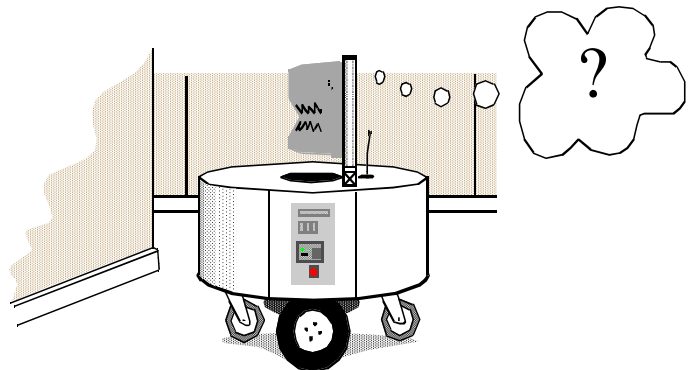


Индустријски мобилни роботи

Примена мобилних робота за унутрашњи транспорт у оквиру технолошког система подразумева висок степен интелигентног понашања самог мобилног робота. Интелигентно понашање мобилног робота настаје као резултат синергијског деловања свих појединачних (интелигентних) способности. За одређене специфичне случајеве потребно је досегнути и **ниво аутономног понашања**. Модерни приступ у развоју мобилних робота у домену технолошких система базиран је на аутономности у погледу зависности од (специјалне) транспортне инфраструктуре која није предвиђена у постојећем технолошком окружењу. Уколико би експлоатација мобилног робота зависила од распореда одговарајућих објеката онда би концепт примене интелигентних мобилних робота био доведен у питање.

Одређивање позиције и оријентације мобилног робота у односу на неки изабрани спољашњи референтни координатни систем назива се **локализација**. Аквизицијом и процесирањем информација добијених од сензора, мобилни робот треба да одреди свој положај (позицију и оријентацију). Услед грешака у управљачком и сензорском систему мобилног робота неизбежна је примена *метода теорије оцена* (тј. једноставније речено: оцена - естимација) током самог процеса. Примена *метода теорије оцена* омогућава мобилном роботу да у сваком тренутку у току експлоатације зна одговор на основна питања:

- ♦ Где сам?
- ♦ Где сам био?
- ♦ Где идем, где ми је циљ?
- ♦ Како да дођем до циља?



Прва два питања третирају проблем **локализације** (оцењивање положаја мобилног робота) док се друга два односе на **планирање** путање мобилног робота и акција у општем смислу.

Одговори на ова питања треба да реше следеће комплексне проблеме:

- **Проблем #1:** Локализација – одређивање положаја мобилног робота (позиција и оријентација) у технолошком окружењу;
- **Проблем #2:** Изградња мапе радног окружења;
- **Проблем #3 (Проблем #1 + Проблем #2):** Симултана локализација и изградња мапе радног окружења;
- **Проблем #4:** Генерисање плана + **Проблем #3**;
- **Проблем #5:** **Проблем #4** + Управљачка архитектура.

Класификација мобилних робота

Класификација мобилних робота с обзиром на број додатних степени слободе кретања:

- Један степен слободе;
- Два степена слободе;
- Три степена слободе.

Класификација с обзиром на начине остваривања кретања:

- Кретање помоћу ногу (тзв. *Legged* роботи) – хуманоидни, инсект роботи, ...
- Кретање котрљањем помоћу точкова, гусеница, ...
- Кретање по шинама (AGV).

Класификација с обзиром на окружење у коме се крећу:

- Роботи који се крећу по подлози (енгл. *Unmanned Ground Vehicles*);
- Роботи који егзистирају у ваздуху - (енгл. *Unmanned Aerial Vehicles* или беспилотне летелице);
- Роботи у воденом окружењу (енгл. *Autonomous Underwater Vehicles*).

Модел кретања

Кинематика, у најопштијој формулацији, може да буде дефинисана као *геометрија кретања*. Другим речима, применом математичке анализе успостављају се зависности између елементарних кинематичких величина, а на тај начин се и решава постављени проблем. Претпоставља се да је систем мобилног робота из једног положаја, изабраним кретањем, прешао у неки други положај, а приликом анализе тог кретања не занимају нас физичке величине (нпр. силе) које су произвеле кретање нити рецимо оне силе које се супротстављају самом кретању. У фокусу кинематичке анализе је само кретање, а узрок и последице су ирелевантни.

Кинематичка анализа мобилних робота је већ дуги низ година једна од најинтересантнијих области роботике, без обзира да ли се ради о "точкашима", "гусеничарима" или роботима који своје кретање остварују помоћу ногу. Неће звучати претенциозно ако се каже да је већина кинематичких модела мобилних робота већ успостављена у потпуности и потребно их је само проширити и уопштити у циљу потпуне имплементације на реалне проблеме.

Сви до сада изведени кинематички модели мобилних робота који своје кретање остварују помоћу точкова су детерминистичке природе. Карактер промене параметара процеса је детерминистички и самим тим се не дозвољава постојање ни најмање грешке. Наравно, у реалним проблемима детерминистички модели веома брзо покажу сва своја ограничења па је то један од основних разлога примене стохастичких метода. Наиме, стохастичке методе дозвољавају постојање грешке модела чиме се знатно добија на општости модела, а самим тим и на могућност имплементације на стварном моделу у реалном времену и окружењу.

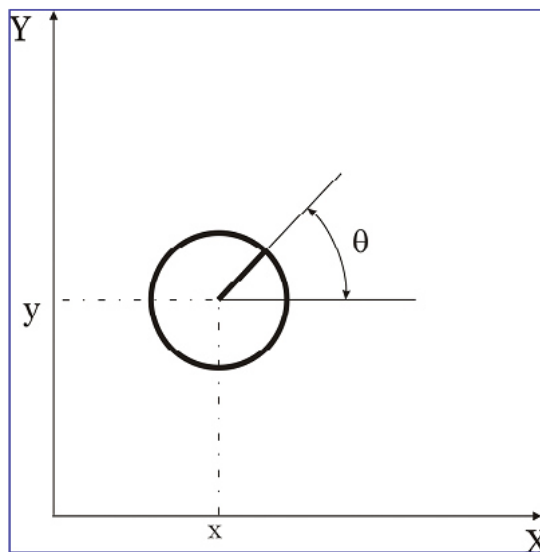
Са кинематичке тачке гледишта, у општем случају вектор стања система чине следеће компоненте:

$$x_t = \{x, y, z, \theta, \psi, \varphi\}^T \quad (1.1)$$

где су x , y и z – компоненте вектора које дефинишу позицију мобилног робота, а θ, ψ, φ углови који одређују оријентацију мобилног робота у односу на неки спољашњи координатни систем. У оквиру овог курса, кретање робота ће бити моделирано као *равно кретање*, па је сходно броју степени слободе¹ крутог тела у равни довољно дефинисати вектор стања чије су компоненте:

$$x_t = \{x, y, \theta\}^T \quad (1.2)$$

где x , y представљају координате тежишта мобилног робота у односу на неки спољашњи координатни систем а угао θ одређује оријентацију робота у односу на x осу (слика 1.1).



Слика 1.1

Дефиниција степени слободе мобилног робота у равни x - y

Модел промене стања је представљен следећом релацијом:

$$p(x_t / x_{t-1}, u_t) \quad (1.3)$$

Иако је термин *модел промене стања* погоднији, није грешка ни да се модел промене стања назове *модел кретања*. Наиме, мобилни робот из стања које је дефинисано вектором x_{t-1} у тренутку $t-1$ управљањем u_t прелази у стање које је одређено вектором x_t у тренутку t . С обзиром да мобилни робот мора да промени позицију, а у општем случају и оријентацију да би променио стање, сасвим је јасно да то може бити остварено једино кретањем. То је и основни разлог увођења термина *модел кретања*.

Приликом дефинисања модела кретања мобилног робота на основу кога ће локализација бити извршена, могуће је дефинисати два основна правца:

- ♦ *Модел кретања на основу брзина (Брзински модел кретања)*– у овом моделу транслаторна и угаона брзина кретања мобилног робота представљају управљања $u(t)$ која изазивају промену позиције и оријентације током експлоатације. Основна претпоставка овог модела кретања је да се транслаторна

¹ Број независних параметара који једнозначно дефинишу кретање тела.

и угаона брзина кретања могу контролисати, односно да се њима може директно управљати, што је и основна претпоставка на којој почива овај модел.

♦ *Модел кретања на основу пређеног пута* (Одометрија) – у овом моделу управљање $u(t)$ је дефинисано пређеним путем тачкова мобилног робота током тачно дефинисаног временског интервала. На основу читавања података са енкодера, а након интеграције, могу се одредити параметри пређеног пута неопходни за постављање модела. Међутим, посматрано са гледишта управљања роботом, пређени пут тачкова дефинитивно потпада под мерења (сензорске информације) и у суштини представља резултат управљања и рада мотора, ипак у овом моделу кретања основна претпоставка је та да управо пређени пут, као директан резултат управљања моторима мобилног робота, може бити усвојен за управљачку величину. Основни разлог овако усвојеног управљања $u(t)$ је могућност да се у оквиру управљачког софтвера мобилног робота пређени пут директно контролише унапред дефинисаним потпрограмом главног управљачког алгоритма на следећи начин: *move_forward(distance)* или *move_backward(distance)*.

Општи кинематички модел кретања мобилног робота базиран на стохастички *не постоји* и у суштини за сваки појединачни проблем потребно је извршити анализу, на чијим резултатима ће се формирати и сам модел. Основна поставка кинематичког модела кретања зависи како од основне кинематичке конфигурације мобилног робота (број тачкова, укупни број степени слободе, број степени слободе којима се може управљати, итд.), тако и од карактеристика окружења у коме робот остварује кретање, управљачког алгоритма, итд. Самим тим модел кретања се усваја и развија зависно од специфичности проблема.

Модел кретања на основу пређеног пута

Као што је у основној формулацији овог модела кретања речено, мерења очитана са енкодера, након интеграције, дефинишу се као *управљања* и као таква "прослеђују" Калмановом филтеру (разматраће се у оквиру предмета *Интелигентни технолошки систем*, на другој години МАС) у циљу одређивања позиције и оријентације мобилног робота.

Важно је напоменути да сваки модел који се заснива на *одометрији* користи искључиво *релативне координате*, односно, пређени пут се мери помоћу енкодера од неког положаја у коме је мобилни робот био у тренутку $t-1$ до неког положаја у тренутку t , што значи да је измерени пређени пут, заправо онај пут који је робот прешао између ова два узастопна положаја. Наравно, релативни пређени пут између ова два положаја неком математичком трансформацијом је неопходно "превести" у спољашњи координатни систем у коме је и дата мапа окружења, а у односу на који треба извршити локализацију. С друге стране, таква погодна трансформација координата, која би успоставила математичку зависност између спољашњег координатног система и координатног система робота у коме су и дефинисана померања, а тиме и мерења пређеног пута, *не постоји*, па је то заправо основни разлог што се користе искључиво релативна померања и мерења пређеног пута. Међутим, таква трансформација би у потпуности успоставила и одредила поменуто нелинеарно пресликавање, што је практично немогуће, с обзиром на немогућност дефинисања свих ограничења и реалних утицаја током кретања. Управо претходна чињеница представља кључни разлог постојања и развијања метода локализације мобилних робота.

У наставку ће бити представљен једноставан модел кретања изведен на основу пређеног пута мобилног робота. Модел може да се примени искључиво на оне мобилне

роботе који имају два погонска точка² која се могу окретати *потпуно независно* један од другог. Другим речима, управљањем смером обртања точкова контролише се скретање мобилног робота. На подсклоповима точкова постављени су енкодери који мере углове ротације (обртање точкова). Модел се може успоставити (математички доказати) без већих проблема, што се види у наставку. С обзиром да се анализа односи на раванско кретање, што значи да се претпоставља кретање робота током експлоатације у сваком временском тренутку, а да може бити описано са три независна параметра (степен слободе) дата вектором чије су компоненте очигледно:

$$x' = \{x \quad y \quad \theta\}^T \quad (1.4)$$

Одређивање позиције и оријентације за овакав тип мобилног робота, који своје кретање остварује помоћу точкова, своди се на интеграцију података очитаних са енкодера који се налазе на точковима, односно, сумирање пређеног пута погонских точкова у сваком инкременталном временском интервалу Δt :

$$\Delta x = \Delta s \cos(\theta + \Delta\theta / 2) \quad (1.5)$$

$$\Delta y = \Delta s \sin(\theta + \Delta\theta / 2) \quad (1.6)$$

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{b} \quad (1.7)$$

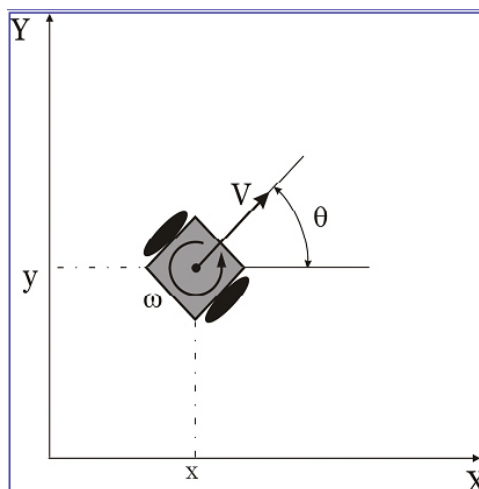
$$\Delta s = \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \quad (1.8)$$

где су

$(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta)$ - величине које дефинишу путању мобилног робота у току интервала Δt ,

$(\Delta s_d, \Delta s_l)$ - пређени пут десног и левог погонског точка респективно,

b - размак између точкова.



Слика 1.2

Мобилни робот са два независна погонска точка

² *Differential Drive Mobile Robots*, енг.

На слици 1.2 је приказан основни модел, одакле се на основу геометрије једноставно одређује вектор стања мобилног робота након извршеног *управљања*:

$$x' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s \cos(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta s \sin(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Даље се, након сређивања, одређује следећи израз:

$$x' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \cos(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}) \\ \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \sin(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}) \\ \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b} \end{bmatrix} \Rightarrow x' = f(x, y, \theta, \Delta s_d, \Delta s_l) \quad (1.10)$$

што представља основни кинематички модел кретања мобилног робота изведен на основу пређеног пута погонских тачкова. Из горње једнакости може се видети које величине утичу на промену али и на могућност израчунавања позиције и оријентације. Израз (1.10) заправо представља *модел кретања* (модел промене стања) $p(x_t / x_{t-1}, u_t)$ који фигурише у основним једначинама поменутог Калмановог филтера.

Наравно, претходна формулација *модела кретања базираног на одометрији* није и једина, постоји велики број развијених модела кретања од којих се издваја следећи модел (1.11). Наиме, за разлику од претходног модела кретања, у коме су управљања дефинисана релацијом $u(t) = \{\Delta s_d \ \Delta s_l\}^T$ у овом моделу се претпоставља да су управљања одређена на следећи начин:

$$u(t) = \{\bar{x}_{t-1} \ \bar{x}_t\}^T \quad (1.11)$$

где су

$\bar{x}_{t-1} = \{\bar{x}_{t-1} \ \bar{y}_{t-1} \ \bar{\theta}_{t-1}\}^T$ - вектор стања система који обухвата позицију и оријентацију мобилног робота у тренутку $t-1$,

$\bar{x}_t = \{\bar{x}_t \ \bar{y}_t \ \bar{\theta}_t\}^T$ - вектор стања система у тренутку t .

Наравно, управљања у овом моделу су управо релативна померања $(\bar{x}_{t-1}, \bar{x}_t)$, односно кретања мобилног робота посматрана из роботског координатног система при чему је веза између унутрашњег и спољашњег координатног система потпуно непозната.

Брзински модел кретања мобилног робота

За разлику од модела кретања изведеног на основу пређеног пута, *брзински модел* полази од претпоставке да се транслаторном и угаоном брзином мобилног робота може директно управљати сетом команди које је могуће задати мобилном роботу преко управљачког софтвера, а које мобилни робот треба да спроведе: *forward_velocity(numeric_value,time_duration)* или *angular_velocity(numeric_value,time_duration)*. Наравно, сада је апсолутно оправдано формирати вектор управљања на следећи начин:

$$u(t) = \{v_t \ \omega_t\}^T \quad (1.12)$$

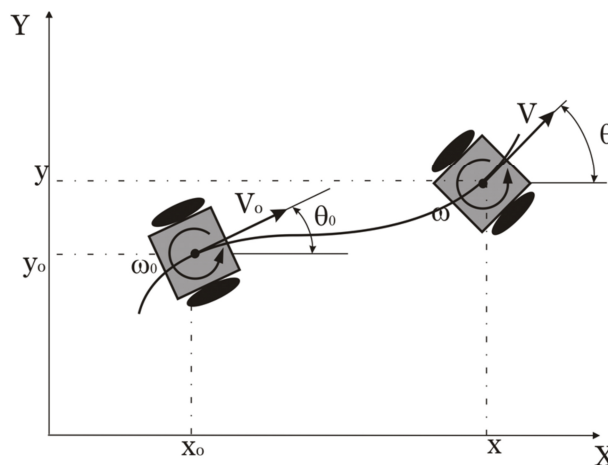
где су

v_t - транслаторна брзина кретања центра маса,

ω_t - угаона брзина мобилног робота.

Кинематички модел, приказан на слици 1.3 (континуални облик), дат је преко:

$$\begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} x_0 + \frac{1}{2} \int_0^t (R_d \omega_d + R_l \omega_l) \cos(\theta(t)) dt \\ y_0 + \frac{1}{2} \int_0^t (R_d \omega_d + R_l \omega_l) \sin(\theta(t)) dt \\ \theta_0 + \frac{1}{d} \int_0^t (R_d \omega_d - R_l \omega_l) dt \end{bmatrix} \quad (1.13)$$



Слика 1.3
 Кинематички модел (континуални облик)

где су:

x_0 - x координата тежишта мобилног робота у тренутку $t=0$

y_0 - y координата тежишта мобилног робота у тренутку $t=0$

θ_0 - Угао ротације мобилног робота у тренутку $t=0$

- R_l - Полупречник левог точка
 R_d - Полупречник десног точка
 ω_d - Угаона брзина десног точка
 ω_l - Угаона брзина левог точка
 d - Размак између точкова

Даље је основни кинематички модел дат у дискретном облику:

$$\begin{Bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \theta(k+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) + v(k)\Delta t \cos(\theta(k) + \omega(k)\Delta t) \\ y(k) + v(k)\Delta t \sin(\theta(k) + \omega(k)\Delta t) \\ \theta(k) + \omega(k)\Delta t \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

где су

- $x(k)$ - x координата мобилног робота у тренутку k
 $y(k)$ - y координата мобилног робота у тренутку k
 $\theta(k)$ - Угао ротације мобилног робота у тренутку k
 $\omega(k) = \frac{(R_d\omega_d - R_l\omega_l)}{d}$
 d - Размак између точкова
 $\Delta\theta = \omega(k)\Delta t$ прираштај угла θ
 R_l - Полупречник левог точка
 R_d - Полупречник десног точка
 ω_d - Угаона брзина десног точка
 ω_l - Угаона брзина левог точка

С обзиром да је овај модел дискретан модел кретања, као и претходни, ознаке за временске тренутке $k+1$ и k су идентички једнаке временским тренутцима $t+1$ и t респективно. Коришћењем слике 1.3 могуће је успоставити основне везе неопходне за извођење горњих релација. Важно је напоменути да Δt представља временски интервал трајања кретања из положаја k у положај $k+1$. Све претходне релације се веома лако изводе коришћењем основа кинематике крутог тела.

На основу једначина модела кретања изведених на основу пређеног пута и модела на основу брзина кретања мобилног робота могуће је изразити и дефинисати нелинеарну функцију $g(u_t, x_{t-1})$ која врши пресликавање вектора управљања (табела 1.1) и вектора претходног стања система (простор стања система у тренутку t) у простор стања система у тренутку $t+1$. Помоћу ове функције, након линеаризације Тејлоровим редом и срачунате Јакобијан матрице трансформације у сваком тренутку t , могуће је применити једначине Линеаризованог Калмановог филтера.

Оба модела кретања полазе од основних кинематичких поставки крутог тела у равни (три степена слободе), након чега следи увођење оних компоненти које су у реалним условима подложне генерисању грешке.

Табела 1.1
 Поређење модела кретања

Модел промене стања (Модел кретања)	Компоненте вектора управљања $u(t)$
Одометрија	$u(t) = \{\Delta s_d \ \Delta s_l\}^T$
Брзински модел	$u(t) = \{v_t \ \omega_t\}^T$

Приказани модели кретања мобилног робота који своје кретање остварује помоћу тачкова нису и једини који постоје. Наиме, могуће је дефинисати знатно више (ако не и бесконачно) модела кретања мобилних робота али су за потребе овог курса приказана два модела који се и највише примењују. Оба модела су изведена на основу *кинематичке формулације кретања* чиме се модел(и) знатно поједностављују. Међутим, изучавање кретања без утицаја сила, како дисипативних тако и погонских, није потпуно реалан модел кретања, али се за мобилне роботе који бораве у затвореном простору (канцеларије, болнице, универзитетски комплекси итд.) ова апроксимација може усвојити. У таквим срединама динамика мора бити разматрана у поступку локализације мобилног робота. "Екстраполација" кинематичких пробабилистичких модела на динамичке моделе је аналогна оригиналној формулацији кинематичких модела, односно након постављања основног модела, накнадно се додају стохастичке компоненте у циљу што бољег моделирања и сагледавања система мобилног робота и утицаја реалног окружења.

Као што се из претходног може закључити, *општи алгоритам* који би дефинисао начин и смернице избора (кинематички или динамички) пробабилистички модел кретања, да ли усвојити брзински или модел на основу пређеног пута, итд. *не постоји*, и једина препорука која се може дати је да се модели кретања изводе у зависности од основних карактеристика мобилног робота али и карактеристика окружења у коме ће се робот кретати.

Модел перцепције

Након увођења модела промене стања у анализу, преостало је да се изведе и усвоји *модел перцепције* $p(z_t / x_t, z_{1:t-1}, u_{1:t}) = p(z_t / x_t)$. Сходно основним једначинама Линеаризованог Калмановог филтера (предмет ИТС) неопходно је ваљано дефинисати и усвојити нелинеарну функцију $h(x_t)$ која ће моделирати перцепцију мобилног робота, аналогно дефинисању нелинеарне функције $g(u_t, x_{t-1})$ која моделира модел промене стања (модел кретања) система.

Сензори представљају подсистеме на основу којих систем мобилног робота прима информације из окружења. Након интерпретације ових информација мобилни робот на основу претходно дефинисаних метода одлучивања и планирања доноси одлуку о следећој акцији, покрету или путањи. Није тешко закључити да концепт *интелигентан*, а посебно концепт *аутономан*, почивају управо на сензорским информацијама које након тумачења "поруке" окружења, унутар управљачког подсистема, активирају актуаторе мобилног робота. С друге стране, приликом решавања проблема локализације сензори имају изузетно важну улогу, с обзиром да се Калманов филтер базира управо на *иновацији (иновационом вектору)* без кога не би било корака корекције, а тиме ни адекватног одређивања позиције и оријентације у простору, што би утицало и на успех мисије система мобилног робота.

Пре него што модел сензора, неопходан за комплетно извођење и дефинисање Линеарног Калмановог филтера (предмет ИТС) буде изведен, потребно је увести неке основне поделе сензора који су у употреби у области мобилне роботике.

Основна класификација сензора

Основна подела сензора у роботизици односи се на физичке величине које је потребно идентификовати. У том смислу, сензори се деле на:

- ◆ *Унутрашње* – сензори који мере величине унутар самог мобилног робота (број обрта електро мотора, енергетске резерве итд.)
- ◆ *Спољашње* – мере величине у односу на окружење у коме се мобилни робот креће (давачи пута, тактилни сензори итд.)

Следећа подела коју можемо направити односи се на енергетски утицај окружења на систем и обрнуто. Можемо дефинисати следеће сензоре:

- ◆ *Пасивне сензоре* – врше мерење енергетског утицаја окружења на систем мобилног робота (микрофони, камере)
- ◆ *Активне сензоре* – емитују енергију у окружење и врше мерење одговора окружења на енергетски стимуланс (ласер, ултразвук)

Као што може да се интуитивно закључи, што модел сензора буде "прецизнији", као и што буде обухватао више могућих "одговора" окружења, то ће и резултати процеса локализације бити више тачности и поузданости. Детерминистичким приступом моделирању перцепције мобилног робота не могу да се потпуно обухвате најважније карактеристике окружења, као ни грешке у мерењу које су апсолутно неизбежне. Уколико се управљачки алгоритам мобилног робота базира на детерминистичкој функцији перцепције окружења облика $z_t = f(x_t)$ и ако се полази од претпоставке *апсолутне тачности* сензора на основу чијег мерења ће доћи до акције/реакције актуатора, комплетан модел ће веома брзо, у експлоатацији, доживети "гомилање" грешака, како у сензорима тако и у актуаторима. Управо описана ситуација би резултирала поновном *калибрацијом* сензора и актуатора, па и интервенцијом на управљачком софтверу, а све то са собом повлачи и заустављање даље експлоатације мобилног робота. Наравно, овај процес би морао да се поновља велики број пута у току радног века робота што поприлично снижава ниво обављеног задатка, као и квалитет истог, а с друге стране цена експлоатације се знатно повећава.

Описана ситуација представља основни разлог увођења *пробабалистичке формулације перцепције мобилног робота*. Наиме, ако се модел сензора усвоји на следећи начин $p(z_t / x_t)$, са ваљано дефинисаном грешком мерења која је неизбежна у реалним условима, могуће је предупредити "гомилање" грешке у систему и на тај начин побољшати карактеристике и перформансе. Моделирање перцепције мобилног робота применом метода математичке вероватноће резултира знатно робуснијим системом, чиме се у реалним условима и реалном окружењу може значајно унапредити аутономност мобилног робота и могућност дефинисања адекватне акције, сходно стимулансу окружења. Наравно, моделирање перцепције мобилног робота претпоставља дефинисану грешку мерења, у опсегу који ће апсолутно задовољити постављене критеријуме, па је самим тим потребно посебно обратити пажњу на различите типове шума који се појављују у процесу експлоатације. Ако се предвиђање постојања и утицаја појединих шума ваљано уради онда ће то резултирати робуснијим системом који на погоднији начин може одговорити захтевима експлоатације али и карактеристикама окружења.

Основни модели перцепције мобилног робота

На основу претходних ставова може да се закључи да ваљано моделирање информација из околине представља један од основних задатака које је неопходно обавити у циљу подизања нивоа аутономности мобилног робота. С обзиром на "урођену" комплексност и мултидисциплинарност самог процеса, општи приступ није могуће дефинисати, па је потребно за сваки посебан случај развијати и примењивати одговарајућу стратегију. Наиме, опште посматрано, постоје два основна приступа моделирању перцепције мобилног робота:

- ◆ У првом приступу, основу представља прикупљање информација из окружења и интерпретација појединачних сензорских мерења без претходног знања о могућем одговору околине на сензорски стимуланс. Иако оваква формулација звучи помало апстрактно, увидом у други приступ може се сагледати комплетна слика.
- ◆ Други приступ полази од претпоставке да се у окружењу налази велики број *карактеристичних објеката* или *карактеристичних облика*³ који се релативно једноставно могу уочити употребом сензора и накнадно математички одредити. Овим приступом подразумева се да је уочавање и дефинисање карактеристичних облика у окружењу извршено у *off-line* режиму, а да се процес идентификације истих обавља посредством сензора у *on-line* режиму.

У наставку ће бити дат модел перцепције мобилног робота који је базиран на дефинисању карактеристичних облика у окружењу. *Апстрактност синтагме карактеристични облик* може бити демистификована карактеризацијом појединачних облика и њиховом класификацијом. Свако окружење може да се моделира, и на тај начин знатно поједностави, увођењем карактеристичних облика у анализу. За мобилни робот који своје кретање остварује ван затвореног објекта-простора, у природном окружењу, нпр. у пустињи могу се дефинисати *линија хоризонта на слици, контуре пута (ако пут постоји), рупа на путу, дрво, жбун, стена* итд. као типични, карактеристични облици. С друге стране, за мобилни робот који кретање остварује унутар неког затвореног простора (универзитетски комплекс, болница, школа, банка, итд.) могу се претходно уочити и дефинисати следећи карактеристични облици окружења:

- ◆ *Права линија* – настаје као пресек једног елемента окружења са другим елементом (нпр. пресек зидова са подом или плафоном просторије формира праву линију),
- ◆ *Угао* – настаје као пресек две или више правих линија,
- ◆ *Врата, праг, прозор*, итд.

Из претходног, није тешко закључити да свако окружење има своје карактеристичне облике и да се ти облици, у општем случају, не могу применити у неком другом окружењу са потпуно другачијим карактеристикама (дефинисање рупе у просторији тешко да би имало неког смисла, уосталом као и дефинисање праве линије или објекта типа: угао у пустињи). Број уочених и дефинисаних карактеристичних облика у окружењу може бити изузетно велики и на пројектанту је да их успешно препозна и математички дефинише. Основна предност која се остварује применом оваквог приступа, а односи се на проблем перцепције, се заправо односи на значајно смањење меморијских капацитета неопходних за успешно функционисање управљачког подсистема (а и софтвера унутар њега!), зато што се са унапред дефинисаним карактеристичним облицима окружења време потребно за њихову

³ *Features*, енг.

успешну идентификацију смањује. У оквиру следећег курса (ИТС) разматраће се модел перцепције базиран на идентификацији карактеристичних облика у окружењу и то искључиво за мобилне роботе који се крећу у затвореним просторима.

Модел перцепције базиран на идентификацији карактеристичних "облика" објекта

Основна идеја која се налази у темељу овог модела је претпоставка да се за сваки објекат у окружењу мобилног робота који је идентификован сензорским подсистемом, може одредити *расстојање* и *оријентација* објекта у односу на робот. Такође, претпоставља се да робот може, са готово апсолутном тачношћу, да идентификује сваку класу карактеристичних објекта ("облика") помоћу величине која се назива *вектор идентификације*, а који може имати и скаларану вредност, али у општем случају може бити и вектор. Вектором идентификације се може дефинисати боја објекта, висина, ширина, дебљина, итд. Функција идентификације карактеристичних објекта је дата као:

$$f(z_t) = \{f_t^1, f_t^2, \dots, f_t^n\} = \left\{ \begin{bmatrix} r_t^1 \\ \phi_t^1 \\ s_t^1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_t^2 \\ \phi_t^2 \\ s_t^2 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} r_t^n \\ \phi_t^n \\ s_t^n \end{bmatrix} \right\} \quad (2.1)$$

где су r_t^i и ϕ_t^i растојање и оријентација објекта респективно у односу на мобилни робот, док је n број карактеристичних објекта у једном мерењу и у општем случају је променљива величина. Ако са m_{jx} и m_{jy} обележимо координате положаја карактеристичних објекта, унапред представљених систему мобилног робота посредством *мапе окружења*, онда ће сензорски модел бити:

$$\begin{pmatrix} r_t^n \\ \phi_t^n \\ s_t^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(m_{jx} - x)^2 + (m_{jy} - y)^2} \\ a \tan 2(m_{jy} - y, m_{jx} - x) - \theta \\ s_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathcal{E}_{\sigma_r^2} \\ \mathcal{E}_{\sigma_\phi^2} \\ \mathcal{E}_{\sigma_s^2} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

где су грешке $\mathcal{E}_{\sigma_r^2}$, $\mathcal{E}_{\sigma_\phi^2}$ и $\mathcal{E}_{\sigma_s^2}$ моделиране нормалном расподелом и претпоставља се да су међусобно независне.

Управо горња једнакост (2.2) представља модел нелинеарне функције $h(x_t)$ која је неопходна да би се извршила локализација коришћењем Линеаризованог Калмановог филтера (курс ИТС).

Моделом перцепције мобилног робота на основу идентификације карактеристичних "облика" објекта из окружења који је управо изведен и приказан могуће је затворити круг и применити Линеаризовани Калманов филтер (курс ИТС). Модел перцепције претпоставља постојање мапе окружења представљене параметрима m_{jx} и m_{jy} , као и могућност тачног дефинисања сваког објекта појединачно. Сваки карактеристични објекат представљен је растојањем мереним у координатном систему мобилног робота, оријентацијом у односу на мобилни робот и вектором идентификације који успоставља везу између мерења у тренутку t и објекта који је препознат.

Иако уведени модел има значајне предности у односу на остале моделе перцепције, он ипак показује и неке "урођене" недостатке. Наиме, ако се сходно основној поставци задржимо на мобилним роботима који се крећу у објектима, онда ће проблеми везани за сам робот настати оног тренутка када у једном тренутку буде препознао исувише велики број карактеристичних објеката истог типа. Улазак у конференцијску салу или учионицу, из угла мобилног робота може бити поприлично проблематично с обзиром да ће робот препознати велики број карактеристичних "облика" типа права линија (ногаре столица) што може изазвати праву конфузију у управљачког алгоритму и резултирати прекидом рада. Наравно, кретање и доношење одлука у оваквој ситуацији ипак може бити остварено осмишљавањем алгоритма који би био у стању да разреши новонасталу дилему.