

האם ניתן לשחזר ריחות ולהעבירם בתקשורת? – פרופ' דוד הראל, 15.5.2018

שלום, אני דוד הראל, פרופסור למדעי המחשב פה במכון, ואני ארצה לכם בשעה הקרובה. פעם ביקשו מברנדט שו לדבר שעה והוא אמר: אם אגיד כל מה שאני יודע, אצטרך לדבר לאט כדי למלא שעה. הנושא שלנו היום הוא "צילום" של ריחות, או האם ניתן להעביר ריח בתקשורת? בשקף שלפניכם אתם רואים את התצלום הראשון אי פעם, שצולם על ידי ניספור נייפס ב-1826. בשקף הבא רואים את האדם הראשון עלי אדמות שדמותו צולמה. זה לא ציור, ציור זה מלכים נסיכות, אלא תצלום שעושה קליק. צילום התמונה הראשונה הזאת לקח 9 שעות, 9 שעות של חשיפה. זה לא בדיוק קליק, אבל קליק במובן הארוך של המילה.

ב-1876, חמישים שנה אחרי התצלום הראשון היתה שיחת הטלפון הראשונה, השיחה המפורסמת של אלכסנדר גרהם בל אשר צולם כאשר בוצעה השיחה הטרנסאטלנטית הראשונה. הוא קרה לאסיסטנט שלו, מר ווטסון בא, שמע וקלט שזה משהו מיוחד. יש פה דוגמא לכך שווליום זה משהו שאפשר לשחזר, לשמור ולהעביר בתקשורת.

בשבילי שני התאריכים אלה הם אבני דרך דרמטיים ביכולת של האדם להרחיב את מה שיכולים לעשות. על זה בדיוק אדבר, אבל לא בקשר לחוש הראייה, לא בקשר לחוש השמיעה, לא אודיו לא וידיאו, אלא בקשר לריח. יעזור אם לאורך כל ההרצאה תחזיקו את האנלוגיה הזאת בראש. למשל הכי קל לשמור על אנלוגיה של צילום והדפסה. אני מביא מצלמה, עושה קליק, אפשר לשלוח את התמונה למדפסת במשרד או למסך הטלפון ולהדפיס במדפסת שמשפריצה דיו על הנייר ויוצא משהו. אומרים אָה, נכון, זה עולם ההדפסה. אנחנו רוצים לדבר על אותו דבר לגבי ריח.

זה מה שיש לנו. אגיד בתור הקדמה, שהדברים שאני מדבר עליהם היום לא שייכים למחקר העיקרי שלי. זה מחקר מהצד ואני רוצה שקהל רחב יותר ישמע על כך, כי אנשים נדלקים מהנושא. לכן אני מדבר על זה יותר מאשר על הדברים שאני עושה כל הזמן. אני לא אחראי ולא מתמחה בחוש הריח של יונקים ובני אדם, יש אנשים שמתמחים בזה ובגנטיקה של הריח. אני לא מומחה לדברים האלה, נמצא פה במכון נועם סובל, חוקר מדליק ומוכשר שמחזיק מעבדה נהדרת. חלק מהעבודות שעשינו זה במשותף, אצלו זה מה שהוא עושה לפרנסתו, אצלי זה תחביב. לא אדבר על המערכת הכימית והביולוגית של חישת הריח. אבל לכל אחד מאיתנו יש 300-500 סוגים שונים של קולטני ריח, רצפטורים שקולטים מולקולות, והמידע על איך כל ריח – שזה כל רצפטור כזה – איך הוא מגיב לריח בנחיריים; המידע מגיע למוח ואנחנו חשים מקבלים תחושת ריח. לא אכנס לזה. בהרצאה הזאת אדבר בעיקר על הגביע הקדוש של העולם הזה, הדבר העיקרי, לשכנע שזו בעיה מרתקת וקשה. למרות שאגיד עכשיו שיכול להיות שמחר בבוקר סמסונג או גוגל או מיקרוסופט או פייסבוק יבואו עם פתרון להעביר ריח. קשה לי להאמין שזה יקרה מחר, זה יקרה מתישהו, כרגע זה לא קיים.

השקף שלפניכם ממחיש איך יודעים שבעיה היא קשה. זו בעיה קשה כאשר צוחקים שאפשר לעשות את זה. למשל אם נשאל אם אפשר להעביר מחשבות לדרום אמריקה, נצחק כי זו בעיה לא פתירה. לפני 5 שנים, ב-1 באפריל, פתחנו את גוגל ולמעלה בתפריט היה דבר חדש - NOSE, וראית פח זבל. נתנו לך להבין שאוטוטו, תוך שבוע שבועיים, תקנה מחשב כזה ותוכל להעביר ריחות והכל סבבה. אני מדגיש שזו היתה בדיחה של 1 באפריל. היה מצחיק להגיד שכמו שאפשר להעביר תמונות וסרטונים, אפשר להעביר ריח.

זה שקף שבו תעזור אנלוגיה לצילום והדפסה. יש משהו שיש לו ריח, מצלמים את הריח ומסניפים. נקרא לו סניפר, נוכל להסניף את הריח כמו להעביר תמונה. המטרה היא לתת חתימה דיגיטלית של הריח, וקטור של מספרים, בדרך כלל עובדים על טכנולוגיה כימית, למשל פולימרים, ולכל אחד מהם המולקולות עושות משהו. אני נותן גרף, לוקח את הפיק של הגרף, מקבל מספר או כמה מספרים בכל סנסור, אם יש 10 סנסורים אז מקבלים 10 מספרים; מקבל חתימה דיגיטלית של הריח ואפשר להעביר אותה לכל מקום שרוצים. ואז אותה חתימה דיגיטלית נכנסת למחשב שמצויד באלגוריתמיקה, מתמטיקה, תוכנה, מה שצריך. תדמיינו שצריך עכשיו לשחזר את הריח. להדפיס את הריח כמו שאני מדפיס תמונה, הוראות יוצאות מהתוכנה והחומרה למכשיר פלט, מה- sniffer למכשיר הפלט whiffer (מהשאיפה לנשיפה). מה המכשיר הזה עושה כשהוא מקבל את ההוראות האלה? אין לנו דרך לחוות ריח אלא אם כן אנחנו מקבלים מולקולות שנכנסות לנחיריים, פוגעות בחלק הקדמי של מערכת הריח; אפשר להגיע אליה, אפשר לשים אלקטרודות באף, עשינו את זה בעבודה משותפת עם נועם סובל. זה לא נעים אבל לא כואב, אפשר לשלם לאדם 50 שקל כדי שישב רבע שעה עם אלקטרודות באף, אפשר להיכנס לחלק העליון של מערכת הריח, לא למוח. אבל המערכת צריכה להוציא מולקולות אמיתיות, לא לתת תמונה או לספר על הריח, אלא לתת מולקולות שכך שכמו שמעבירים קול, אפשר יהיה להעביר ריח. כלומר, שאם המולקולות ייכנסו לנחיריים של אדם עם חוש ריח ממוצע, לא תתכן, מה יקרה? הבנאדם הזה יחוש שמה שהוא מריח זה ריח מקורי. האם הן חייבות להיות אותן מולקולות כמו במקור? לא. למשל בחדר הזה, לך יש חולצה טורקיז, אין לי דיו בצבע טורקיז במדפסת, אבל המדפסת יודעת לערבב צבעים כך שעל הנייר יופיע הצבע של החולצה ונכיר שזו החולצה שלך. אולי נוכל לעשות אותו הדבר עם ריח. לכן זה נמצא פה באיור בענן כזה, אדם חש תחושת ריח של ורד. אם ההרצאה היתה באנגלית הייתי אומר לגבי השקף הזה שהמטרה היא pose rose, המילה החשובה היא pose, כי זה חיקוי. המדפסת ומסך המחשב מחקים את מה שצולם. אותו דבר בקול, אם אני יושב בהיכל התרבות ושומע את החלק האחרון של הסימפונייה הראשונה של מאהלר, בבית אני שומע במערכת מצוין, אבל זה חיקוי, וזה מספיק טוב. זו בעיה, את זה אנחנו רוצים לפתור. לא לבנות מכשיר עם עשרה ריחות ולהקפיץ ריח כשאתה בא לקנות בושם. אלא משהו שיוכל לצלם כל ריח ולשחזר את הריח כך שיכירו אותו בצד השני. זה צריך לעבוד בכל רגע; מצלמה שיכולה לצלם רק פורטרטים או רק מהחלון שלי, זה לא שווה. זה צריך לעבוד על ריחות שלא מכירים ולא יודעים לתאר. שאם אני הולך לעליית הגג של סבתא שלי ז"ל ומריח, אני רוצה שזה יוכל לעבור אליכם, שתחושו איך מריח שם. או שאם אני מטייל בג'ונגל בברזיל, ופוגש שם זברה לא עם פסים אלא משולשים, בצבע סגול, הולך לבית השחי שלה ומריח, אני רוצה לשדר את הריח. אנחנו רוצים משהו אמין שיזהה את הריח, כך שאם גם תלכו לג'ונגל ותריחו, תכירו שזה אותו ריח. לא אכנס לפרטים, אני מדבר לאט כדי שאספיק להגיד בשעה את כל מה שאני יודע, כמו שאמר ברנרד שו. אם היה לי זמן, הייתי משכנע אתכם שכדי לפתור את זה צריך המון דברים מהמון שטחים. למשל הנדסה, כי אני רוצה מכשיר פלט שיפלוט מולקולות, ולא שאחרי עשר דקות המכשיר יהיה כל כך מלוכלך מהבוץ של הקפה, כך שלא אוכל להעביר ריח של זברה. צריך מוח כמובן, פיזיקה ואלקטרוניקה חשוב, וכן כימיה, מתמטיקה ופסיכופיזיקה גם. אדגיש שהדבר שאנחנו הכי פחות מבינים זה המושג תחושת ריח. מה אנחנו חשים כשמריחים, מה זה עושה למישהו כמוני שבא מהשטחים האלה שצינתי. זה טיפה אולי יתבהר בהרצאה, אבל זו לא מטרה שלי.

על השקף הבא הייתי יכול לדבר שעה. למערכת של העברת ריח יש יישומים לרוב. חלק מהיישומים הם טלוויזיה וסרטים, משחקי מחשב. חלק אחר זה ענפים שלמים של התעשייה שקשורים לריח – קוסמטיקה, אוכל, יין. וגם אבחנה רפאית - היה לי חבר רופא ילדים שהיה מסוגל לשאוף את הבל הפה של תינוק ולזהות סטרפטוקוקוס בדיוק גבוה. יגידו לכם סוג מסוים של רופאים, שהם משתמשים בחוש הריח לתת אבחנה. כמובן בבישול, תדמיינו, יש לי במשפחה כל מיני חובבות שרופות על תוכניות בישול. אני יכול להבין, זה נורא מהנה ומעניין, אבל תמיד קשה לי להבין איך אפשר ליהנות כל כך בלי לטעום ובלי להריח. טעם וריח זה הכל, ההנאה מלווה גם באחת מחמש תחושות טעם – מתוק, מלוח, חמוץ, חריף, מר – זה הרבה בעקבות חוש הריח. תארו לכם שיהיו מולקולות שיעבירו בזמן אמת את הריח מתוכנית הבישול; בעצם זאת אינדיקציה שעשינו הרבה כדי לפתור את הבעיה הזאת, כי זה צריך להיות גם זמן אמת. אפילו אם היינו רואים את המרכיבים של אותו אופה או אותה שפית מביאים, לא היינו יודעים מה הריח.

זה מכשיר סניפר (בשקף), שממפה מולקולות למספרים. לא חשוב איך זה עובד, אבל אני רוצה לקבל חתימה דיגיטלית של הריח. חשוב שהסניפר יהיה מספיק מבחין, לפחות במינימום ריחות שונים שאתם ואני מריחים אחרת, שחתימת הריח תהיה אחרת. בדרך כלל אומרים: אם הריח דומה, אנחנו רוצים מספרים דומים? זה סיפור מסובך. אם המולקולות דומות, הריח יהיה דומה? ממש לא. אבל אנחנו רוצים מערכת שתוכל לשדר ריח, אחרת לא עשינו כלום. יש מכשירים כאלה במעבדות, נועם סובל עובד על זה שנה שנתיים במעבדה, יש לו אפים מלאכותיים במעבדה. אפים מלאכותיים בתעשייה עולים בין 20 ל-200 אלף דולר, משתמשים בהם למטלות מכובדות כמו לזהות אם יש פצצה או לא, אם גבינה מקולקלת או לא, אם לעטוף קיט-קט בנייר כזה או כזה, האם אחרי חודש זה יקלקל את הטעם. הדוגמאות שנתתי הן בינאריות, זה החלטה כן/לא, או בין שלוש-ארבע אפשרויות. זה צנוע הרבה יותר מאשר היינו רוצים באמת. אם ניקח אנלוגיה לצילום – תדמיינו שלא היה צילום, יש לכם סמרטפון, אפשר לדבר לשמוע, אבל לא לצלם. ואני בא, נותן הרצאה לפני אנשים מכובדים ומראה תמונות. מגלגל מכשיר ענק שעולה 200 אלף דולר, עושה קליק, המכשיר אומר אם יש באולם הזה יותר אור מאשר בחוץ. או האם ממוצע הצבעים הוא צבעים חמים, אדומים וכתומים, לעומת צבעים קרים, ירוקים וכחולים. אני טיפה מגזים את האנלוגיה, אבל לא בהרבה. אני רוצה אף מלאכותי שיסניף הוראות למכשיר הפלט, ויצא בדיוק אותו ריח או מספיק דומה או בר הכרה לכל ריח שתמצאו.

לגבי מכשיר הפלט – כמו במדפסת שלי אני רוצה מספר סופי של ריחות, ריחות בסיס, מישהו שישאל האם יש RGB לריח, האם יש בסיס של מנת ריחות שאפשר לפי הריחות האלה עם ערבוב שלהם לפרוס את כל מרחב הריחות. כמה ריחות שונים נראה לכם שבנאדם כמונו מסוגל להבחין בהם? להבחין, לא לספר עליהם, אבל לחוש. כמה סוגים שונים של ריח אפשר להריח? מה נראה לכם? מדובר על עשרות אלפים, על 60-70 אלף ריחות שונים. אבל יש תחושה בין האנשים שבאמת מומחים בשטח, שניתן יהיה ליצור 50 ריחות כך שאפשר יהיה לערבב אותם ברזולוציה של אחוזים בודדים, אפס אחוז מזה, 2 אחוז מזה, 10 מזה, ותוכל לפרוס את מרחב הריחות שאנו מסוגלים להבחין ביניהם בצורה סבירה. דבר נוסף, המערכת צריכה להיות מסוגלת לשחרר מולקולות בכמויות מזעריות ובאופן מבוקר, מספיק כמויות קטנטנות של מולקולות ריח כדי לתת את התחושה.

ב-2001-2002 הייתי קשור למאמץ הזה, הקמנו חברה (עם נועם סובל) ששמה למה טרה גדולה לפתור בעיה הגדולה, כולל לתת כסף לאנשים במכון לעשות מחקר. החברה עמדה לעשות כסף מדברים הרבה

יותר צנועים לאורך השנים, בנינו וויפר (whiffer) מצוין, כך הוא היה אמור להיראות (רואים בשקף), אבל אף פעם לא הגיע לזה, החברה התמוטטה ב-2002 כאשר הנאסד"ק נפל. המשקיעים העיקריים, כמו חברת התוכנה מיקרוסופט ופייסבוק וסמסונג, החברות אלה השקיעו בה ובמשבר הן משכו את עצמן והחברה התמוטטה. בהתחלה זה עבד נהדר, הגענו ל-60 ריחות. אחד הדברים שעשינו, כאשר באו משקיעים ועיתונאים של CNN למשל, היו מושיבים אדם, היה מכשיר שהיה מחובר ללפטופ קרוב לאף, היינו אומרים לאדם שאנחנו הולכים להראות לו משהו והוא גם יריח, האדם היה יושב והיה לנו קליפ של פרסומת של פיצה האט, והקליפ רץ. היתה מוזיקה וראו זוג שמתיישב והם מזמינים, בא מלצר עם מיץ תפוזים, פתאום האדם אומר: אני לא מאמין, אני ממש מריח את מיץ תפוזים. זה לא "בום" מכה של מיץ תפוזים שאי אפשר להתעלם, זה כמות מזערית. אז באה מלצרית עם פיצה מהבילה, והאדם שישב ליד הלפטופ כמעט התעלף. כל עוד לא יצא לכם לקבל תחושה מלאכותית של ריח כשאתם רואים דברים בזמן אמת, קשה לתאר כמה זה דרמטי. אנשים אומרים: זה מדליק, אני צריך את זה לכל מקום. השקף שלפניכם עכשיו הוא אולי השקף הכי חשוב בהרצאה, יש אפים מלאכותית, הם עולים 20 או 200 אלף דולר. אם הדבר הזה ייפתר, הם ייעשו זולים יותר, אולי האיכות קצת תרד ואז תעלה. הוויפרים יהיו זולים. זו לא בעיה, יש אפים מלאכותיים, יש מכשירים שיודעים לערבב ולהוציא כמויות קטנות של ריח; אם נצטרך אותם באופן רחב, הם יהיו מחוברים למצלמת וידיאו ויצאו למקלדת. הבעיה זה מעבר מאחד לשני. באודיו ווידיאו אין בעיה, אתה מצלם, מדפיס. מעביר מאחד לשני; זה גלים, ואנחנו יודעים לטפל בגלים. יודעים לעשות זאת. זה לא גאונות שהומצאה היום. זה דבר פשוט להעביר גל כניסה לגל יציאה, להרים רמקול שייתן קול. בריח זה מולקולות, פריצות הדרך של 1826 ו-1876 פתרו את הבעיה עבור תמונה וקול, וברגע שיש תקשורת אפשר להעביר, לשדר. אבל בריח זו הבעיה. נניח שהסנפך עם אף מלאכותי מעולה, יש לך חתימת ריח מדויקת של סנסורים במכשיר, יש מכשיר פלט עם 70 ריחות, יודעים איך נראים הריחות, נו ואז מה? אתה צריך לתת הוראות לגוף לא כדי שמה שיצא בסוף זה מולקולות, אלא מולקולות שמנגישות לנו את תחושת הריח המוחית שלנו. זה צריך לעבוד תמיד נכון, או כמה נכון שאפשר, לעבור למולקולות של מכשיר הפלט. אין לנו מושג ירוק – זה לא טוב לומר ירוק עבור ריח, אין לנו מושג מסריח או מריח איך לעשות את זה. הבעיה היותר קשה – זה לא גלים, זה מולקולות שצריכות לעבור בנחיריים, להכות במוח באיזושהי דרך, וזה לא קל. מה יש לאנשים כמוני לחבור לנועם סובל וחוקרי ריח אחרים ולהתעסק בזה? בקצרה, אם אתם רוצים תשובה במשפט אחד – במינימום, בכל מקרה נצטרך למצוא מיפויים אלגוריתמיים בין מרחב ריח אחד לשני. מרחב ריח אחד פגשנו – זה מרחב הפלטים של האף המלאכותי, פליטות של ריח זה וקטורים של מספרים, יש מעבר מהריח לעולם של מספרים, זה נמצא במרחב הריח של האף המלאכותי. מרחב ריח נוסף זה תכונות מולקולריות, פה במכון אני לא צריך לספר מאות טובות – 1700 או משהו כזה, פעם אחרונה שהסתכלתי על זה – מדדים שונים שמאפיינים מולקולות: למי הן מחוברות, באיזו זווית הן נמצאות וכו'. בעיקרון ריח זה מולקולות, סוג אחד אם זה משהו טהור, סוג אחר אם זה תערובת. אז זה מרחב נוסף – תכונות מולקולריות. תגובת המוח – המוח מקבל סיגנלים, אני לא כל כך יכול להיכנס לתוכו, אבל זה מרחב. המרחב הכי חמקמק זה מרחב – תחושת הריח של אדם, התפיסה שלנו, מה זה עושה לנו, זה המרחב. זה הכי חשוב, כי זה מה שאנו רוצים שהפלט יעשה – שייתן תחושת ריח של אותו ריח.

עכשיו אתן בקצרה חלק מהתוצאות שהייתי מעורב בהן. השתיים ראשונות הן כאלה שהייתי שמח מאוד אם הייתי יכול להדביק אתכם בהתלהבות שלנו כאשר ראינו את התוצאה, או הצלחנו להגיע אליה. מצד שני אנסה לשכנע אתכם כמה זה צנוע פרימיטיבי, קצה הקרחון ביחס למה שאנחנו רוצים. זה מפתיע. כשהתחלתי לעסוק בזה לפני 18 שנה, לא האמנתי שהדבר הראשון והשני שאראה לכם פה אלה דברים שנעשו עם אנשים עם אפים מלאכותיים. זה צעצוע נהדר, למה לא לעשות זאת? תוצאה שלישית היא הרבה יותר רצינית.

שתי התוצאות הראשונות זה לא מחקר של חמש שנים, עשינו את זה במשך שנה, שנה וחצי. אחת מעבודת מסטר, אחת חלק מדוקטורט; זה מספיק כדי להראות שבמקרים מסוימים אפשר להגיע לתוצאה הזאת. מעניין איך אפשר לעשות את זה באופן סדיר. זה מכשיר בשם Moses 2, הוא עולה 70 אלף דולר. נתנו לי במשך כמה שנים פה במכון מעבדה קטנה, והראיתי את המכשיר. מאיפה יש לי 70 אלף דולר לקנות מכשיר? אני איש מדעי מחשב, קניתי אותו ב-5000 דולר. איך? זה מכשיר מצוין, כמו חדש. קניתי אותו מהחברה שלנו שהתפרקה... החברה התפרקה, אחד ההסכמים היה שהחברה מעבירה סכומי כסף לנצט לעשות את המחקרים, אז השתמשנו בכסף הזה. מה שקרה הוא שכונס הנכסים של החברה מכר את השולחנות, הכיסאות, המחשבים הניידים, והיה תקוע עם המכונה הזאת, לא ידע מה זה... אמרתי לו: אקנה את זה ממך ב-5000 או 7000 דולר, מתוך הכסף שקיבלתי מהחברה, שזה כבר היה כסף שלי, כונס הנכסים לא יכול לשים יד על זה. זה שלי. אז מהכסף הזה קניתי את המכשיר מהחברה בזיל הזול.

היה לנו עוד מכשיר, שעבד בשיטה של חצי מהסנסורים, היו לו 16 סנסורים. זה היה מכשיר יותר זול בהרבה, זה שיש למכשיר יותר סנסורים לא עושה אותו יותר מדויק, הוא עובד בשיטה אחרת. היו לנו שני צעצועים - Cyranose320, ובעיקר Moses 2. הנה הדבר ראשון שכרמל הביא לי אחרי המון חודשים של עבודה – השקף הזה (חיזוי תערובות של ריחות). כמעט קפצתי מהכיסא. אחד הדברים שאתה צריך להשתלט עליו, זה מה קורה כאשר מערבבים ריחות. זה כמו לחשוב מה קורה כאשר מערבבים גלי אור. היה נחמד אם התערובות היו ליניאריות, קרוב לליניאריות, אבל הנה – קודם כל זה – מטילים אחוז גבוה של המידע על שני מימדים. בגרף הכחול אנחנו רואים ריחן ששמו Ethyl acetoacetate. המקבצים האלה זה הרחות חוזרות ונשנות של אותו ריח באותו ריכוז. כשאתה עובר מקלסטר לקלסטר, אתה מגדיל את הריכוז. הגדלת הריכוז נותנת אפקט כמעט ליניארי. בגרף הצהוב זה ריחן אחר, זה 50:50 ריכוזים של שניהם. זה נותן משהו כמעט מדויק ליניארי. הגרף הבורדו הוא 25% של אחד ו-75% של השני, כלומר 75% מהריח בגרף שמתחתיו ו-25% מהריח בגרף שמעליו, או להיפך. 75% מושכים את זה כלפי מטה. לא ידענו לעשות את זה בכל הקומבינציות, מעל שתיים הסתבכנו. אבל זה מה שהיינו רוצים לחקור.

עבודה שנייה נעשתה עם מסטרנט בשם שחם, ב-2003. זה דבר יותר מעניין. צריכים למפות בין הריחנים, לא יודעים את מרחב המולקולות, אבל לפחות יש שני אפים מלאכותיים, שונים לגמרי, בטכנולוגיה שונה. המספרים שאתה מקבל מכל ריחן הם שונים. בנינו אלגוריתם, הצלחנו לעשות זאת רק על האף היקר. בנינו פונקציה מתמטית שמעבירה את זה למרחב של האף היותר זול. איך אתה יודע אם עשית מיפוי נכון? מה שאתה עושה, אתה מסניף פה (מראה בשקף), מקבל את התוצאה הדיגיטלית, מפעיל פונקציה, זה מביא אותך למרחב של האף זה. איך אתה יודע שאתה קרוב למקום הנכון? אתה מסניף באף הזה את אותו ריחן, משווה את חתימת הריח האמיתית עם התוצאה

של הטרנספורמציה. זה מה שרואים בשקף הזה (זום לתוך החלק הצפוף של השקף הקודם), העיגולים זה הרחה אמיתית פה, המעוינים זה הרחה באף השני והפעלת הפונקציה. אם זה קרוב, זו עבודה נהדרת. אבל זה מספיק רחוק מאחרים כדי שנוכל להבחין ביניהם כשעושים זום אין, רואים את העיגולים והמעוינים. זה טיפה בעייתי, אבל זה גרף שכשהצלחנו לעשות אותו פעם ראשונה, קפצנו משמחה. הראינו שבאופן עקרוני אפשר לפתח מעבר של ריח בלי להבין את הכימיה, זה מבוסס על למידה. מניח שהיום יש שיטות של למידה שמאפשרות לעשות את זה טוב יותר.

לתוצאה יותר מאוחרת (ב-2010) הגענו עם סובל וחדד, שמרצה באוניברסיטת בר אילן. זו תוצאה שאנו אוהבים להראות, למרות שהיא צנועה מאוד ביחס לבעיה האמיתית. הצלחנו למצוא דרך אלגוריתמית לתת פרדיקציה על ריח מתוך פלט של אף מלאכותי. מה תגידו אם אשאל אם הריח נעים או לא, ויש סקאלה בין 1 ל-5. 5 זה גן עדן עלי אדמות, 1 זה גועל נפש, לא אתקרב לזה יותר בחיים; ו-2, 3, 4 באמצע. האם זה שונה מאדם למשנהו? קצת. אבל את החלק המעשי של העבודה עשינו עם מגוון של נסיינים כולל מארצות המזרח, המערב ואטיופיה.

שוב, זה די מרשים, מאוד שמחנו עם זה, אבל עדיין זה מאוד-מאוד מעט. זה כמו – אם נחזור לסיפור הקודם – שאגלגל לפה מצלמה, אעשה קליק, ואגיד ברזולוציה של 1 עד 5 אם החדר בהיר או כהה. מקובל לחשוב שבהירות זה בעצם הרכיב הראשון שצריך לשים לב אליו בדברים שקשורים לאור. בריח ההנאה זה רכיב ראשוני די אוניברסלי. הנאה זה הציר המרכזי של ריח, ואת זה יודעים לחזות ברזולוציה גסה ולא מאה אחוז. זה צעד אחד, היה קשה להגיע לזה.

בזה סיימתי את החלק היותר מדעי של ההרצאה, ואני רוצה להגיד מה קיוויתי להשיג בשלב זה. זאת לא בעיה כל כך דרמטית מבחינת מה זה יעשה למין אנושי, כמו פתרון בעיית הסרטן. לא. אבל זו בעיה מרתקת ומאוד קשה. אני חוזר, שאני לא רוצה לצאת אהבל גמור אם מחר בבוקר תצא הודעה מגוגל שמצאו פתרון. הפתרון יבוא, הפתרון הראשון יהיה גס מאוד. המערכת לא תדע להבחין בין עוגת שוקולד של אוסם לבין טורט זאכר אוסטרי מדהים עם מלא שוקולד, היא לא תבחין בין משחת שיניים כזאת או כזאת, לא תבחין בין סוגים שונים של קפה. השאלה אם היא תעבוד בצורה ברורה הכרה. אני חובב צילום, בעיקר מצלם יפה, טבע; אני חולה על צילום, יש לי עדשות יקרות, והתוצאה מדהימה מבחינת האיכות של התמונה. אני יכול לצחוק, אבל מי שיעשה את ההישג הגדול בצילום יוכל, יחד עם התמונה, להעביר גם ריח.

אני באתי לשכנע שהבעיה מרתקת, זה לא שמישהו הביא רעיון חדש לפתור משוואה, קשה לפתור את זה, כי לא יודעים מספיק על התפיסה האנושית של ריח. כשהיא תיפתר זה יהיה מדליק, כי האפשרויות והאפליקציות הן אינסופיות.

שאלה: הרבה פעמים הראשון שבהם יש לזה מימוש, למשל הרכיב הראשון שנראה כמו פרצוף. מה הריח של הרכיב הזה?

פרופ' דוד הראל: זה להראות בשני מימדים. עכשיו אני מדבר על ריח בשני מימדים, לא כל המימדים שיש בצילום.

לאה: האם יש ניסיון לעשות רזולוציה של הנגשת הריח לא על ידי הרחה אלא על ידי חוש אחר? פרופ' דוד הראל: שאלה מצוינת. לפני שהתחלת לשאול עמדתי להגיד שאת רוב השאלות שתשאלו אשלח לנועם סובל. בשנות ה-30 היה פיזיקאי זקן שנסע בארצות הברית עם נהג ובכל מקום נותן הרצאה. הנהג שמע את ההרצאה שלו, ואמר: שמעתי את הרצאה המון פעמים, בפעם הבאה אני אתן

את הרצאה במקומך, אתה תנחו. בפעם הבאה הנהג נתן את הרצאה, הפיזיקאי יושב מאחור. כשהוא מסיים את ההרצאה, מישהו שואל שאלה. והנהג אמר: זו שאלה כל כך קלה, אפילו הנהג שלי יודע, ונתן לפיזיקאי לענות... שאלה טובה, תשובה חלקית תקבלי עוד מעט.

שאלה: הצילום הראשון היה ב-1826, למעשה בספר בראשית אלוהים ברא את האדם בצלמו.

פרופ' דוד הראל: כן, עשה קליק ויצא אדם. צלם מקצועי...

החלק השני – יש לי סיבה לדבר על זה דווקא בקהל יותר רחב, לא דווקא קהל של אנשים שמתעסקים בשטח. כי לחלק מהאנשים פה יש תחושה: הוא צודק, מדע זה קשה, בסוף מדע טוב צריך קודם כל המון ידע. אני לא יכול להגיד שאני הולך לפתור את משפט פרמה, את השערת הרצף, שאם חשוב קצת אפתור את זה או אמצא תרופה לסרטן, לכך צריך שנים של ידע, צריך הרבה פעמים המון כסף, מעבדות יקרות, אנשים מוכשרים. זה סיפור. אני לא יכול סתם להגיד: חשוב קצת ואפתור. אבל מדי פעם צצה בעיה מעניינת מדעית שכל מה שצריך כדי לפתור אותה זה אפילו לא ידע מעמיק אלא היגיון בריא. השאלה שאשאל עכשיו באופן אינטימי, שקשורה לנושא העיקרי שעליו דיברתי, הסתובבה לי בראש שנתיים. אספר את השאלה ואת הבעיה שלי, ואנסה להציע פתרון. בגלל שהפתרון מבוסס על היגיון, אין פה שום גאונות וידע מעמיק, אולי לכם יהיה פתרון יותר טוב ומעניין. הבעיה היא כזאת: נניח שאלכס בא ואומר – פתרתי את הבעיה. הנה סְנִיפְרִי, הנה וּיפְרִי, תבדקו. מה נעשה? איך הוא יבדוק שהצליח וניתן לו קרדיט או פרס נובל אם נשתכנע הלוך וְשִׁכְנֹעַ הנגבה, שהבעיה נפתרה? זה לא כזה פשוט. באנלוגיה לגרהם בל, מי שעשה את החשיפה של העברת קול בטלפון, או באנלוגיה להעברת תמונה, שאדם אומר: הנה צילמתי את זה. ואנשים אומרים וואלה, הם יכולים לראות בצילום שאכן צילם את מה שנמצא בחוץ. נגמר הסיפור. אם היה בא לבית שלי ועושה את זה מהחלון שלי או ברחוב לידי, אפשר לראות שיש צילום. אותו דבר עם בָּל, כאשר מעבירים קול, אפשר לדעת שזה קורה. אם הוא היה שואל את עוזרו ווטסון מה השעה, הטלפון לא היה עונה, רק מעביר את הקול של מה שמדברים. אם אלכסנדר גרהם בל היה משמיע צליל גבוה של כינור, אולי זה היה מגיע לטלפון. אבל בריח, אני לא מאמין לאלכס, אביא מיץ תפוזים, הוא יריח מיץ תפוזים, אבל עם מה אנסה את זה במשרד? יש לי תה, קפה. איך אשתכנע שאכן זה הריח שעובר? לא מספיק דוגמא, שתיים או שלוש של ריח. מה עושים?

איך בודקים שאכן אלכס פתר את הבעיה?

שאלה מעניינת היא מה באמת רוצים. מי שמכיר את מבחן טיורינג, יודע שהמבחן מבקש להגיע למסקנה שלמחשב יש אינטלקט כמו לאדם. אם אדם ניטרלי לא יכול להבחין בין מחשב לאדם על ידי חצי שעה של שאלות ודימויים, חוסר יכולת להבחין זה אולי מה שהיינו רוצים להגיע אליו – שאי אפשר יהיה להבחין בין הריח המקורי לבין החיקוי במערכת של אלכס. אבל אני מחזיק את הרצון שלנו שהשחזור שלנו יהיה בר הכרה, למשל הבחנה שזה שוקולד, עוגת שוקולד של אוסם, משחת שיניים של קולגייט. זה מספיק לי. למה זה לא פשוט? הבעיה מרכזית היא חוסר היכולת שלנו לדבר ריח, לתאר ריח במילים. אני כן יכול להגיד שמיץ תפוזים זה קצת חמצמץ, דומה ללימון אבל יותר מתוק. אבל עליית גג של סבתא שלי, איך אוכל לתאר את הריח? או איך אני מתאר ללא מה הרחתי אתמול בבוקר בשוק הכרמל, כך שהיא תחוש את זה ותדע כמעט בדיוק מה הריח? אבל לא יודעים לדבר ריח. כל מה שמבוסס על "תראה את המכשיר, נריח", זה לא יעזור, כי לא נדע אם זה הריח המקורי. השאלה איך עושים את זה. הבעיה בחיקוי היא שאין חיקוי מושלם. גם בצילום, מאז 1826 עברו עוד מעט 200 שנה, ואם אצלם תמונה במצלמה שלי, תוכלו אפילו עם עין אחת להבחין בינה לבין הדבר האמיתי.

אומרים: מה בעיה, תיתן לאנשים ריח אמיתי וריח משוחזר, תבקש להשוות. אבל זה לא אמין, זה מנותק מהעולם, זה קליני לגמרי. זה כמו לקחת תמונה ולהשוות פיקסל-פיקסל. לפני הרבה שנים היה מערכון של "זהו זה", שמישהו הולך לאיבוד באיים הקריביים. בא מושנוב (הוא שיחק בזהו זה, נכון?) ואמר: אני מחפש אותו, אנחנו נמצא אותו, אפילו אם נצטרך ללכת קריב-קריב. להשוות את התמונה של ניספור נייפס לקריב קריב, זה לא הגיוני. אני רוצה לראות תמונה, ולהגיד: נכון זה זה? כמו יהודית רביץ בשיר "תמונה", אבל בנושא של ריח זה קשה.

זה לא אמין. אם נבקש מאנשים השוואה, הם לא יודעים להשוות ריחות כמו שצריך. הכי חשוב להבין שמבחן כזה שאומר "תשווה" הוא מנותק – ממה הוא מנותק? לאה: שאלתי אם אפשר להרגיש ריח בעזרת חושים אחרים.

פרופ' דוד הראל: אני לא פסיכולוג, לא פסיכופיזיקאי. כולנו מכירים שאם הולכים לאיזשהו מקום ונזכרים במשהו, אפילו אם הריח לא קיים, אתה מקבל תחושת ריח של הסבתא. אני רוצה להיכנס לחלק הטכני של ההערה שלך. אני הולך להציע מבחן איך לבחון את הטענה של אלכס. המבחן הזה מבוסס על שני רעיונות מאוד פשוטים, אתאר את האחד ואסביר מה עושים, אחר כך אטען שיש בעיה בזה, תעזרו לי לטעון שיש בעיה.

רעיון מרכזי נוגע לשאלה של לאה, לשלב את הריח בסביבת אודיו ווידאו, בסביבת תמונה וקול. אנחנו בוחרים שני צוותים של אנשים – הצוות המאתגר, יש להם תפקיד אחד, לכסח את אלכס, לעשות כל מה שהם יכולים כדי לשכנע שהוא ממש לא פתר את הבעיה או שרימה אותנו, לא הצליח. ויש צוות של טסטרים, בוחנים ניטרליים. הצוות המאתגר יוצא לעולם, מכין 100, 1000 קליפים, או כמה שהצוות רוצה, בעזרת מסרטה עם הסניפר של אלכס, קליפים של 10 שניות. הם הולכים למעבדה, לחנות תבלינים, לסבתא שלי, לאמזונס, מכינים קליפים שקולטים את הקולות, את המראות ומסניפים את הריח, ושומרים מאגר עצום של קליפים כאלה. עכשיו עושים מסדר זיהוי. לוקחים קבוצה ניטרלית של טסטרים, הם בג"ץ כמו שצריך להיות, ניטרליים, רוצים את האמת הצרופה. כל אחד מהצוות של הטסטרים יושב, יש לו 10 כפתורים ועוד כפתור ריח, כל לחיצה מראה על המסך 10 קליפים, שנבחרים באופן אקראי. בכל לחיצה מסתכלים על קליפ 1, קליפ 7, ועוד פעם 1. יש כפתור ריח שמשחרר ריח המתאים רק לאחד הקליפים. הטסטר צריך לומר: זה מכאן, מהקליפ הזה. זה מסדר זיהוי. עושים את זה המון פעמים עם טסטרים שונים, עם מגוון קליפים לפי מה שהם רוצים. משתמשים בסטטיסטיקה פשוטה, מנסים את זה מספיק פעמים על מגוון קליפים ואנשים, ומשתכנעים שהוא פתר את הבעיה. הרעיון דומה לזה שכשמריחים משהו בעולם האמיתי הוא כמעט תמיד מחובר גם למה שרואים ושומעים.

יש עם זה בעיה. בעיה לא טכנית מקצועית, אלא בעיה קונספטואלית. והיא מה? צוות המאתגרים יכולים להיות אפילו מרושעים, להכין קליפים שאין דרך בעולם שאדם יוכל לדעת. למשל אם אני מאתגר, על גבעה בגליל התחתון אני מסריט ציפורים עפות, פרחים פורחים ושמש, אַמְמָה? אני עומד עם הגב לפתח של מערה שיוצא ממנה ריח טחב מאוד חזק. אין מצב שהקבוצה הניטרלית של טסטרים תדע את זה. או שמראים משהו שמריח בשדה, ומביאים את זה קרוב לסניפר. אז לדרוש הצלחה בקליפים שמשלבים בין אודיו ווידאו לריח זה קשה.

איך נפתור את זה? התלבטתי בזה זמן מה, והתשובה שאני מציע היא להפוך את המבחן למותנה ואסימטרי. צרך לקחת בחשבון שאפשר גם היום לתפוס את המולקולות האמיתיות של ריח בסדר גודל

של שעות, ימים, ובעתיד אפשר יהיה לקטוף את המולקולות, לשמור בצנצנת מיוחדת, ואחרי שנה לשחזר את הריח האמיתי. אז מבקשים מהצוות המאתגר שמכין את הקליפים עם מסרטת וידיאו ומיקרופון והסניפר של אלכס, לתפוס גם את הריח. על כל קליפ יש אודיו, וידיאו, ריח אמיתי וריח משוחזר לידו. עכשיו עושים את הדבר הבא – זו הפילוסופיה מאחורי הרעיון – לא נדרוש מהקנדיט של אלכס יותר מאשר דורשים מאנשים שחוו את הריח האמיתי. עושים מסדר זיהוי מותנה. את קבוצת הטסטרים מחלקים לשניים – בוחנים א', בוחנים ב', הם לא יודעים אחד על השני, לא יודעים מיהו א' ומיהו ב', כולם יושבים בחדר עם 10 קליפים, הבוחנים מקבוצה א' מקבלים את הריח האמיתי, והבוחנים מקבוצה ב' מקבלים את הריח שאלכס יוצר בוויפר. אנחנו מתעלמים מהמבחנים שבהם חברי קבוצה א' לא יודעים לזהות. אם הבוחנים מקבוצה א' לא יודעים לשייך את הריח האמיתי, מי אנחנו שנדרוש זאת מאלכס? זה הכל. זה מסדר זיהוי, הרבה פעמים עושים סטטיסטיקה ומעיפים את האאוטליינס.

המבחן מהווה שילוב של חיקוי עם יכולת זיהוי. כי בעולם האמיתי, כאשר רוצים לתת למישהו אחר תחושה של ריח, זה בדרך כלל משולב במה שרואים ושומעים. זה עוקף את בעיית התיאור המילולי של ריח על ידי שילוב בסביבת תמונה וקול. לא צריך להגיד מילה, כלום, זה הקליפ ולא זה. המבחן פותר את בעיית האתגרים המרושעים על ידי זה שהוא אינו דורש מהחיקוי של אלכס יותר מאשר הוא דורש מהריח האמיתי.

הטסט הזה הוא לא דרמטי, אבל זה משהו שאנחנו צריכים שיהיה לנו בהישג יד לאותו יום שמישהו יגיד "פתרתי את הבעיה", כדי שנוכל להתמודד עם זה.

אנקדוטה קטנה – לפני שנה כתבתי על כך מאמר ושלחתי לכתב עת מאוד טוב, Nature. זה כתב עת שמתעסק בשיטות מחקר, טכניקות, ואני כתבתי על שיטת בחינה. העורכת היתה נחמדה, חזרה מהר, כתבה: אני מאוד אוהבת את המאמר, אבל לא העבירה את זה לשיפוט, כי אי אפשר לפרסם בכתב העת מאמר שמראה מבחן של טכנולוגיה שלא קיימת. אמרתי לעצמי: מבחן טיורינג הוצע ב-1950, השנה שנולדתי, והוא תיאר מבחן בטכנולוגיה שגם היום לא קיימת, רחוקה מלהיות קיימת. אין לנו מחשב אינטליגנטי כמו בן אדם, שיכול לעבוד בעיניים על מישהו שהוא אדם. ולא רק שזה פורסם, היה לזה אימפקט עצום חיובי, עם ביקורת. בסדר, לו יהי כן. אני מקווה שהמחקר על מבחן כזה – שהוא גם קל לקריאה, גם קל לתפוס אותו, הוא מעורר, אנשים מתווכחים אתי סביב המבחן הזה – יגרום לאנשים להתעמק בבעיה הגדולה באמת שהיא האפשרות לשחזר ריחות ולהעבירם בתקשורת. תודה רבה.