

## การศึกษาขั้นต้นของการควบคุมเปลวไฟโดยการป้อนกลับสัญญาณภาพ Preliminary Study of Flame Control with Image Feedback

อภิชาติ ตันตระกูล\* ทรงฤทธิ์ ตันชัชวาล\*\* สุวัฒน์ กุลธนปรีดา\* และ ปฐมยศ วัลลิกุล\*\*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาขั้นต้นการควบคุมลักษณะของเปลวไฟจากหัวเผาแก๊สแบบผสมก่อน (Premixed Gas Burner) โดยการป้อนกลับสัญญาณภาพ จุดประสงค์ของการควบคุมคือการปรับให้เปลวไฟมีคุณลักษณะของการเผาไหม้ที่ดีโดยการสังเกตสีของเปลวไฟ และรักษาขนาดเปลวไฟให้ได้ตาม ที่ต้องการในเวลาเดียวกัน ในการทำ งานตัวควบคุมทำหน้าที่ปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งเป็นไปแบบอิสระต่อกันด้วยวาล์วเข็มที่ขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์จำนวน 2 ตัว สัญญาณภาพเปลวไฟได้มาจากกล้อง CCD (Charge Coupled Device) และ frame grabber จากนั้นภาพถูกประมวลผลแบบใน เวลาจริง (real time) ด้วยการ์ดประมวลผลภาพที่มี TMS320C81-MVP (Multimedia Video Processor) ซึ่งใช้ DSP (Digital Signal Processor) จำนวน 4 ตัวในการคำนวณพร้อมกันแบบขนานเป็นตัวประมวลผลจากการศึกษาภายในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมสภาพสิ่งแวดล้อมพบว่า ตัวควบคุมสามารถปรับตำแหน่งของวาล์วแก๊สและวาล์วอากาศให้ได้ลักษณะเปลวไฟตาม ที่ต้องการได้อย่างน่าพอใจ

### Abstract

This work is a preliminary study of flame control for a premixed gas burner using image feedback. The control objective is to achieve a good characteristic of combustion flame by visualizing the colors of the flame while maintaining its size as desired. The controller adjusts the flow rates of gas

and air independently through two stepper driven needle valves. A CCD (Charge Coupled Device) camera with a frame grabber is employed for imaging the flame. The image is processed in real time with an image processing card whose processor is TMS320C81-MVP (Multimedia Video Processor) which consists of four DSPs (Digital Signal Processors) running in parallel. The study results in a confine environment laboratory show that the controller is able to control the flame to achieve the objective as desired.

### 1. บทนำ

การใช้สัญญาณภาพ (Image) ในงานวิศวกรรมมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การวิเคราะห์ภาพเพื่อจดจำและการควบคุม ในการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) มีการใช้กันอย่างกว้าง ร่วมกับการทำงานของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นที่เรียกกันว่าระบบ Visual Servo Control ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้สัญญาณภาพจากกล้องในการหาตำแหน่งหรือการวางตัวของวัตถุ จากนั้นจึงควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุนั้น [1] อย่างไรก็ตาม การประยุกต์การใช้สัญญาณภาพกับการควบคุมการเผาไหม้ยังไม่มีการวิจัยมากนัก ตัวอย่างงานวิจัยที่มีปรากฏ เช่น H. Burkhardt, L. Oest, W. Tao [2] ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้ Neural Networks และ Fuzzy Logic ในการควบคุมเปลวไฟโดยการป้อนกลับสัญญาณภาพ และได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ

เปลวไฟโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบ

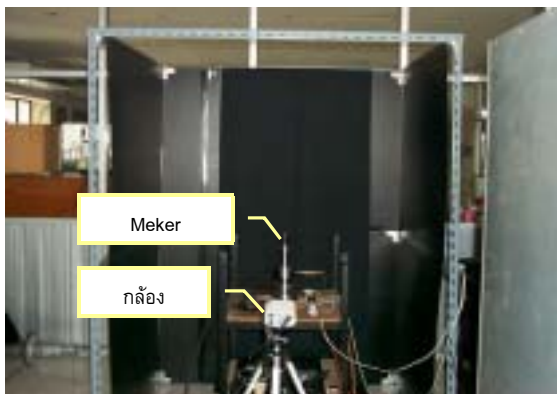
\* ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัจฉริยะ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\*\* ศูนย์วิจัยการเผาไหม้ของเสีย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อยู่กับที่ (Stationary) และแบบเคลื่อนที่ (Explosion) [3] โดยแบบอยู่กับที่ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบผสมก่อน (Premixed) และแบบแพร่ (Diffusion) เปลวไฟแบบผสมก่อนเป็นเปลวไฟที่เชื้อเพลิงและอากาศผสมกันก่อนเกิดการเผาไหม้ ลักษณะของเปลวไฟขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่เข้ามาผสมกันโดยตรง ในขณะที่แบบแพร่นั้นเชื้อเพลิงและอากาศแพร่เข้าหากันและเกิดการเผาไหม้ขึ้นในบริเวณที่สัดส่วนการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเหมาะสม ซึ่งลักษณะของเปลวไฟจะมีความซับซ้อนกว่าแบบแรกมาก โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของทั้งอากาศและเชื้อเพลิงด้วย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการควบคุมเฉพาะเปลวไฟแบบผสมก่อนโดยใช้ Meker Burner ผลลัพธ์ที่ได้จะใช้เพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจการควบคุมการเผาไหม้ที่ซับซ้อนต่อไป

## 2. ชุดทดลอง

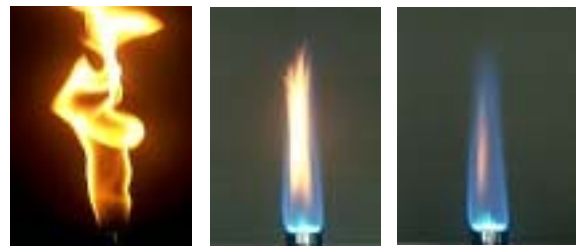
ชุดทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ดังนี้ (1) คอมพิวเตอร์ (PC) (2) การ์ด Image Processing พร้อมด้วย



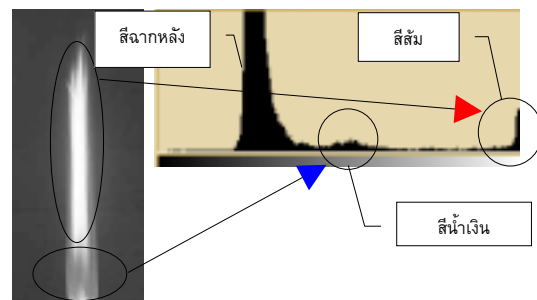
รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายโดยรวมของห้องทดลอง



รูปที่ 2 ชุด Meker Burner



รูปที่ 3 ตัวอย่างเปลวไฟ



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ Histogram ของภาพเปลวไฟ

Frame Grabber (3) กล้อง CCD (4) ชุด Meker Burner ติดตั้งพร้อมด้วย needle valve 2 ตัวซึ่งขับเคลื่อนด้วย stepping motors เพื่อสำหรับปรับอัตราไหลของก๊าซและอากาศ (5) แหล่งจ่ายก๊าซและอากาศพร้อมด้วยอุปกรณ์ปรับความดัน โดยก๊าซที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นก๊าซ LPG ที่ใช้หุงต้มในครัวเรือนทั่วไป ส่วนหัวเผา Meker Burner นั้นจะมีลักษณะคล้ายกับ Bunsen Burner แต่จะมีรังผึ้งติดตั้งอยู่บริเวณปากทางออกเพื่อทำหน้าที่ชะลอการไหลออกของส่วนผสม ทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ ชุด Meker Burner ถูกปิดล้อมด้วยผนังดำสามด้านเพื่อลดการรบกวนจากแสงภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายเฉพาะของชุด Meker Burner

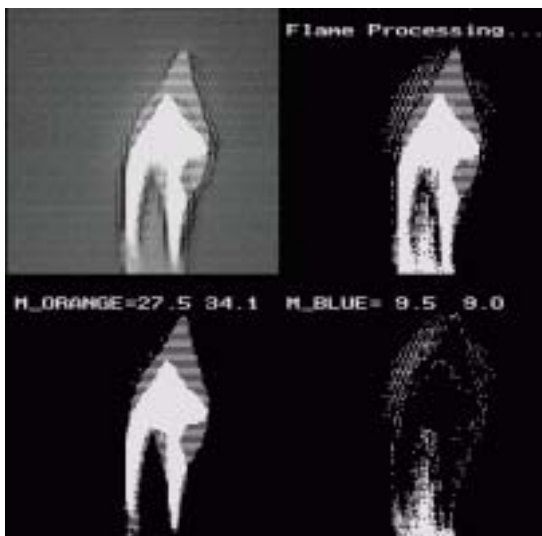
## 3. การวิเคราะห์สีของเปลวไฟ

สีองค์ประกอบหลักของภาพเปลวไฟประกอบด้วย 3 สี คือ สีดำ สีส้ม และสีน้ำเงิน โดยที่สีดำจะเป็นสีของฉากหลัง สีส้มเป็นสีของเปลวไฟที่มีการเผาไหม้ยังไม่ดี เพราะยังมี soot เหลืออยู่ในขณะที่สีน้ำเงินแสดงถึงว่าเปลวไฟมีการเผาไหม้ที่ดี และให้ค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าเปลวไฟสีส้ม รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างของเปลวไฟที่เกิดขึ้น จะสังเกตว่ารูปขาวสุดเป็นรูปของเปลวไฟที่ค่อนข้างจะเกิดการเผาไหม้ที่ดี มีเปลวไฟสีส้มเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย

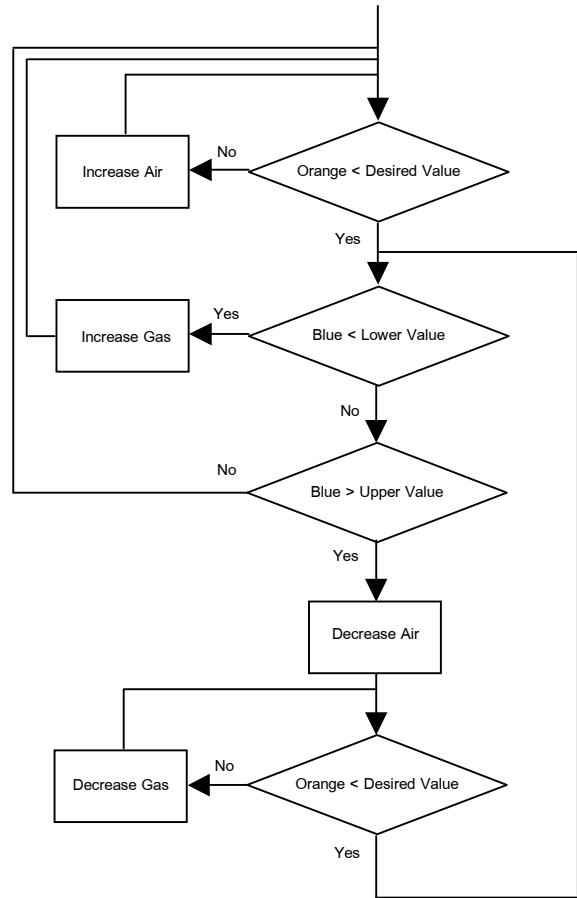
ในงานวิจัยนี้สัญญาณภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสัญญาณภาพขาวดำแบบ grayscale ดังนั้นการแยกสีในที่นี้กระทำโดยการวิเคราะห์ระดับ grayscale แทน ซึ่งจากการหา Histogram [4-5] ของภาพ ดังแสดงในกราฟด้านขวาของรูปที่ 4 โดยแกนแนวนอนของกราฟ Histogram แสดงค่าระดับ grayscale จาก 0 ถึง 255 ในขณะที่แกนแนวตั้งแสดงค่าความถี่ของสี ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ากราฟสามารถแยกค่าของสีส้มและสีน้ำเงินออกจากกันได้เป็นอย่างดี ในรูปเป็นกรณีตัวอย่างที่เปลวไฟมีการเผาไหม้ยังไม่ดีเท่าที่ควร โดยจะมีปริมาณของเปลวไฟสีส้มมากกว่าสีน้ำเงินซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Histogram ที่ปรากฏความถี่ของสีส้มสูงกว่าสีน้ำเงิน โดยที่สีดำของฉากหลังซึ่งมีค่าระดับ grayscale ใกล้ศูนย์มีค่าความถี่ของสีมากที่สุด

#### 4. การแยกสีในเวลาจริง

ในการควบคุมจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณภาพเพื่อแยกสีหาปริมาณสีส้มและสีน้ำเงินของเปลวไฟในเวลาจริง (real-time) ดังนั้นการประมวลผลสัญญาณภาพจำเป็นต้องกระทำอย่างรวดเร็ว ในที่นี้ใช้การ์ด Image Processing ที่ใช้ TMS320C81-MVP (Multimedia Video Processor) เป็นตัวประมวลผล โครงสร้างภายในของ TMS320C81-MVP จะประกอบด้วย DSP (Digital Signal Processor) จำนวน 4 ตัวทำหน้าที่คำนวณพร้อมกันแบบขนาน โดยมี RICS เป็น Master Processor ควบคุมการทำงานรวม [6] ในส่วนวิธีการ



รูปที่ 5 ตัวอย่างผลลัพธ์การประมวลผลภาพ



รูปที่ 6 ขั้นตอนการควบคุม

ประมวลผล (algorithm) นั้น ในที่นี้ใช้การ Threshold [4-5] ภาพแทนการหา Histogram เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า โดยในการ Threshold จะกำหนดให้ผลลัพธ์ของภาพเป็นสีขาวเฉพาะในส่วนที่มีค่าระดับสีมากกว่าค่า Threshold ที่กำหนด นอกนั้นจะเป็นสีดำ ซึ่งในที่นี้จะทำการ Threshold ทั้งหมด 2 ครั้ง ที่ระดับสีระหว่างค่าของสีฉากหลังและสีน้ำเงิน และระดับสีระหว่างค่าของสีน้ำเงินและสีส้ม โดยในครั้งแรกจะทำการเพื่อแยกภาพของฉากหลังออก ซึ่งสัญญาณภาพที่เหลือจะเป็นภาพของเปลวไฟทั้งสีน้ำเงินและสีส้มส่วนในการ Threshold ครั้งที่สองจะได้เฉพาะภาพของเปลวไฟที่เป็นสีส้ม จากนั้นนำผลลัพธ์ของการ Threshold ทั้งสองครั้งมาทำการ Exclusive-Or (XOR) จะเหลือเฉพาะภาพของเปลวไฟที่เป็นสีน้ำเงิน รูปที่ 5 แสดงผลลัพธ์ของการประมวลผลที่กระทำในเวลาจริง โดยที่รูปบนซ้ายเป็นภาพของเปลวไฟก่อนการประมวลผล ส่วนรูปล่างซ้ายและขวาเป็นภาพของเปลวไฟที่ผ่านการประมวลผลให้เหลือเฉพาะเปลวไฟสีส้มและสีน้ำเงิน ตามลำดับ และขนาดของ

เปลวไฟหาได้โดยตรงจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของภาพตัวอย่างในรูป ค่าเฉลี่ยของสีส้มและสีน้ำเงินที่เวลาที่จับภาพมีค่าเท่ากับ 27.5 และ 9.5 ตามลำดับ

### 5. การควบคุม

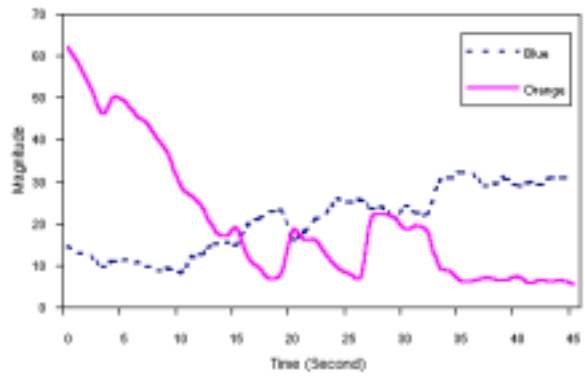
ขั้นตอนการควบคุมแสดงโดยสรุปในรูปที่ 6 โดยมีรายละเอียดดังนี้ ในอันดับแรก ตัวควบคุมจะทำการเพิ่มอากาศให้กับหัวเผาจนกระทั่งขนาดของสีส้มลดลงมีค่าต่ำกว่าระดับที่กำหนด จากนั้นตัวควบคุมทำการตรวจสอบว่าขนาดของสีน้ำเงินอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ ถ้าขนาดสีน้ำเงินต่ำกว่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะทำการเพิ่มก๊าซขึ้นในขณะเดียวกันก็จะเพิ่มอากาศขึ้นด้วยเพื่อควบคุมให้ขนาดสีส้มอยู่ในระดับต่ำตามที่กำหนด ในทางกลับกันถ้าขนาดของสีน้ำเงินมากกว่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะทำการลดอากาศลง ในขณะเดียวกันก็จะลดก๊าซลงด้วยเพื่อรักษาให้ขนาดสีส้มอยู่ในระดับต่ำตามที่กำหนด การควบคุมดำเนินไปอย่างอัตโนมัติต่อเนื่อง เพื่อรักษาให้เปลวไฟมีลักษณะตามที่ต้องการ นั่นคือมีขนาดของเปลวไฟสีน้ำเงินตามกำหนด โดยมีขนาดสีส้มน้อยที่สุด

### 6. ผลลัพธ์การควบคุม

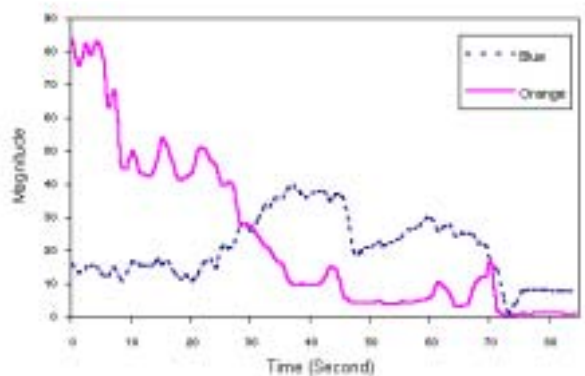
รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลลัพธ์ของการควบคุม โดยที่ในรูปที่ 7 การควบคุมกำหนดให้จำนวนสีน้ำเงินมีค่า  $30 \pm 1$  จะสังเกตว่าจำนวนสีน้ำเงินเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่าที่ต้องการและตัวควบคุมสามารถปรับให้เปลวไฟมีค่าตามที่ต้องการได้ในเวลาประมาณ 40 วินาที ส่วนรูปที่ 8 เป็นตัวอย่างการควบคุมในกรณีที่ค่าจำนวนสีน้ำเงินเริ่มต้นมากกว่าค่าที่ต้องการซึ่งกำหนดไว้เป็น  $10 \pm 1$  จะสังเกตว่าในช่วงแรกตัวควบคุมทำการลดจำนวนสีส้มโดยที่ยังไม่สนใจขนาดสีน้ำเงินก่อน เมื่อขนาดสีส้มมีค่าน้อยตามที่กำหนดแล้ว ตัวควบคุมจึงค่อยดำเนินการปรับวาล์วให้ได้ขนาดสีน้ำเงินตามที่ต้องการ รวมเวลาที่ใช้ควบคุมทั้งหมดก่อนที่จะได้ขนาดสีน้ำเงินตามที่ต้องการประมาณ 80 วินาที

### 7. สรุปและงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการควบคุมลักษณะเปลวไฟของหัวเผาก๊าซแบบผสมก่อนโดยการป้อนกลับสัญญาณภาพ โดยที่จุดประสงค์ของการควบคุมคือการปรับให้เปลวไฟมีขนาดตามที่ต้องการในขณะที่มีการเผาไหม้ที่ดีที่สุดซึ่งสามารถบ่งบอกด้วยสีของเปลวไฟเป็นหลัก สัญญาณภาพแสดงลักษณะของเปลวไฟได้มาจากกล้อง CCD และถูก



รูปที่ 7 ผลลัพธ์การควบคุมโดยกำหนดสีน้ำเงินเท่ากับ  $30 \pm 1$



รูปที่ 8 ผลลัพธ์การควบคุมโดยกำหนดสีน้ำเงินเท่ากับ  $10 \pm 1$

ประมวลผลในเวลาจริงด้วยการ์ด Image Processing จากการศึกษาขั้นต้นภายในห้องปฏิบัติการ ที่มีการควบคุมสภาพสิ่งแวดล้อมพบว่า ตัวควบคุมสามารถปรับตำแหน่งของวาล์วก๊าซและวาล์วอากาศให้ได้ลักษณะเปลวไฟตามที่ต้องการได้อย่างน่าพอใจ

### งานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาขั้นต้น ดังนั้นยังคงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีกจำนวนมากที่ควรจะมีการศึกษาต่อไป ลักษณะงานวิจัยในอนาคตที่น่าสนใจแต่ไม่ได้จำกัด เช่น

- การใช้สัญญาณภาพที่เป็นสี ซึ่งจะทำให้สามารถประมวลผลหาข้อมูลของเปลวไฟได้ดีขึ้น แต่อาจจะมีปัญหาเรื่องเวลาที่ใช้ในการประมวลผล
- การประยุกต์หลักการควบคุมกับหัวเผาประเภทอื่น เช่น หัวเผาแบบ Swirl ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า
- การหากฎการควบคุมที่ดีกว่า เพื่อทำการ optimize ข้อกำหนดที่ต้องการอย่างชัดเจน

- การหาวิธีการประมวลผลอย่างอื่นที่มีประสิทธิภาพดีกว่า รวมไปถึงใช้เวลาการประมวลผลที่น้อยกว่า

- ศึกษาความเป็นไปได้ในการควบคุมด้วยตัวควบคุมประเภทอื่น เช่น แบบ Neural Networks และแบบ Fuzzy Logics เป็นต้น

#### เอกสารอ้างอิง

1. Castana, A. and Hutchinson, S. "Visual Compliance: Task-Directed Visual Servo Control." *IEEE Robotics and Automation*. June 1994.
2. Burkhardt, H., Oest, L. and Tao, W. "Vision-

Guided Flame Control." *SENSOR 95*. Nurnberg, Germany. May, 1995.

3. Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G. *Flames: Their structure, radiation and temperation*. Chapman and Hall Ltd., 1970.
4. Jain, R., Kasturi, R. and Schunck, B.G. *Machine Vision*. McGraw-Hill, 1995.
5. Haralick, R.M. and Shapiro, L.G. *Computer and Robot Vision*. Addison-Wesley Pub., 1992.
6. Texas Instruments. *TMS320C8x User's Guide*. 1998.