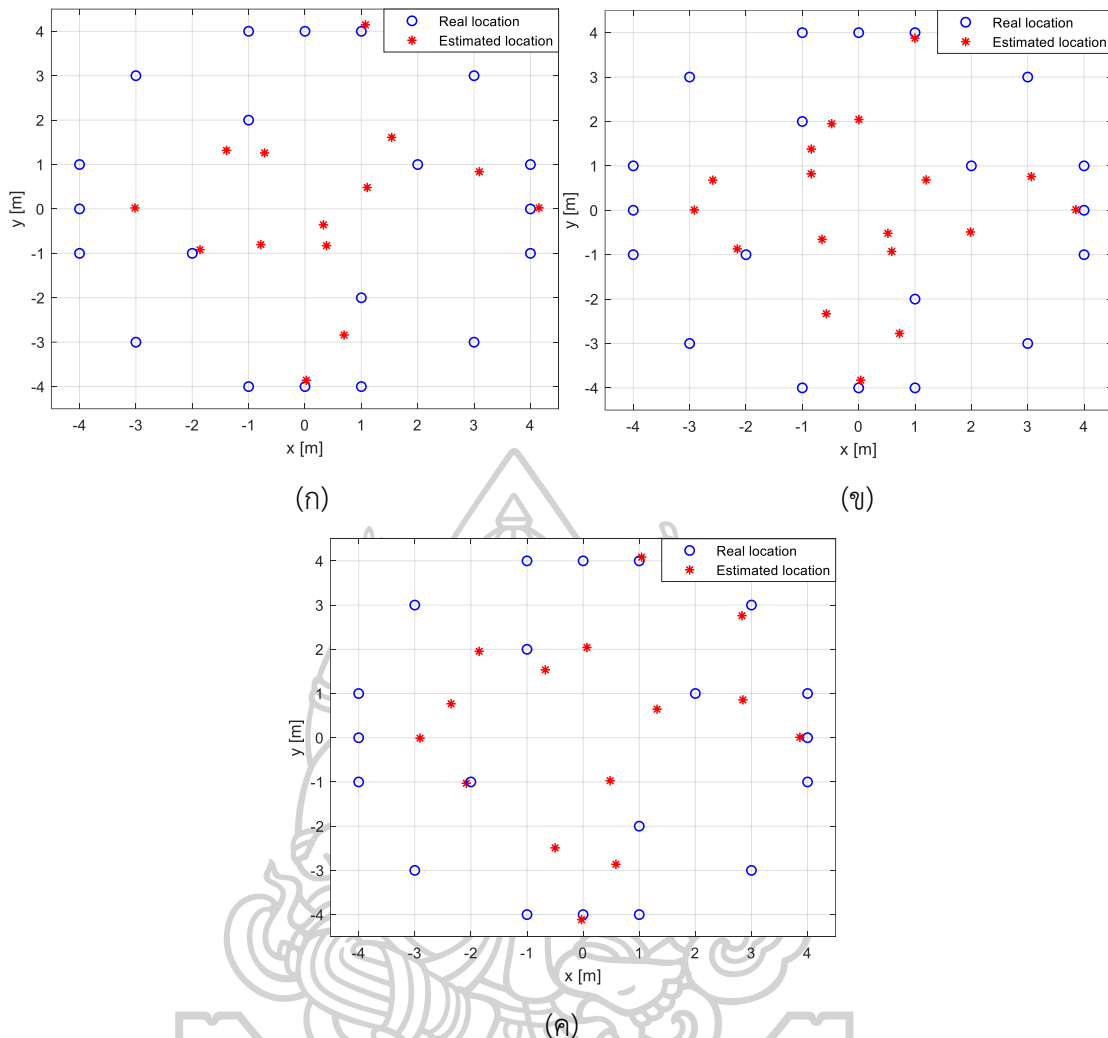
จุดที่	ตำแหน่งแหล่งกำเนิด เสียงที่สร้างขึ้น		ระยะห่างของ แหล่งกำเนิด เสียงจากระนาบ ของไมโครโฟน [m]	ตำแหน่งแหล่งกำเนิด เสียงที่ได้จากการ ทดลอง		เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน เฉลี่ย
	x [m]	y [m]		x [m]	y [m]		
1*	-2	-1		-2.1534	-0.8706	3.88%	
2	0	-4		0.0366	-3.8286	4.28%	
3	4	0	0.3	3.8548	0.0142	3.63%	9.40%
4	1	4		0.9985	3.8760	2.92%	
5	3	3		3.9857	3.9515	32.29%	
6*	-1	2		-0.8405	1.3784	27.80%	
7	-4	0		-2.9166	0.0072	27.09%	
8	1	-4	0.6	0.7266	-2.7743	30.44%	36.21%
9	4	1		3.0639	0.7591	23.44%	
10	-3	3		-0.8420	0.8216	72.27%	
11*	2	1		1.1973	0.6841	38.33%	
12	-1	-4		-0.5743	-2.3296	41.81%	
13	-4	1	0.9	-2.5881	0.6783	35.11%	45.54%
14	4	-1		5.3202	-1.5186	34.19%	
15	-3	-3		-0.6496	-0.6551	78.26%	
16*	1	-2		0.5866	-0.9281	50.90%	
17	0	4		0.0036	2.0435	48.91%	
18	-1	4	1.2	-0.4788	1.9497	51.31%	56.85%
19	-4	-1		1.9836	-0.4886	50.45%	
20	3	-3		0.5191	-0.5191	82.70%	

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field

ตารางที่ 5 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์โดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของ และการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร

จุดที่	ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้น		ระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงจากกระดานของไมโครโฟน [m]	ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลอง		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
	x [m]	y [m]		x [m]	y [m]		
1*	-2	-1		-2.0814	-1.0299	3.86%	
2	0	-4		-0.0279	-4.1139	2.85%	
3	4	0	0.3	3.8628	0.0103	3.43%	3.83%
4	1	4		1.0434	4.0831	2.21%	
5	3	3		2.8320	2.7603	6.79%	
6*	-1	2		-0.6737	1.5358	25.00%	
7	-4	0		-2.9058	-0.0091	27.35%	
8	1	-4	0.6	0.5840	-2.8621	26.97%	28.30%
9	4	1		2.8478	0.8566	25.65%	
10	-3	3		-1.8526	1.9538	36.54%	
11*	2	1		1.3179	0.6452	34.38%	
12	-1	-4		-0.4996	-2.4912	38.38%	
13	-4	1	0.9	-2.3524	0.7684	39.98%	40.35%
14	4	-1		5.5695	-1.3729	39.12%	
15	-3	-3		-4.4541	-4.5400	49.91%	
16*	1	-2		0.4812	-0.9712	51.53%	
17	0	4		0.0680	2.0413	48.94%	
18	-1	4	1.2	-2.4558	5.7706	52.10%	53.04%
19	-4	-1		-5.5955	-2.6309	49.96%	
20	3	-3		4.7810	-4.8004	59.69%	

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field



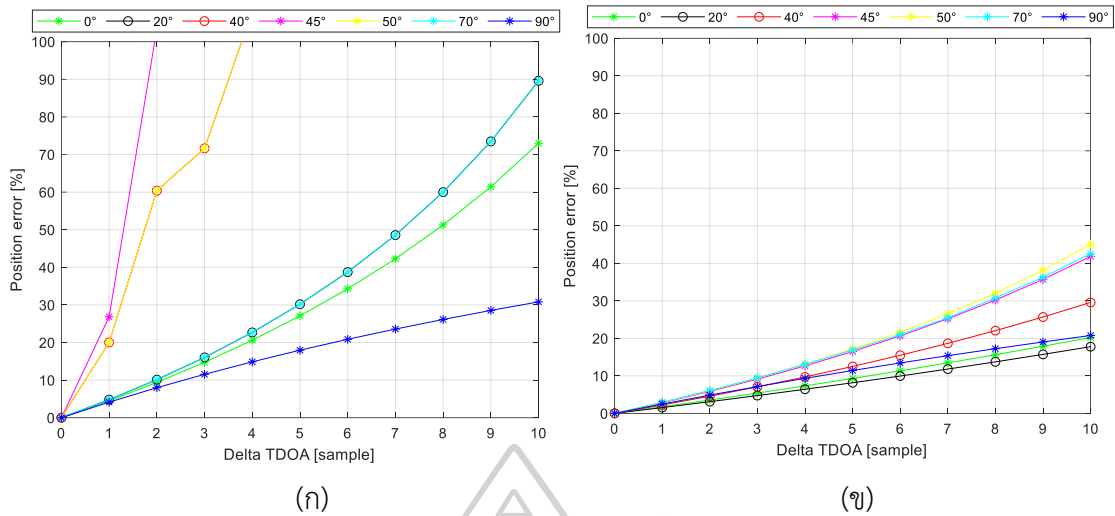
รูปที่ 35 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลองโดยใช้ (ก) วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียงร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร (ข) วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร และ (ค) วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร

จากตารางที่ 3 ที่แสดงผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งด้วยวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียงร่วมกับการใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร พบว่าเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ห่างจากระนาบของไมโครโฟน การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงตามระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงจากระนาบของไมโครโฟนเท่ากับ 0.3 เมตร 0.6 เมตร 0.9 เมตร และ 1.2 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งอยู่ที่ 13.17% 36.46% 45.68% และ 59.85% ตามลำดับ อีกทั้งหากพิจารณาแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ห่างจากระนาบไมโครโฟน 0.3 เมตร ตำแหน่ง $x = 3$ เมตร $y = 3$ เมตร ซึ่งอยู่ที่ทิศทาง 45 องศาจาก

จุดกำเนิด หรือแนวกึ่งกลางของแต่ละควอดแดรนต์ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งเท่ากับ 47.51% ซึ่งให้ผลที่คลาดเคลื่อนสูงเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ ที่ระยะห่างเดียวกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 3.54% ถึง 7.16%

สำหรับผลลัพธ์การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร ดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าการระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ห่างจากระนาบของไมโครโฟนเช่นเดียวกันกับวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง โดยที่ระยะห่างเท่ากับ 0.3 เมตร 0.6 เมตร 0.9 เมตร และ 1.2 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 9.40% 36.21% 45.54% และ 56.85% ตามลำดับ และที่ตำแหน่ง $x = 3$ เมตร $y = 3$ เมตร (แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ที่ทิศทาง 45 องศาจากจุดกำเนิด หรือแนวกึ่งกลางของแต่ละควอดแดรนต์) มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งเท่ากับ 32.29% ในขณะที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงอื่นที่มีระยะห่างจากระนาบไมโครโฟนเท่ากันมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 2.92% ถึง 4.28%

หากพิจารณาการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วยวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขที่ใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร (ดังตารางที่ 5) จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง $x = 3$ เมตร $y = 3$ เมตร และอยู่ห่างจากระนาบของไมโครโฟน 0.3 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.79% ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่ามากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร (มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 47.51% และ 32.29% จากการใช้วิธีจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข ตามลำดับ) อันเนื่องมาจากผลกระทบของค่า TDOA ที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 ค่าความคลาดเคลื่อนของ TDOA ที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง (ก) เมื่อใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร (ข) เมื่อใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร

จากรูปที่ 36 (ก) ที่ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของ TDOA ที่ส่งผลต่อการระบุตำแหน่งเมื่อใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร จะเห็นได้ว่าค่า TDOA ที่มีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น 2 Sample ส่งผลให้การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทาง 45 องศาจากจุดกำเนิด (แนวกึ่งกลางแต่ละควอดแดรนต์) มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากกว่า 100% (เส้นสีม่วง) สำหรับในทิศทาง 40 และ 50 องศา (เส้นสีเหลือง และเส้นสีแดง) ความคลาดเคลื่อนของค่า TDOA จะส่งผลมากต่อเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งเช่นเดียวกับที่ทิศทาง 45 องศา ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากกว่า 100% ที่ค่า TDOA คลาดเคลื่อนไป 4 Sample ในขณะที่ทิศทางอื่นๆ จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่อค่า TDOA ที่มีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยกว่าทิศทางที่เข้าใกล้ 45 องศา โดยที่ค่า TDOA คลาดเคลื่อนไป 4 Sample จะส่งผลให้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงผิดพลาดไปไม่เกิน 30%

ในกรณีที่ใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร (ดังรูปที่ 36 (ข)) การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทางเท่ากับ หรือเข้าใกล้ 45 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่อการคลาดเคลื่อนของค่า TDOA ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดวางไมโครโฟนแบบสมมาตร โดยหากสังเกตที่ค่า TDOA คลาดเคลื่อน 2 Sample จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน 10% อีกทั้งยังส่งผลให้ทิศทางอื่นๆ มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดน้อยลงเช่นกัน โดยที่ค่า TDOA คลาดเคลื่อน 4 Sample จะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่ง

แหล่งกำเนิดเสียงไม่เกิน 20% อันเป็นผลมาจากการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตรจะทำให้ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆ ที่ทิศทาง 45 องศาจากจุดกำเนิดมีค่าแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสามารถให้ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงได้แม้ว่าค่า TDOA ที่ได้จากการทดลองจะมีการคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย

จากผลการทดลองที่ผ่านมา และปัญหาที่พบเจอในการศึกษาการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิสัย 2 เมตร จึงมีแนวคิดว่าหากนำวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขที่ให้ผลได้แม่นยำสำหรับแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระยะทั้ง Near field และ Far field มาใช้ร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตรซึ่งทำให้ค่า TDOA ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทาง 45 องศา มีค่าแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น จะสามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิสัย 3 เมตรได้อย่างแม่นยำครอบคลุมทุกควอดแดรนต์



บทที่ 4

การออกแบบและทดลองวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติให้ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ ซึ่งเป็นการใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขร่วมกับการจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตร และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการใหม่จึงนำวิธีหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียงมาพัฒนาให้สามารถระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติได้ การดำเนินงานประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดโปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การวางตำแหน่งไมโครโฟนสำหรับพิกัด 3 มิติ การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียง การออกแบบการทดลอง และผลการทดลอง

4.1 การกำหนดโปรแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1.1 โปรแกรม MATLAB สำหรับการพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

4.1.1.2 โปรแกรม LabView สำหรับการตรวจจับสัญญาณเสียง ประมวลผล และทดสอบวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้น

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

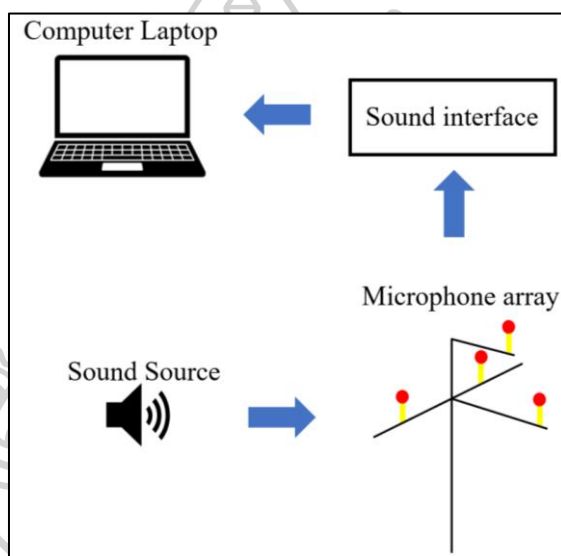
4.1.2.1 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊คยี่ห้อ ASUS รุ่น GL552VW intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60 GHz up to 3.50 GHz หน่วยความจำ 8 GB ระบบปฏิบัติการ Window 10

4.1.2.2 ไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ยี่ห้อ Audio-Technica ที่มีการตอบสนองความถี่ (Frequency response) ที่ 50 – 18,000 Hz จำนวน 4 ตัว

4.1.2.3 Sound interface ยี่ห้อ Behringer รุ่น UMC404HD ซึ่งมีอัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling rate) 192 kHz และมี 4 ช่องอินพุต

4.1.3 ภาพรวมของระบบ

ระบบการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 37 โดยประกอบด้วย คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป Sound interface และไมโครโฟนอะเรย์ การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง เริ่มจากใช้คอมพิวเตอร์แล็ปท็อปที่มีโปรแกรม LabView ความคุมไมโครโฟนสำหรับตรวจจับและ บันทึกสัญญาณเสียงของแหล่งกำเนิดผ่านทาง Sound interface ซึ่งใช้ระยะเวลาในการบันทึก 2 วินาที โดยที่ Sound interface จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล และส่งข้อมูล กลับไปยังคอมพิวเตอร์แล็ปท็อปเพื่อทำการประมวลสัญญาณ และคำนวณหาตำแหน่งแหล่งกำเนิด เสียงโดยใช้โปรแกรม LabView

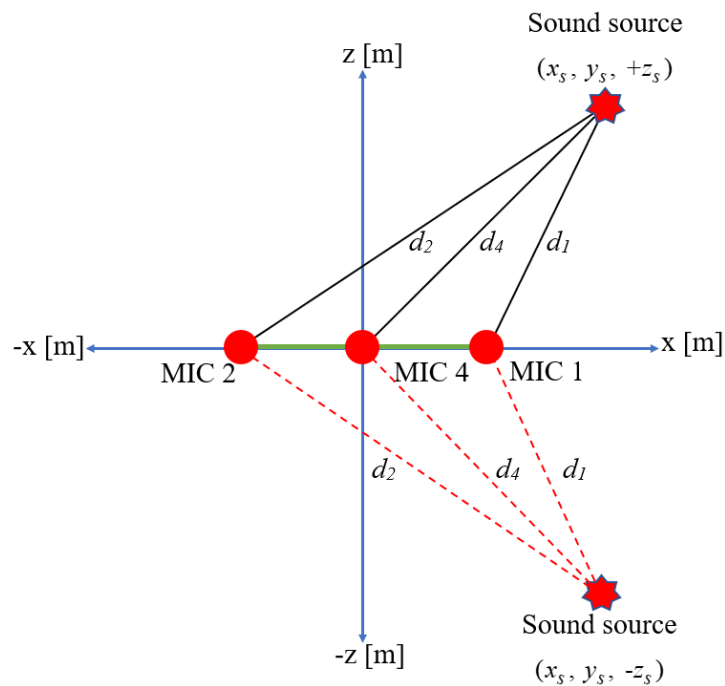


รูปที่ 37 ภาพรวมของระบบการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

4.2 การวางตำแหน่งไมโครโฟนสำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

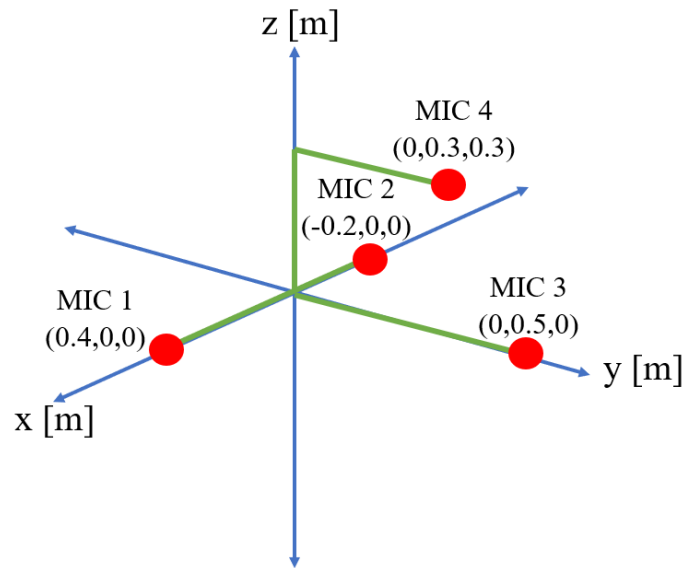
สำหรับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ การวางไมโครโฟนทั้งหมดในระนาบ เดียวกันจะไม่สามารถบอกตำแหน่งใน 3 มิติได้ พิจารณาการจัดวางไมโครโฟนจำนวน 4 ตัว โดย ทั้งหมดอยู่ในระนาบ $x-y$ เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในทิศทาง $+x$ และ $+y$ ที่มีเส้นทางการ เคลื่อนที่ทางตรงของเสียงจากแหล่งกำเนิดไปยังไมโครโฟนแสดงได้ดังรูปที่ 38 จะเห็นได้ว่าหากมี แหล่งกำเนิดเสียง 2 แหล่งที่ตำแหน่ง x_s และ y_s เท่ากัน และห่างจากระนาบ $x-y$ เท่ากัน โดย แหล่งกำเนิดเสียงแรกอยู่ที่ $+z$ (แหล่งกำเนิดเสียงอยู่เหนือระนาบ $x-y$) และแหล่งกำเนิดเสียงที่ 2 อยู่ที่ $-z$ (แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ต่ำกว่าระนาบ $x-y$) ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงทั้ง 2 ถึง

ไมโครโฟนแต่ละตัวจะเท่ากัน เป็นผลให้ค่า TDOA ของแหล่งกำเนิดเสียงที่มาจากด้านบนจะซ้ำกับค่า TDOA ของแหล่งกำเนิดเสียงที่มาจากด้านล่าง ทำให้ทราบได้เฉพาะระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงจากระนาบ $x-y$ โดยที่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นมาจากด้านบน หรือ ด้านล่าง



รูปที่ 38 เส้นทางการเคลื่อนที่ของเสียงจากแหล่งกำเนิดไปยังไมโครโฟนอะเรย์ (มุมมองด้านข้าง)

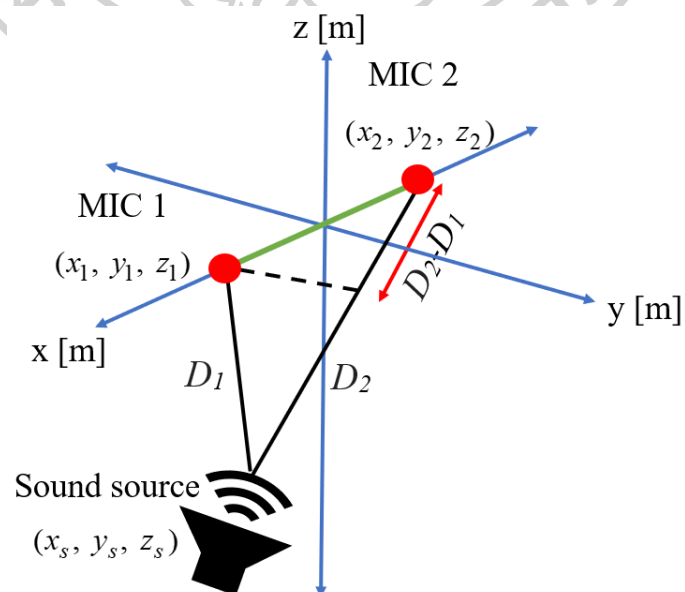
การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติให้ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์จำเป็นต้องใช้ไมโครโฟนอย่างน้อยจำนวน 4 ตัว โดยทั้งหมดต้องไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน ผู้วิจัยได้กำหนดให้ไมโครโฟน 1 ใน 4 ตัวอยู่ในตำแหน่งเหนือระนาบ $x-y$ และเพื่อให้ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทาง 45 องศา มีค่าแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น จึงเลือกใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 39 ในที่นี้กำหนดให้ไมโครโฟนตัวที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0.4$ เมตร $y = 0$ เมตร $z = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = -0.2$ เมตร $y = 0$ เมตร $z = 0$ เมตร ไมโครโฟนตัวที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร $y = 0.5$ เมตร $z = 0$ เมตร และไมโครโฟนตัวที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เมตร $y = 0.3$ เมตร $z = 0.3$ เมตร ค่า TDOA ของคู่ไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ตัวที่ 2 กับ 4 และตัวที่ 4 กับ 1 สำหรับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ $+z$ และ $-z$ จะมีค่าแตกต่างกัน ทำให้การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติกระทำได้อย่างครอบคลุมทุกพื้นที่



รูปที่ 39 การจัดเรียงไมโครโฟน 4 ตัวแบบอสมมาตรสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 3 มิติ

4.3 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance

การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance ในหัวข้อที่ 3.4 จะสามารถนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในกรณีที่แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้ อยู่ระนาบเดียวกันกับไมโครโฟน (แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในพิกัด 3 มิติ) ได้โดยพิจารณาการหาระยะห่าง ระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนแต่ละตัวในพิกัด 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนในพิกัด 3 มิติ

จากสมการ Euclidean distance จะสามารถหาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนตัวที่ 1 ในพิกัด 3 มิติ (D_1) ได้ดังสมการที่ (4.1) และหาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับไมโครโฟนตัวที่ 2 ในพิกัด 3 มิติ (D_2) ได้จากสมการที่ (4.2)

$$D_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} \quad (4.1)$$

$$D_2 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2} \quad (4.2)$$

โดยที่ x_s , y_s และ z_s คือ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

x_1 , y_1 และ z_1 คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ 1

x_2 , y_2 และ z_2 คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ 2

ความต่างของระยะทางที่เสียงเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว แสดงได้ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4)

$$D_2 - D_1 = V_{sound} \tau_{12} \quad (4.3)$$

$$\sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2} - \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} = V_{sound} \tau_{12} \quad (4.4)$$

นำสมการที่ (4.4) มาขยายข้างจะได้เป็นสมการที่ (4.5) และการรู้ค่าความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ ตำแหน่งการวางไมโครโฟน จะทำให้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงขึ้นอยู่กับค่า TDOA โดยตรง ซึ่งตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ คือค่า x_s , y_s และ z_s ใดๆ ที่ทำให้สมการที่ (4.5) มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2} - \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2} - V_{sound} \tau_{12} = 0 \quad (4.5)$$

ด้วยการใช้ไมโครโฟน 4 ตัวจะสามารถจับคู่ไมโครโฟนได้ทั้งหมด 6 คู่ สมการความต่างของระยะทางที่เสียงมาถึงของไมโครโฟนแต่ละคู่จะถูกรวมเข้าด้วยกัน และเขียนได้ดังสมการที่ (4.6) โดยที่

คำตอบของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นไปได้ (x_s , y_s และ z_s) จะขึ้นอยู่กับค่า TDOA ทั้ง 6 ค่าของไมโครโฟนแต่ละคู่

$$\sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \left(\sqrt{(x_s - x_n)^2 + (y_s - y_n)^2 + (z_s - z_n)^2} - \sqrt{(x_s - x_m)^2 + (y_s - y_m)^2 + (z_s - z_m)^2} - V_{sound} \tau_{mn} \right) = 0 \quad (4.6)$$

โดยที่ x_m , y_m และ z_m คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ m

x_n , y_n และ z_n คือ ตำแหน่งของไมโครโฟนตัวที่ n

N คือ จำนวนไมโครโฟน

ผู้วิจัยนำสมการที่ (4.6) มาสร้างเป็น Objective function ดังสมการที่ (4.7) เพื่อหาค่า x_s , y_s และ z_s ที่ทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นคำตอบของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติ โดยสามารถหาค่า x_s , y_s และ z_s ที่เหมาะสมที่สุดได้จากการใช้ Interior point method

$$\min_S \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n=m+1}^N \text{abs}(\|S - M_n\|_2 - \|S - M_m\|_2 - V_{sound} \tau_{mn}) \quad (4.7)$$

subject to $S_{lo} \leq S \leq S_{up}$

โดย S คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง ($S = (x_s, y_s, z_s)$)

M_m คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งไมโครโฟนตัวที่ m ($M_m = (x_m, y_m, z_m)$)

M_n คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งไมโครโฟนตัวที่ n ($M_n = (x_n, y_n, z_n)$)

S_{lo} คือ ขอบเขตล่าง (Lower boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

S_{up} คือ ขอบเขตบน (Upper boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

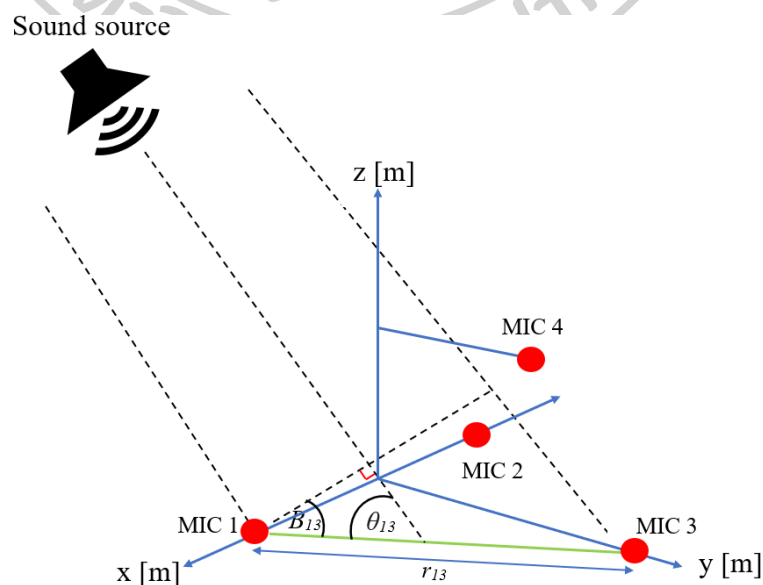
4.4 การระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 3 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง

วิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้การหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงจะถูกนำมาพัฒนาสำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 3 มิติ เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความแม่นยำของวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การหาค่ามุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง

จากในหัวข้อที่ 3.3 ที่ซึ่งเป็นการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภัก 2 มิติโดยใช้วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง จะสามารถหามุมที่แหล่งกำเนิดเสียงกระทำกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟนได้ด้วยการสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field ค่ามุมตกกระทบในพิภัก 3 มิติ จะทำให้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เป็นไปได้เกิดเป็นมุมกวาดรอบแกนของคู่มือไมโครโฟน และสามารถนำไปสร้างเป็นพื้นผิวทรงกรวยตามแกนของคู่มือไมโครโฟนต่างๆ ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการที่พื้นผิวทรงกรวยที่สร้างขึ้นมีการซ้อนทับ หรืออยู่ใกล้กันมากเกินไปซึ่งจะทำให้จุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยมีได้หลายจุด จึงเลือกใช้คู่มือไมโครโฟน 3 คู่จากจำนวน 6 คู่ (สำหรับการวางไมโครโฟนแบบอสมมาตรดังรูปที่ 39 คู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 และ ตัวที่ 4 กับ 3 เป็นคู่มือไมโครโฟนที่ต้องเลือกใช้) ค่ามุมตกกระทบของคู่มือไมโครโฟนทั้ง 3 คู่ สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

4.4.1.1 กรณีคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 (ดังรูปที่ 41) จะสามารถหาค่ามุม B_{13} ได้จากสมการที่ (4.8)



รูปที่ 41 การหามุมตกกระทบของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียงสำหรับคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3

$$B_{13} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{sound} \tau_{13}}{r_{13}} \right)^2} \right) \quad (4.8)$$

โดยที่ V_{sound} คือ ความเร็วเสียงในตัวกลางอากาศ [m/s]

τ คือ ค่าความต่างเวลาที่เสียงมาถึงของไมโครโฟนแต่ละคู่ [s]

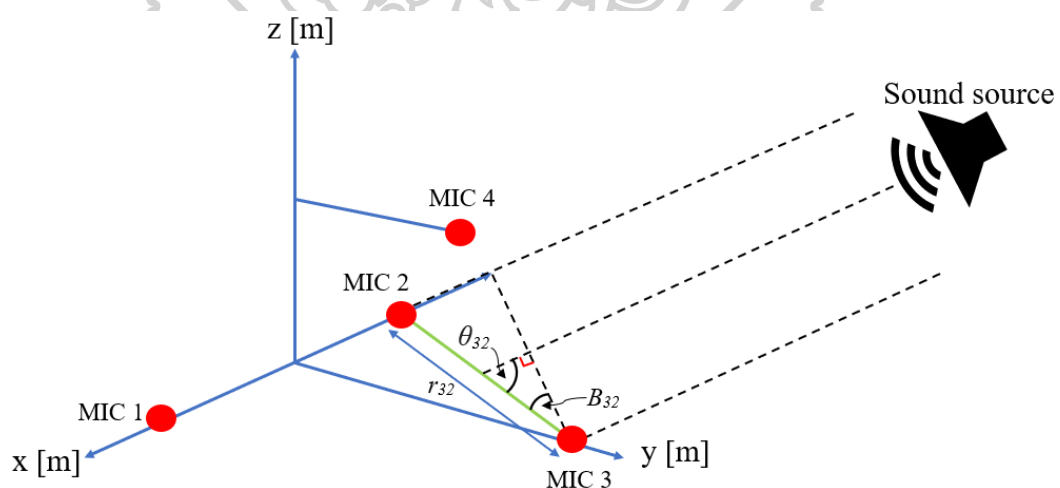
r คือ ระยะห่างระหว่างไมโครโฟน [m]

ค่ามุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มิโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 (θ_{13}) สามารถคำนวณได้โดยขึ้นอยู่กับค่า TDOA ของคู่มิโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 (τ_{13}) ถ้า τ_{13} มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับศูนย์ (คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไมโครโฟนตัวที่ 1 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 3) ค่า θ_{13} จะเท่ากับสมการที่ (4.9) ในทางตรงกันข้ามถ้า τ_{13} มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไมโครโฟนตัวที่ 3 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 1) ค่า θ_{13} จะเท่ากับสมการที่ (4.10)

$$\theta_{13} = 90^\circ - B_{13}, \text{ สำหรับ } \tau_{13} > 0 \quad (4.9)$$

$$\theta_{13} = 90^\circ + B_{13}, \text{ สำหรับ } \tau_{13} < 0 \quad (4.10)$$

4.4.1.2 กรณีคู่มิโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 (ดังรูปที่ 42) จะสามารถหาค่ามุม B_{32} ได้จากสมการที่ (4.11)



รูปที่ 42 การหามุมตกกระทบของเส้นเดินทางเสียงสำหรับคู่มิโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2

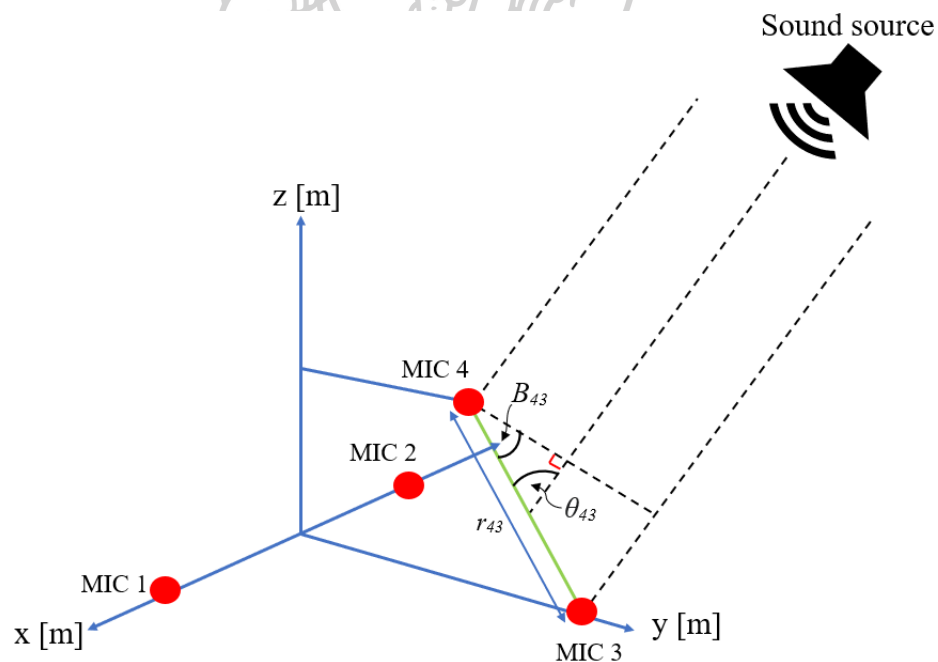
$$B_{32} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{\text{sound}} \tau_{32}}{r_{32}} \right)^2} \right) \quad (4.11)$$

ค่ามุม θ_{32} สามารถหาได้โดยขึ้นอยู่กับค่า TDOA ของคู่มicrophone ตัวที่ 3 กับ 2 (τ_{32}) ถ้า τ_{32} มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับศูนย์ (คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไมโครโฟนตัวที่ 3 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 2) ค่า θ_{32} จะเท่ากับสมการที่ (4.12) ในทางตรงกันข้ามถ้า τ_{32} มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไมโครโฟนตัวที่ 2 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 3) ค่า θ_{32} จะเท่ากับสมการที่ (4.13)

$$\theta_{32} = 90^\circ - B_{32} \text{ , สำหรับ } \tau_{32} > 0 \quad (4.12)$$

$$\theta_{32} = 90^\circ + B_{32} \text{ , สำหรับ } \tau_{32} < 0 \quad (4.13)$$

4.4.1.3 กรณีคู่มicrophone ตัวที่ 4 กับ 3 (ดังรูปที่ 43) จะสามารถหาค่ามุม B_{43} ได้ จากสมการที่ (4.14)



รูปที่ 43 การหามุมตกกระทบของเส้นทางเดินเสียงสำหรับคู่มicrophone ตัวที่ 4 กับ 3

$$B_{43} = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{V_{\text{sound}} \tau_{43}}{r_{43}} \right)^2} \right) \quad (4.14)$$

ค่ามุม θ_{43} สามารถหาได้โดยขึ้นอยู่กับค่า τ_{43} ถ้า τ_{43} มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับศูนย์ (คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไมโครโฟนตัวที่ 4 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 3) ค่า θ_{43} จะเท่ากับสมการที่ (4.15) ในทางตรงกันข้ามถ้า τ_{43} มีค่าน้อยกว่าศูนย์ (คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไมโครโฟนตัวที่ 3 ก่อนไมโครโฟนตัวที่ 4) ค่า θ_{43} จะเท่ากับสมการที่ (4.16)

$$\theta_{43} = 90^\circ - B_{43} , \text{ สำหรับ } \tau_{43} > 0 \quad (4.15)$$

$$\theta_{43} = 90^\circ + B_{43} , \text{ สำหรับ } \tau_{43} < 0 \quad (4.16)$$

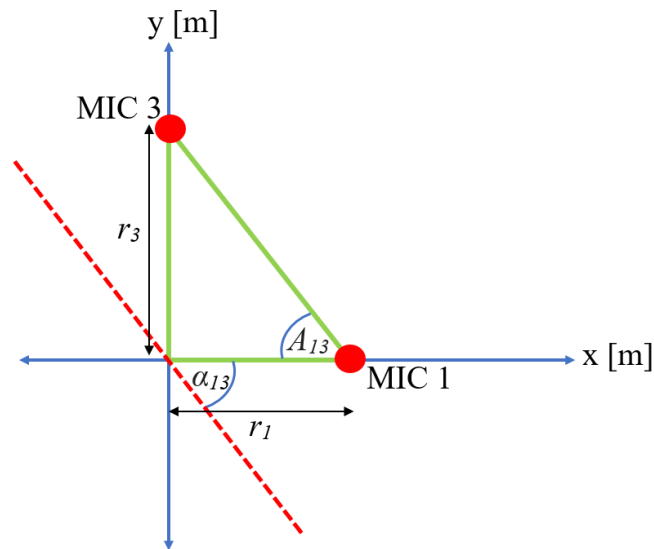
4.4.2 การสร้างพื้นผิวทรงกรวยจากค่ามุมตกกระทบของเส้นทางเดินเสียง

มุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับแนวแกนของไมโครโฟนที่คำนวณได้จะถูกนำมาใช้เป็นมุมยก (θ) สำหรับสร้างพื้นผิวทรงกรวย อย่างไรก็ตามแนวแกนของไมโครโฟนทั้ง 3 คู่ (ไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 4 กับ 3) จะไม่ได้อยู่บนแกน x , y และ z ผู้วิจัยจึงนำเมทริกซ์การหมุนมาใช้เลื่อนพื้นผิวทรงกรวยให้อยู่บนแนวแกนของไมโครโฟนแต่ละคู่ได้อย่างถูกต้อง ดังต่อไปนี้

4.4.2.1 สำหรับไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 จะเลือกใช้พื้นผิวทรงกรวยบนแกน x และนำเมทริกซ์การหมุนมาใช้สำหรับหมุนแกน z เป็นมุม α_{13} แสดงดังสมการที่ (4.17)

$$\begin{bmatrix} x_{13} \\ y_{13} \\ z_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{13}) & -\sin(\alpha_{13}) & 0 \\ \sin(\alpha_{13}) & \cos(\alpha_{13}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \cos \theta_{13} \\ r \sin \theta_{13} \cos \varphi \\ r \sin \theta_{13} \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

ค่ามุม α_{13} ของเมทริกซ์การหมุนสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาตำแหน่งการวางไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 บนระนาบ $x-y$ ดังรูปที่ 44 โดยที่เส้นประสีแดงแสดงถึงการหมุนพื้นผิวทรงกรวยให้อยู่แนวแกนกับแกนของไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 เป็นมุม α_{13} เทียบจากแกน $+x$ จากกฎของตรีโกณมิติค่ามุม A_{13} สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.18) เนื่องจาก A_{13} เป็นมุมแย้งของ α_{13} ดังนั้นมุม α_{13} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน z จึงมีค่าเท่ากับ A_{13} และด้วยการหมุนแกน z ไปในแนวตามเข็มนาฬิกาเพื่อเลื่อนพื้นผิวทรงกรวยบนแกน x ให้อยู่แนวเดียวกับแกนของไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 จะได้ค่ามุม α_{13} เท่ากับ -51.34 องศา



รูปที่ 44 การหาค่ามุม α_{13} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน z ของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3

$$A_{13} = \tan^{-1} \left(\frac{r_3}{r_1} \right) \quad (4.18)$$

ทำการเลื่อนจุดยอดของพื้นผิวทรงกรวยจากจุดกำเนิด ($x = 0$ เมตร $y = 0$ เมตร และ $z = 0$ เมตร) ไปยังจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ($x = 0.2$ เมตร $y = 0.25$ เมตร และ $z = 0$ เมตร) ได้ดังสมการที่ (4.19)

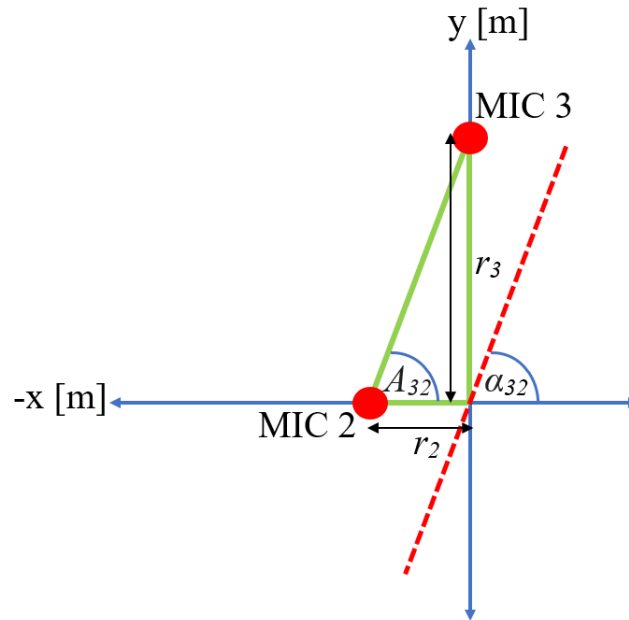
$$\begin{bmatrix} x'_{13} \\ y'_{13} \\ z'_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{13} \\ y_{13} \\ z_{13} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

4.4.2.2 สำหรับคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 จะเลือกใช้พื้นผิวทรงกรวยบนแกน y และนำเมทริกซ์การหมุนมาใช้สำหรับหมุนแกน z เป็นมุม α_{32} ดังสมการที่ (4.20)

$$\begin{bmatrix} x_{32} \\ y_{32} \\ z_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{32}) & -\sin(\alpha_{32}) & 0 \\ \sin(\alpha_{32}) & \cos(\alpha_{32}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \sin \theta_{32} \sin \varphi \\ r \cos \theta_{32} \\ r \sin \theta_{32} \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

ค่ามุม α_{32} ของเมทริกซ์การหมุนคำนวณได้โดยพิจารณาตำแหน่งการวางไมโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 บนระนาบ $x-y$ ดังรูปที่ 45 เส้นประสีแดงแสดงถึงการหมุนพื้นผิวทรงกรวยให้อยู่แนวขนานกับแกนของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 เป็นมุม α_{32} เทียบจากแกน $+x$ จากกฎตรีโกณมิติสามารถหา

ค่ามุม A_{32} ได้ตั้งสมการที่ (4.21) และด้วยการหมุนแกน z ในแนวทวนเข็มนาฬิกาจะได้ค่ามุม α_{32} เท่ากับ 21.8 องศา



รูปที่ 45 การหาค่ามุม α_{32} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน z ของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2

$$A_{32} = \tan^{-1} \left(\frac{r_3}{r_2} \right) \quad (4.21)$$

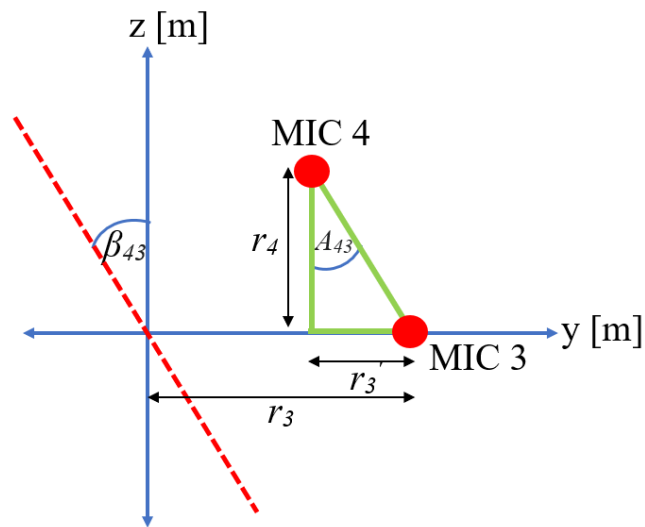
ทำการเลื่อนจุดกำเนิดของพื้นผิวทรงกรวยไปยังจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 3 กับ 2 ได้ตั้งสมการที่ (4.22)

$$\begin{bmatrix} x'_{32} \\ y'_{32} \\ z'_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{32} \\ y_{32} \\ z_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (-0.1) \\ 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

4.4.2.3 สำหรับคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 จะเลือกใช้พื้นผิวทรงกรวยบนแกน z และนำเมทริกซ์การหมุนมาใช้สำหรับหมุนแกน x เป็นมุม β_{43} ตั้งสมการที่ (4.23)

$$\begin{bmatrix} x_{43} \\ y_{43} \\ z_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_{43}) & -\sin(\beta_{43}) \\ 0 & \sin(\beta_{43}) & \cos(\beta_{43}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \sin \theta_{43} \cos \varphi \\ r \sin \theta_{43} \sin \varphi \\ r \cos \theta_{43} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

ค่ามุม β_{43} ของเมทริกซ์การหมุนคำนวณได้โดยพิจารณาตำแหน่งการวางไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 บนระนาบ $y-z$ ดังรูปที่ 46 เส้นประสีแดงแสดงถึงการหมุนพื้นผิวทรงกรวยบนแกน z ให้อยู่แนวขนานกับแกนของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 เป็นมุม β_{43} เทียบจากแกน $+z$ จากกฎตรีโกณมิติสามารถหาค่ามุม A_{43} ได้ดังสมการที่ (4.24) และเนื่องจากการหมุนแกน x ไปในแนวทวนเข็มนาฬิกาจะได้ค่ามุม β_{43} เท่ากับ 33.69 องศา



รูปที่ 46 การหาค่ามุม β_{43} สำหรับเมทริกซ์การหมุนแกน x ของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3

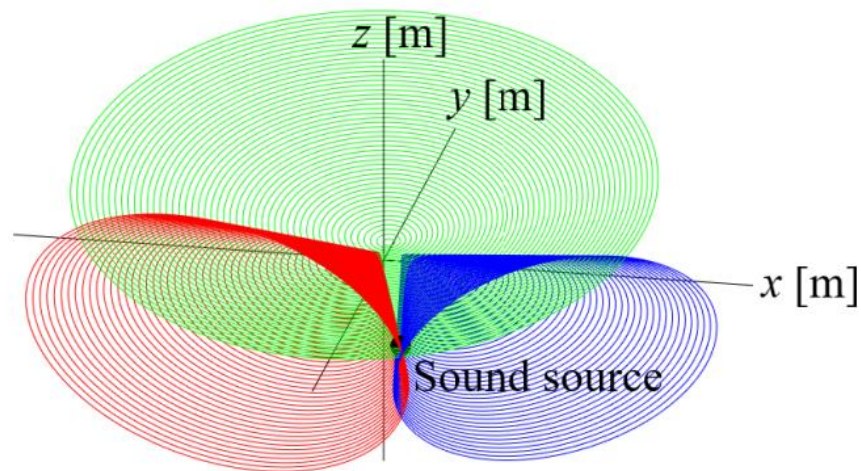
$$A_{43} = \tan^{-1} \left(\frac{r_3}{r_4} \right) \quad (4.24)$$

ทำการเลื่อนจุดกำเนิดของพื้นผิวทรงกรวยไปยังจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 4 กับ 3 ได้ดังสมการที่ (4.25)

$$\begin{bmatrix} x'_{43} \\ y'_{43} \\ z'_{43} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{43} \\ y_{43} \\ z_{43} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \\ 0.15 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

4.4.3 การหาจุดตัดของพื้นผิวทรงกรวย

ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นในพิกัด 3 มิติสามารถหาได้จากจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 ที่สร้างมาจากค่ามุมตกกระทบของเส้นทางเดินเสียงที่กระทำกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่มือไมโครโฟน ดังรูปที่ 47 โดยที่สีน้ำเงิน สีแดง และสีเขียว แสดงพื้นผิวทรงกรวยของคู่มือไมโครโฟน ตัวที่ 1 กับ 3 ตัวที่ 3 กับ 2 และตัวที่ 4 กับ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 47 จุดตัดของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวย

เพื่อหาจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 จึงสร้าง Objective function ดังสมการที่ (4.26) โดยที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นตำแหน่ง x_T, y_T และ z_T ที่เมื่อนำไปลบกับจุดใดๆ บนพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวย (x_k, y_k และ z_k) แล้วทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถหาได้โดยใช้ Interior point method

$$\min \sum_{k=1}^3 (x_T - x_k)^2 + (y_T - y_k)^2 + (z_T - z_k)^2, \quad r, \theta, \phi \in x_k, y_k, z_k \quad (4.26)$$

$$\text{subject to } S_{lo} \leq x_T, y_T, z_T \leq S_{up}$$

$$0 \leq r \leq R_{up}$$

$$0 \leq \phi \leq 2\pi$$

โดยที่ x_k, y_k และ z_k คือ จุดใดๆ บนพื้นผิวทรงกรวย

S_{lo} คือ ขอบเขตล่าง (Lower boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

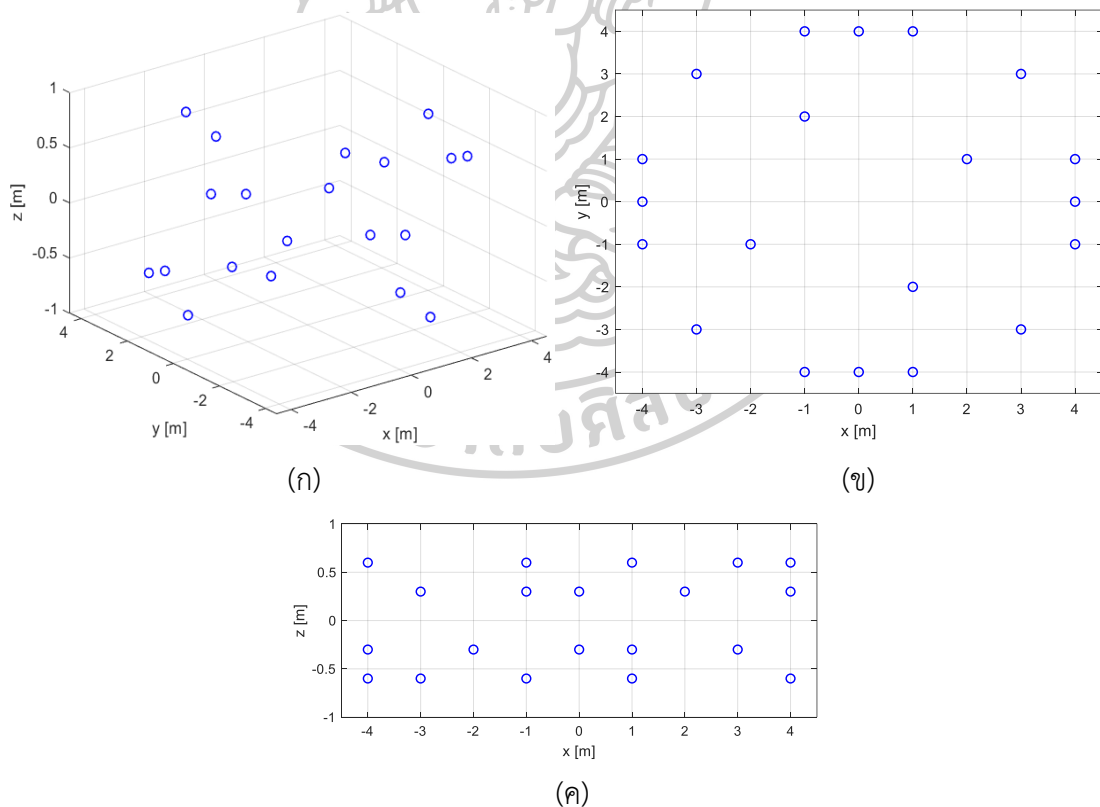
S_{up} คือ ขอบเขตบน (Upper boundary) ของตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

R_{up} คือ ขอบเขตบน (Upper boundary) ของรัศมีทรงกรวย

4.5 การออกแบบการทดลอง

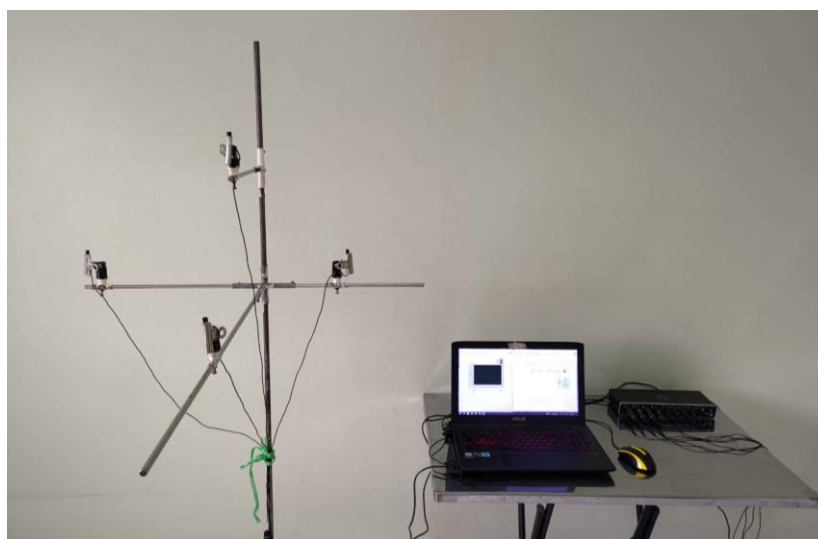
4.5.1 การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

สำหรับการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงใน 3 มิติ ผู้วิจัยได้ใช้แหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งซึ่งอยู่ในระยะ Near field และ Far field ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ในพิกัด 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 48 โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นมีทั้งตำแหน่งที่อยู่สูง และต่ำกว่าระนาบ $x-y$ เป็นระยะ 0.3 เมตร และ 0.6 เมตร



รูปที่ 48 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 จุดสำหรับการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ (ก) มุมมอง 3 มิติ (ข) มุมมองด้านบน และ (ค) มุมมองด้านข้าง

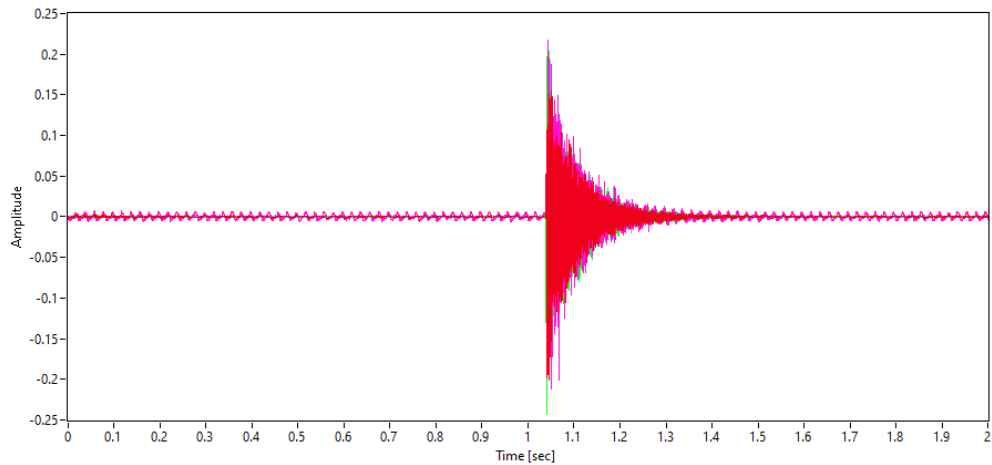
รูปที่ 49 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ ประกอบด้วยไมโครโฟนจำนวน 4 ตัว Sound interface และคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป จากคู่มือไมโครโฟนตัวที่ 1 กับ 3 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างกันมากที่สุดอยู่ที่ 0.64 เมตร จึงทำการวางไมโครโฟนอะเรียให้ห่างจากพื้นเป็นระยะ 1.5 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีที่เสียงสะท้อนจากตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ต่ำกว่าระนาบของไมโครโฟนเป็นระยะ 0.6 เมตร เข้าสู่ไมโครโฟนก่อนที่เสียงอิมพัลส์จะเข้าไมโครโฟนครบทุกตัว



รูปที่ 49 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ

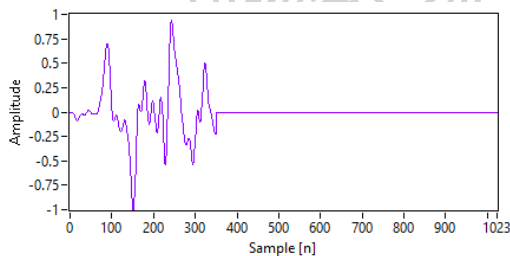
4.5.2 การประมวลสัญญาณ

สัญญาณอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้โดยไมโครโฟน 4 ตัวด้วยระยะเวลาการบันทึก 2 วินาที และใช้ Sampling rate 192 kHz แสดงดังรูปที่ 50 สัญญาณเสียงที่ไมโครโฟนตรวจจับได้จะมีทั้งเสียงอิมพัลส์ของแหล่งกำเนิด และเสียงสะท้อนรวมอยู่ด้วย ผู้วิจัยจึงใช้การตัดสัญญาณเพื่อนำส่วนที่เป็นเสียงสะท้อนออกทั้งหมด และนำเฉพาะส่วนที่เป็นเสียงอิมพัลส์ไปใช้สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง

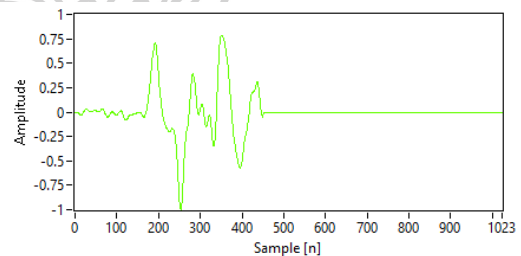


รูปที่ 50 สัญญาณอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้โดยไมโครโฟน 4 ตัว

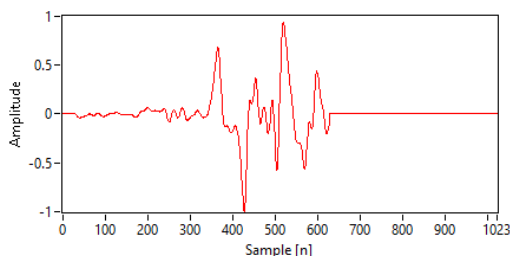
จากสมการ $L = (S/V_{sound}) f_s$ จะสามารถหาความยาวการตัดสัญญาณของไมโครโฟนตัวแรกได้เท่ากับ 352 Sample (ที่อุณหภูมิ 30 องศา) โดยเริ่มตัดตั้งแต่ตำแหน่งที่มีเสียงอิมพัลส์เกิดขึ้น สำหรับไมโครโฟนตัวที่สัญญาณอิมพัลส์เข้าทีหลังจะทำการตัดสัญญาณให้ยาวกว่าไมโครโฟนตัวแรก แล้วจึงใช้ Zero padding เพื่อให้สัญญาณเสียงทั้งหมดมีความยาวเท่ากันอยู่ที่ 1024 Sample สัญญาณที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัวแสดงดังรูปที่ 51



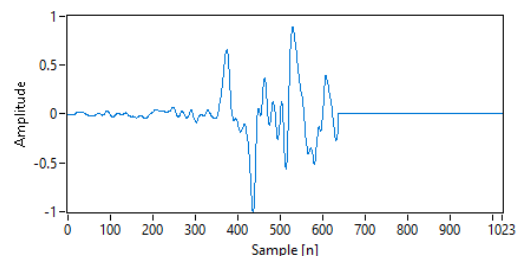
(ก)



(ข)



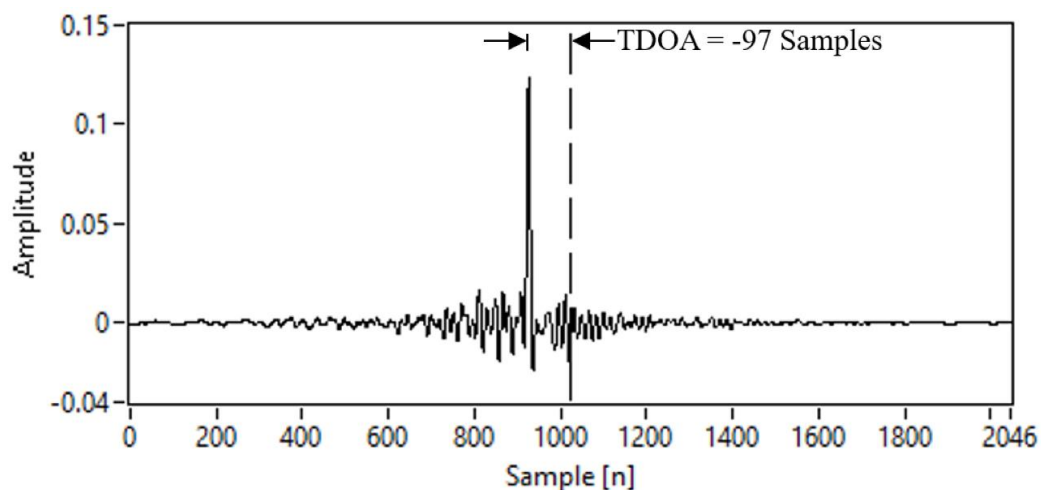
(ค)



(ง)

รูปที่ 51 ตัวอย่างสัญญาณอิมพัลส์ที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว (ก) ไมโครโฟนตัวแรก (ข) ไมโครโฟนตัวที่สอง (ค) ไมโครโฟนตัวที่สาม และ (ง) ไมโครโฟนตัวที่สี่

สัญญาณเสียงที่ถูกตัดทอนของไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว จะถูกนำมาหาค่า TDOA ของไมโครโฟน ทั้ง 6 คู่ โดยใช้วิธี GCC-PHAT จากสัญญาณความยาว 1024 Sample จะได้ความยาวข้อมูลของการ ทำ Cross-correlation เท่ากับ 2047 Sample ($P = L + M - 1$) ดังรูปที่ 52



รูปที่ 52 ตัวอย่างค่า TDOA ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT

4.6 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT จะถูกนำไปใช้หาตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดเสียงด้วยทั้ง 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียง และ วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข ผลการทดลองที่ได้จะแสดงดังต่อไปนี้

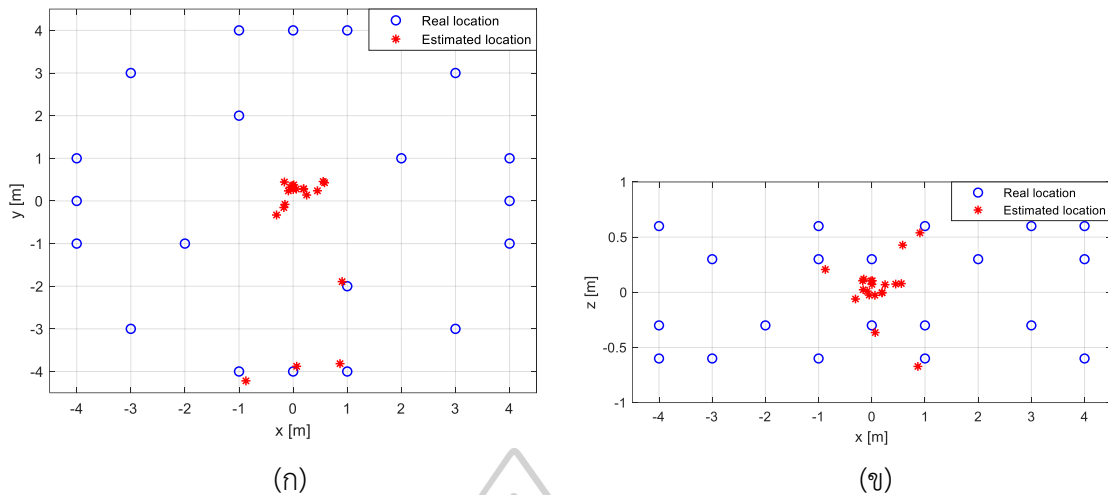
4.6.1 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติด้วยการหาจุดตัด พื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งด้วยวิธีการหาจุด พื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียงแสดงดังตารางที่ 6 และรูปที่ 53 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่ง แหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นจริง (เครื่องหมายวงกลมสีน้ำเงิน) กับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จาก การทดลอง (เครื่องหมายดอกจันสีแดง)

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติ โดยใช้วิธีการหาจุดตัด
พื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง

จุดที่	ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ สร้างขึ้น			ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการ ทดลอง			เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
	$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$	$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$	
1*	2	1	0.3	0.5801	0.4274	0.4274	67.63%
2	4	0	0.6	0.4489	0.2388	0.0744	87.67%
3	1	4	-0.3	-0.0140	0.3572	0.1030	91.00%
4	4	1	-0.6	0.1940	0.2800	-0.0053	91.83%
5	3	3	-0.3	0.0592	0.2785	-0.0272	93.27%
6*	-1	2	-0.6	0.0103	0.3758	0.1052	83.14%
7	0	4	0.3	-0.0481	0.3213	-0.0249	91.88%
8	-1	4	0.6	-0.1615	0.4436	0.0234	88.66%
9	-4	1	-0.3	0.1925	0.2832	-0.0024	91.72%
10	-3	3	-0.6	0.0029	0.2696	0.0716	93.49%
11*	-2	-1	-0.3	0.5561	0.4561	0.0790	67.93%
12	-4	0	-0.6	-0.0876	0.2358	0.0102	93.78%
13	-1	-4	0.3	-0.8728	-4.2199	0.2066	4.36%
14	-4	-1	0.6	-0.3066	-0.3296	-0.0607	89.10%
15	-3	-3	0.3	-0.1718	-0.1548	0.1044	94.03%
16*	1	-2	0.6	0.9049	-1.8917	0.5387	6.48%
17	0	-4	-0.3	0.0652	-3.8788	-0.3649	2.86%
18	1	-4	-0.6	0.8665	-3.8159	-0.6721	4.71%
19	4	-1	0.3	0.2501	0.1381	0.0691	92.89%
20	3	-3	0.6	-0.1510	-0.0808	0.1198	95.09%

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field

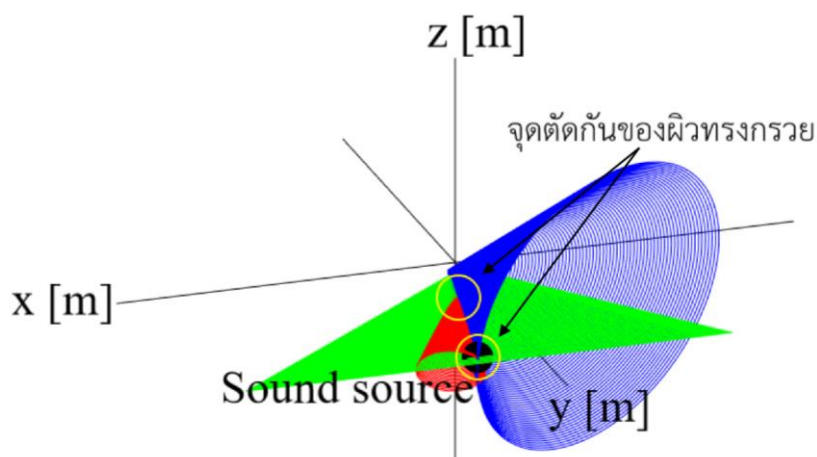


รูปที่ 53 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากวิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียง (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ใช้ทดลองทั้งหมด 20 ตำแหน่ง วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียงสามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเพียง 4 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ภายในควอดแดรนต์ที่ 3 กับ 4 และใกล้กับแกน $-y$ ได้แก่ ตำแหน่งที่ 13 $x = -1$ เมตร $y = -4$ เมตร $z = -0.3$ เมตร ตำแหน่งที่ 16 $x = 1$ เมตร $y = -2$ เมตร $z = 0.6$ เมตร ตำแหน่งที่ 17 $x = 0$ เมตร $y = -4$ เมตร $z = -0.3$ เมตร และตำแหน่งที่ 18 $x = 1$ เมตร $y = -4$ เมตร $z = -0.6$ เมตร โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงเท่ากับ 4.36%, 6.48%, 2.86% และ 4.71% ตามลำดับ ซึ่งให้ผลลัพธ์ได้ แม้ว่าแหล่งกำเนิดเสียงจะอยู่ห่างจากระนาบ $x-y$ เป็นระยะ 0.6 เมตร และสามารถจำแนกแหล่งกำเนิดเสียงที่มาจากด้านบน และด้านล่างได้ อย่างไรก็ตามค่ามุมตกกระทบ θ_{13} , θ_{32} และ θ_{43} ที่คำนวณได้จากการสมมติให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field จะมีความถูกต้องน้อยลงเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Near field โดยส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจากจุดตัดของพื้นผิวทรงกรวย ดังในตำแหน่งที่ 16 ที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งเท่ากับ 6.48% ซึ่งมากกว่าอีก 3 ตำแหน่งที่ให้ผลได้ (ตำแหน่งที่ 13 ตำแหน่งที่ 17 และตำแหน่งที่ 18)

สำหรับแหล่งกำเนิดเสียงตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ในควอดแดรนต์ที่ 3 กับ 4 และใกล้กับแกน $-y$ จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 67.63% ถึง 95.09% เป็นผลมาจากในบริเวณดังกล่าวมีจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวยมากกว่า 1 จุด (ดังรูปที่ 54) ทำให้การระบุ

ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงเกิดความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียงอาจหลีกเลี่ยงการตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยมากกว่า 1 จุดได้โดยเพิ่มการใช้ไมโครโฟนเป็น 5 ตัว ซึ่งจะสามารถเลือกใช้คู่ไมโครโฟนที่มีจุดตัดของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 เพียงจุดเดียวในการหาตำแหน่งของแต่ละควอดแดรนต์



รูปที่ 54 กรณีการตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 กรวยมากกว่า 1 จุด

4.6.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติด้วยวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance

ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งด้วยวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance แสดงดังตารางที่ 7 และรูปที่ 55 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้นจริง กับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้ จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขสามารถให้ผลการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงได้ครบทั้ง 20 ตำแหน่งครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ในพิกัด 3 มิติ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ระหว่าง 0.24% ถึง 2.52%

สำหรับตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงตำแหน่งที่ 1 $x = 2$ เมตร $y = 1$ เมตร $z = 0.3$ เมตร ตำแหน่งที่ 6 $x = -1$ เมตร $y = 2$ เมตร $z = -0.6$ เมตร ตำแหน่งที่ 11 $x = -2$ เมตร $y = -1$ เมตร $z = -0.3$ เมตร และตำแหน่งที่ 16 $x = 1$ เมตร $y = -2$ เมตร $z = 0.6$ เมตร มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งเท่ากับ 0.92%, 2.47%, 0.36% และ 1.88% ตามลำดับ ซึ่งให้ผลได้แม่นยำแม้ว่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่อยู่ในระยะ Near field ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขเป็นการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจากค่า TDOA

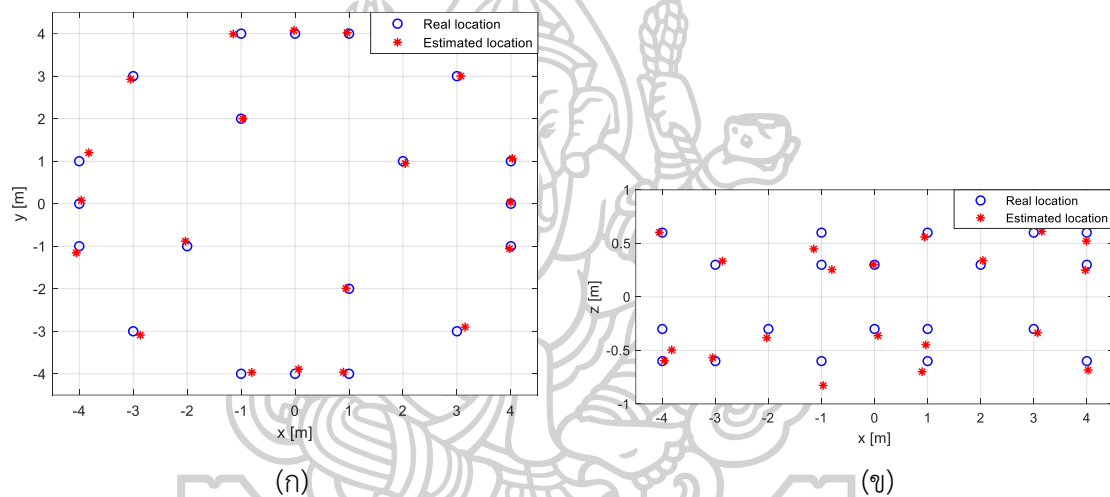
ของไมโครโฟนแต่ละคู่ด้วย Objective function ที่สร้างมาจากสมการ Euclidean distance จึงไม่ได้มีการใช้สมมติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field และไม่ได้ใช้การประมาณการว่าคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าสู่คูไมโครโฟนจะต้องอยู่ในลักษณะขนานกัน

ตารางที่ 7 ผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ โดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance

จุดที่	ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่สร้างขึ้น			ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากการทดลอง			เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
	$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$	$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$	
1*	2	1	0.3	2.0425	0.9471	0.3397	0.92%
2	4	0	0.6	3.9928	0.0421	0.5208	0.44%
3	1	4	-0.3	0.9657	4.0239	-0.4481	0.68%
4	4	1	-0.6	4.0248	1.0645	-0.6840	1.26%
5	3	3	-0.3	3.0723	3.0026	-0.3361	1.31%
6*	-1	2	-0.6	-0.9686	2.0012	-0.8276	2.47%
7	0	4	0.3	-0.0194	4.0774	0.3021	1.93%
8	-1	4	0.6	-1.1455	3.9911	0.4477	0.24%
9	-4	1	-0.3	-3.8224	1.1987	-0.4954	2.36%
10	-3	3	-0.6	-3.0490	2.9277	-0.5684	0.46%
11*	-2	-1	-0.3	-2.0319	-0.8826	-0.3825	0.36%
12	-4	0	-0.6	-3.9612	0.0796	-0.5960	0.95%
13	-1	-4	0.3	-0.8040	-3.9678	0.2546	1.88%
14	-4	-1	0.6	-4.0551	-1.1546	0.6030	2.22%
15	-3	-3	0.3	-2.8678	-3.0904	0.3346	0.57%
16*	1	-2	0.6	0.9437	-1.9894	0.5588	1.88%
17	0	-4	-0.3	0.0635	-3.8930	-0.3620	2.52%
18	1	-4	-0.6	0.8965	-3.9615	-0.6989	1.08%
19	4	-1	0.3	3.9738	-1.0566	0.2489	0.35%
20	3	-3	0.6	3.1520	-2.8997	0.6117	0.97%
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย							1.24%

*แหล่งกำเนิดเสียงไม่ได้อยู่ในระยะ Far field

พิจารณาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทำมุม 45 องศาจากจุดกำเนิดทั้ง 4 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งที่ 5 $x = 3$ เมตร $y = 3$ เมตร $z = -0.3$ เมตร ตำแหน่งที่ 10 $x = -3$ เมตร $y = 3$ เมตร $z = -0.6$ เมตร ตำแหน่งที่ 15 $x = -3$ เมตร $y = -3$ เมตร $z = 0.3$ เมตร และตำแหน่งที่ 20 $x = 3$ เมตร $y = -3$ เมตร $z = 0.6$ เมตร จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้สามารถให้ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งได้โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.31%, 0.46%, 0.57% และ 0.97% ตามลำดับ อันเป็นผลมาจากการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตรทำให้ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทิศทาง 45 องศา มีค่าแตกต่างกันชัดเจน และสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 55 ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงจริง และตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ได้จากวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance (ก) มุมมองด้านบน (ข) มุมมองด้านข้าง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิภด 3 มิติโดยใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตร ร่วมกับวิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance จะสามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องจากให้ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งได้แม่นยำทั้งในระยะ Near field และ Far field ในขณะที่วิธีการหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางการเคลื่อนที่ของเสียงจะมีความแม่นยำลดลงเมื่อแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Near field อีกทั้งวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขยังสามารถหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงได้ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ในพิภด 3 มิติโดยใช้ไมโครโฟนจำนวน 4 ตัว

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติ ด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขร่วมกับจำนวนไมโครโฟนไม่เกิน 4 ตัว โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการใหม่ให้หาตำแหน่งใน 3 มิติได้ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ ผู้วิจัยเริ่มศึกษาจากการหาตำแหน่งในพิกัด 2 มิติ ซึ่งจะนำค่า TDOA ที่ได้จากวิธี GCC-PHAT มาใช้สำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงด้วย 2 วิธีการ ดังนี้ 1) วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่ทางตรงของเสียง ซึ่งเป็นการใช้สมมติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field เพื่อหาค่ามุมตกกระทบของเส้นทางเดินของเสียงที่กระทำกับจุดกึ่งกลางแนวแกนของคู่อิโคโนโฟนแต่ละคู่ และนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง 3 เส้นโดยที่ค่าเฉลี่ยของจุดที่ตัดกันจะเป็นตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียง และ 2) วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขของสมการ Euclidean distance กระทำได้ด้วยการสร้าง Objective function ของความต่างของระยะทางที่เสียงมาถึงไมโครโฟนแต่ละคู่จากสมการ Euclidean distance และสามารถหาค่าตอบของแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุดได้โดยใช้อัลกอริทึม Interior point method

ทำการทดลองการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติควอดแดรนต์ที่ 1 ด้วยการใช้ไมโครโฟน 3 ตัวจัดเรียงบนระนาบ $x-y$ ซึ่งกำหนดให้แหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 12 ตำแหน่งอยู่ระนาบเดียวกันกับไมโครโฟน โดยมีทั้งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระยะ Near field และ Far field พบว่าวิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่เสียง และวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลข มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสำหรับการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระยะ Far field เท่ากับ 1.53% และ 1.01% ตามลำดับ ซึ่งให้ผลได้แม่นยำ แต่สำหรับแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ในระยะ Near field วิธีการหาจุดตัดของเส้นทางการเคลื่อนที่เสียงจะมีความแม่นยำที่น้อยลง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.04% ในขณะที่วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.58% ซึ่งยังคงให้ผลที่แม่นยำได้ เนื่องจากวิธีหาค่าตอบเชิงตัวเลขไม่ได้มีการใช้สมมติฐานให้แหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะ Far field

ส่วนถัดมาเป็นการศึกษาการใช้ไมโครโฟน 4 ตัวด้วยการจัดเรียงแบบสมมาตร และอสมมาตร วางอยู่บนระนาบ $x-y$ สำหรับหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 2 มิติ 4 ควอดแดรนต์ ทำการทดสอบกับแหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งทั้ง Near field และ Far field ที่ซึ่งไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันกับไมโครโฟน พบว่าวิธีหาจุดตัดของเส้นทางเดินของเสียง และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขให้ผลที่มีความผิดพลาดสูงตามระยะห่างของแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ห่างจากระนาบของไมโครโฟน โดยที่ระยะห่าง 0.3 เมตร 0.6 เมตร 0.9 เมตร และ 1.2 เมตร วิธีหาจุดตัดของเส้นทางเดินของเสียงมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 13.17%, 36.46%, 45.68%, 59.85% ตามลำดับ และวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 9.40%, 36.21%, 45.54%, 56.85% ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบสมมาตรจะให้ผลการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทาง 45 องศาจากจุดกำเนิด หรือแนวกึ่งกลางในแต่ละควอดแดรนต์ มีความคลาดเคลื่อนสูงแม้ว่าจะอยู่ใกล้กับระนาบของไมโครโฟนก็ตาม (อยู่ห่าง 0.3 เมตร) โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 47.51% และ 32.29% จากวิธีจุดตัดของเส้นทางเดินเสียง และวิธีหาคำตอบเชิงตัวเลข ตามลำดับ แต่เมื่อใช้การจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตรร่วมกับวิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลข พบว่าการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทาง 45 องศา และอยู่ห่างจากระนาบไมโครโฟน 0.3 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.79% ซึ่งให้ผลแม่นยำกว่ามาก อันเป็นเนื่องมาจากการจัดเรียงไมโครโฟนแบบอสมมาตรจะทำให้ค่า TDOA ของไมโครโฟนแต่ละคู่ที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงต่างๆ ณ ทิศทาง 45 องศา มีค่าแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น

วิธีการใหม่สำหรับระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงให้ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ในพิกัด 3 มิติ ถูกนำเสนอด้วยการนำไมโครโฟน 4 ตัวมาจัดเรียงแบบอสมมาตรร่วมกับการใช้วิธีหาคำตอบเชิงตัวเลข และพิจารณาการสร้าง Objective function จากสมการ Euclidean distance ในพิกัด 3 มิติ ตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุดหาได้โดยใช้ Interior point method นอกจากนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการใหม่จึงนำวิธีหาจุดตัดของเส้นทางเดินเสียงมาพัฒนาสำหรับหาตำแหน่งในพิกัด 3 มิติ โดยจะนำค่ามุมตกกระทบระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางคู่อไมโครโฟนมาสร้างเป็นพื้นผิวทรงกรวย ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเสียงในพิกัด 3 มิติจะเป็นจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยทั้ง 3 ซึ่งหาได้ด้วยการใช้ Interior point method ทำการทดลองกับ

แหล่งกำเนิดเสียงแบบอิมพัลส์ 20 ตำแหน่งทั้ง Near field และ Far field ครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ และมีบางตำแหน่งอยู่ที่ทิศทาง 45 องศาจากจุดกำเนิด พบว่าการใช้วิธีหาจุดตัดพื้นผิวทรงกรวยของเส้นทางเดินเสียงให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเฉพาะตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่ภายในบางควอดแดรนต์ และใกล้กับบางแกน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสำหรับตำแหน่งที่ให้ผลได้อยู่ที่ 4.60% และสำหรับบริเวณอื่นๆ มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สูง ความคลาดเคลื่อนมีค่าตั้งแต่ 67.63% ถึง 95.09% เนื่องจากเกิดจุดที่ตัดกันของพื้นผิวทรงกรวยมากกว่า 1 จุด ในส่วนของการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงโดยใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขที่นำเสนอใหม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องทุกตำแหน่งครอบคลุมทุกควอดแดรนต์ในพิสัย 3 เมตรรวมทั้งตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงที่ทิศทาง 45 องศา โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.24%

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการใหม่ในการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงในพิสัย 3 เมตร ซึ่งทำการทดสอบกับเสียงที่เป็นแบบอิมพัลส์เท่านั้น เพื่อให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ เช่น การตรวจจับตำแหน่งของเสียงผู้พูด อาจต้องมีการปรับปรุงในส่วนของวิธีการหาจุดเริ่มต้นของการตัดสัญญาณ เนื่องจากวิธีการหาจุดเริ่มต้นโดยพิจารณาจากค่าแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไปเหมาะสมสำหรับเสียงอิมพัลส์ที่ดังขึ้นอย่างฉับพลัน ซึ่งการตัดสัญญาณของเสียงพูดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้สัดส่วนของพลังงานเสียง (Energy ratio) ซึ่งเป็นการหาพลังงานเสียงที่เปลี่ยนแปลงไปของช่วงเวลานึงเทียบกับช่วงเวลาก่อนหน้า อีกทั้งการหาค่าตอบของแหล่งกำเนิดเสียงที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ Interior point method ที่ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวเองได้ (Adaptive algorithm) ทำให้ต้องใช้เวลาทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ทำให้ Objective function มีค่าน้อยที่สุด โดยจะส่งผลต่อการใช้ทรัพยากรในการคำนวณเป็นอย่างมาก ดังนั้นหากนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่เป็นแบบเวลาจริง (Real time) ด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีสเปคค่อนข้างต่ำ อาจทำให้ไม่สามารถประมวลผล และระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงได้ทันต่อการใช้งานแบบ Real time

รายการอ้างอิง

1. Knapp, C. and G. Carter, *The generalized correlation method for estimation of time delay*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976. 24(4): p. 320-327.
2. Farmani, M., et al. *Informed TDoA-based direction of arrival estimation for hearing aid applications*. in *2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*. 2015. Orlando, FL, USA.
3. Catur, H.A.H.B.B. and H.M. Saputra. *Azimuth Estimation based on Generalized Cross Correlation Phase Transform (GCC-PHAT) Using Equilateral Triangle Microphone Array*. in *2019 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*. 2019. Tangerang, Indonesia.
4. Lee, S., Y. Park, and Y.-s. Park, *Three-dimensional Sound Source Localization Using Inter-channel Time Difference Trajectory*. International Journal of Advanced Robotic System, 2015. 12(12).
5. Ishi, C., et al. *Evaluation of a MUSIC-based Real-time Sound Localization of Multiple Sound Sources in Real Noisy Environments*. in *Intelligent Robots and Systems*. 2009. St. Louis, MO, USA.
6. DiBiase, J.H., *A High-Accuracy, Low-Latency Technique for Talker Localization in Reverberant Environments Using Microphone Arrays* 2000, Brown University
7. Tong, J.J. and Y.F. Zhang. *Robust Sound Localization of Sound Sources using Deep Convolution Network*. in *2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA)*. 2019.
8. Diaz-Guerra, D., A. Miguel, and J.R. Beltran, *Robust Sound Source Tracking Using SRP-PHAT and 3D Convolutional Neural Networks*. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2020. 29: p. 300 - 311.
9. Mane, S.S., S.G. Mali, and S.P. Mahajan. *Localization of Steady Sound Source and Direction Detection of Moving Sound Source using CNN*. in *International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. 2019. Kanpur, India.

10. Huang, Y., X. Wu, and T. Qu. *A Time-domain Unsupervised Learning Based Sound Source Localization Method*. in *IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing*. 2020. Shanghai, China.
11. Pourmohammad, A. and S.M. Ahadi, *Real Time High Accuracy 3-D PHAT-Based Sound Source Localization Using a Simple 4-Microphone Arrangement*. *IEEE Systems Journal*, 2012. 6(3): p. 455-468.
12. ISHI, C.T., J. EVEN, and N. HAGITA. *Using multiple microphone arrays and reflections for 3D localization of sound source*. in *3 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2013. Tokyo, Japan.
13. Wakabayashi, M., H.G. Okuno, and M. Kumon, *Multiple Sound Source Position Estimation by Drone Audition Based on Data Association Between Sound Source Localization and Identification*. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020. 5(2): p. 782 - 789.
14. Wakabayashi, M., H.G. Okuno, and M. Kumon, *Drone audition listening from the sky estimates multiple sound source positions by integrating sound source localization and data association*. *Advanced Robotics*, 2020. 34(11): p. 744-755.
15. Wakabayashi, M., et al. *Design and Implementation of Real-Time Visualization of Sound Source Positions by Drone Audition*. in *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. 2020. Honolulu, HI, USA.
16. Yang, P., J. Xu, and S. Wang. *Position Fingerprint Localization Method Based on Linear Interpolation in Robot Auditory System*. in *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. 2017. Jinan, China.
17. McKnight, S. and C. Zahopoulos, *Scientific Foundations of Engineering*. 2015, Cambridge, England: Cambridge University Press.
18. Nocedal, J. and S.J. Wright, *Numerical Optimization*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering (ORFE). 2006, United States of America: Springer Science+Business Media, LLC.
19. Chong, E.K.P. and S.H. Zak, *An introduction to optimization*. 2001, United States of America: A Wiley-Interscience Publication.
20. Byrd, R.H., M.E. Hribar, and J. Nocedal, *An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming*. *SIAM Journal on Optimization*, 1999. 9(4): p. 1-27.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายเชาวพัฒน์ ชนิดกิจเจริญพร
วัน เดือน ปี เกิด	19 เมษายน 2541
สถานที่เกิด	727/41 หมู่บ้านงามเจริญโครงการ 3 ถนนอนามัยงามเจริญ แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กทม. 10150
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัย ศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	727/41 หมู่บ้านงามเจริญโครงการ 3 ถนนอนามัยงามเจริญ แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กทม. 10150

