AZ SML MODULNYELVE

Modulok az SML-ben

- A modul: (1) *fordítási egység,* (2) a *csoportosítás* és az *elrejtés*, azaz az *absztrakció* eszköze.
- Szignatúra (`signature`): specifikációs modul; a struktúra *specifikációja*, *„típusa”*.
- Struktúra (`structure`): implementációs modul; a szignatúra *megvalósítása*.
- Funktor (`functor`): *struktúrával* paraméterezhető (generikus) modul; eredménye egy *struktúra*.
- Egy struktúra akkor és csak akkor valósít meg egy szignatúrát, ha a struktúra kielégíti a szignatúra által támasztott összes követelményt (később pontosítjuk).
- Modul-elnevezések az MOSML-ben (ld. *Moscow ML Language Overview):*
  - modul *(module):* a struktúra és a funktor *közös* megnevezése;
  - (fordítási, ill. lefordított) *egység* (compilation, ill. compiled *unit):* egy struktúra vagy szignatúra lefordítható, ill. lefordított (tárgykódú) változata.
- Állománynév-kiterjesztések az MOSML-ben
  - `.sml` (SML, opcionális): struktúra vagy funktor,
  - `.sig` (SML, kötelező): szignatúra,
  - `.ui` (MOSML, kötelező): szignatúra lefordított változata (unit interface code),
  - `.uo` (MOSML, kötelező): struktúra lefordított változata (unit object code).

SZIGNATÚRA ÉS STRUKTÚRA

Szignatúra és struktúra

A szignatúra alapváltozata

`sig` *`specs`* `end` alakú *szignatúrakifejezés,*

ahol a *`specs`* specifikációsorozat az alábbi elemeket tartalmazhatja:

- típusspecifikáció `type (`$tyvar_1$`, ..., `$tyvar_n$`) `*`tycon`* `[ = `*`typ`* `]` alakban, ahol *`typ`* opcionális;
- adattípus-specifikáció (a `datatype`-deklarációval azonos alakban);
- kivételspecifikáció `exception `*`excon`* `of `*`typ`* alakban;
- értékspecifikáció `val `*`id`* `: `*`typ`* alakban.

A struktúra alapváltozata

`struct` *`decs`* `end` alakú *struktúrakifejezés,*

ahol a *`decs`* deklarációsorozat az alábbi elemeket tartalmazhatja:

- típuskonstruktort létrehozó típusdeklaráció;
- új (felhasználói) adattípust létrehozó adattípus-deklaráció (`datatype`-deklaráció);
- kivételkonstruktort (állandót vagy függvényt) létrehozó kivételdeklaráció;
- megadott típusú új nevet (névkonstruktort) létrehozó értékdeklaráció.

Szignatúra és struktúra (folyt.)

A szignatúra-deklaráció

- `signature` *`sigid`* `=` *`sigexp`* alakú, ahol
  - *`sigid`* egy szignatúranév,
  - *`sigexp`* pedig egy szignatúrakifejezés.
- A szignatúranév a szignatúrakifejezés rövidítése, szinonimája.

A struktúra-deklaráció egyszerű változata

- `structure` *`strid`* `=` *`strexp`* alakú, ahol
  - *`strid`* egy struktúranév,
  - *`strexp`* pedig egy struktúrakifejezés.
- A struktúranév a struktúrakifejezés rövidítése, szinonimája.

A struktúra-deklaráció bonyolultabb változata

- a struktúra *szignatúrához kötése,* amely kétféle lehet:
  - áttetsző (opál, opaque): `structure` *`strid`* `:>` *`sigid`* `=` *`strexp`*
  - átlátszó (transzparens, transparent): `structure` *`strid`* `:` *`sigid`* `=` *`strexp`*

Példa: a `KCsiga` és a `Csiga` szignatúra

- A `KCsiga` struktúra (a keretprogram) szignatúrája

```
signature KCsiga =
sig
  val csigaBe : string -> TCsiga.feladvanyleiro
  val csigaKi : string * TCsiga.csigatabla list -> unit
  val megold  : string * string -> string
end
```

- A `Csiga` struktúra (a főmodul) szignatúrája

```
signature Csiga =
sig
  val buvosCsiga :
        TCsiga.feladvanyleiro -> TCsiga.csigatabla list
end
```

Mindkét szignatúra csupán `val` *`id`* `:` *`typ`* alakú *értékspecifikációkat* tartalmaz.

Példa: a `TCsiga` struktúra és törzsszignatúrája

- A `TCsiga` struktúra (a típusleíró modul) és *törzsszignatúrája*

```
structure TCsiga =
struct
  type meret          = int
  type ciklus         = int
  type sorszam        = int
  type oszlopszam     = int
  type ertek          = int
  type adottElem      =
    sorszam * oszlopszam * ertek

  type feladvanyleiro =
    meret * ciklus * adottElem list

  type ertekVagyUres  = int
  type sor            =
    ertekVagyUres list

  type csigatabla     =
    sor list
end
```

```
(* TCsiga.sml
   törzsszignatúrája *)
type meret          = int
type ciklus         = int
type sorszam        = int
type oszlopszam     = int
type ertek          = int
type adottElem      =
  int * int * int

type feladvanyleiro =
  int * int * (int * int * int) list

type ertekVagyUres  = int
type sor            =
  int list

type csigatabla     =
  int list list
```

Példa: a `TCsiga` struktúra és törzsszignatúrája (folyt.)

- *Törzsszignatúra* (principal signature): egy struktúra összetevőinek *legáltalánosabb* leírása.
- `TCsiga` csupa típusspecifikációt tartalmaz

  `type (`$tyvar_1$`, ..., `$tyvar_n$`) tycon [ = typ ],`

  pontosabban

  `type tycon = typ`

  alakban.
- Egy struktúra szignatúra-megkötés nélkül nem rejti el a részleteket, azaz *gyenge absztrakciót* valósít meg.

Példa: változatok a `TCsiga` struktúrára és szignatúrára

- Struktúra *átlátszó* szignatúrával

```
structure TCsiga : TCsiga =
struct
  type meret          = int
  ...
  type adottElem      =
       sorszam * oszlopszam * ertek
  type feladvanyleiro =
       meret * ciklus * adottElem list
  type ertekVagyUres  = int
  type sor            =
       ertekVagyUres list
  type csigatabla     = sor list
end
```

- Struktúra *áttetsző* szignatúrával

```
structure TCsiga :> TCsiga =
struct
  type meret          = int
  ...
  type adottElem      =
       sorszam * oszlopszam * ertek
  type feladvanyleiro =
       meret * ciklus * adottElem list
  type ertekVagyUres  = int
  type sor            =
       ertekVagyUres list
  type csigatabla     = sor list
end
```

- Szignatúra (a részleteket *elrejtő)* absztrakt adattípus megvalósításához

```
signature TCsiga =
sig
    type feladvanyleiro
    type csigatabla
end
```

Példa: sort megvalósító szignatúra és struktúra

```
signature QUEUE =
sig
    type 'a queue                                  típusspecifikáció
    exception Empty                                kivételspecifikáció
    val empty : 'a queue                           értékspecifikációk
    val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
    val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue         Minden típus és érték polimorf!
end

structure Queue_as_lists =
struct
    type 'a queue = 'a list * 'a list              típuskonstruktor deklarálása
    exception Empty                                kivételkonstruktor deklarálása
    val empty = (nil, nil)                         névkonstruktorok deklarálása
    fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
    fun remove (nil, nil) = raise Empty
      | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
      | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

Példa: sort megvalósító szignatúra és struktúra (folyt.)

- Struktúra áttetsző szignatúrával

```
structure Queue_as_lists :> QUEUE =
struct type 'a queue = 'a list * 'a list
       exception Empty
       val empty = (nil, nil)
       fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
       fun remove (nil, nil) = raise Empty
         | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
         | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

- Struktúra átlátszó szignatúrával

```
structure Queue_as_lists : QUEUE =
struct type 'a queue = 'a list * 'a list
       exception Empty
       val empty = (nil, nil)
       fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
       fun remove (nil, nil) = raise Empty
         | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
         | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

Példa: sort megvalósító szignatúra és struktúra (folyt.)

- Struktúra *bővített* áttetsző szignatúrával

```
structure Queue_as_lists :>
            QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list =
struct type 'a queue = 'a list * 'a list
       exception Empty
       val empty = (nil, nil)
       fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
       fun remove (nil, nil) = raise Empty
         | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
         | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

- Áttetsző szignatúra-kötésnél a típusok megvalósítása rejtve marad, vagyis a *látható szignatúra* **független** a struktúra megvalósításától (pl. `type 'a queue = 'a queue`).
- Átlátszó szignatúra-kötésnél a típusok megvalósítása láthatóvá válik, vagyis a *látható szignatúra* **függ** a struktúra megvalósításától (pl. `type 'a queue = 'a list * 'a list`).
- A megvalósítástól független modulrendszer kialakításához áttetsző szignatúra-kötést kell alkalmazni. Ezt garantálja az `mosmlc` fordító *`structure`*-módban.

Példa: sort megvalósító szignatúra és struktúra (folyt.)

- Szignatúra-öröklődés specializációval

```
signature QUEUE_AS_LISTS =
    QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- Szignatúra-öröklődés inklúzióval és specializációval (ekvivalens az előző változattal)

```
signature QUEUE_AS_LISTS =
sig
    include QUEUE
end where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- Struktúra áttetsző szignatúrával

```
structure Queue_as_lists :> QUEUE_AS_LISTS =
struct
    type 'a queue = 'a list * 'a list
    exception Empty
    val empty = (nil, nil)
    fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
    fun remove (nil, nil) = raise Empty
      | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
      | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

Példa: sort megvalósító szignatúra és struktúra (folyt.)

- Szignatúra-öröklődés inklúzióval és az eredeti szignatúra bővítésével

```
signature QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
sig
    include QUEUE
    val is_empty : 'a queue -> bool
end where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- Struktúra-öröklődés (hibás: `Q` "zárva" van, komponensei a `struct ...end` kifejezésben nem láthatók)

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
   structure Q = Queue_as_lists :
                        QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list
end
```

- Struktúra-öröklődés (hibás: `is_empty` nincs definiálva `Queue_as_lists`-ben)

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct
    structure Q : QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list =
                                                        Queue_as_lists
    open Q
end
```

Példa: sort megvalósító szignatúra és struktúra (folyt.)

- Struktúra-öröklődés

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct  structure Q = Queue_as_lists
        open Q
        fun is_empty (nil, nil) = true | is_empty _ = false
end
```

- Struktúra-öröklődés, ekvivalens az előzővel

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct  structure Q : QUEUE_AS_LISTS = Queue_as_lists
        open Q
        fun is_empty (nil, nil) = true | is_empty _ = false
end
```

- Struktúra-öröklődés, ekvivalens az előzővel

```
structure Queue_as_listsWithEmpty :> QUEUE_AS_LISTS_WITH_EMPTY =
struct  structure Q = Queue_as_lists : QUEUE_AS_LISTS
        open Q
        fun is_empty (nil, nil) = true | is_empty _ = false
end
```

SZIGNATÚRA-ILLESZKEDÉS

Szignatúra-illeszkedés

- Mikor tekinthető egy struktúra egy szignatúra megvalósításának?

  Akkor, ha a struktúra *az összes olyan komponenst definiálja* és az *összes olyan típusdefiníciót kielégíti,* amelyeket a szignatúra elvár. Másszóval definiálja a szignatúrában megadottal

  - ekvivalens típusú *kivételkomponenseket,*
  - kompatíbilis (azaz legalább annyira általános) típusú *értékkomponenseket,*
  - azonos aritású (paraméterszámú) és – ha definiálja – ekvivalens definíciójú *típuskomponenseket.*

- Csakhogy egy struktúra a szignatúrájához képest, többek között

  - *több komponenst* definiálhat;
  - *általánosabb típusú értékeket* definiálhat (ami az újrafelhasználást segíti elő);
  - `datatype-deklarációt` használhat `type`-deklaráció helyett, *adatkonstruktort* definiálhat érték helyett (ami az adatabsztrakciót teszi lehetővé);
  - a *deklarációk sorrendje* tetszőleges lehet (ami növeli a flexibilitást).

- A feltett kérdésre ezért pontosabb a következő válasz:

  Egy struktúra akkor és csak akkor tekinthető egy szignatúra megvalósításának, ha a struktúra ún. *törzsszignatúrája* illeszkedik az adott szignatúrára.

Törzstípus, törzsszignatúra

- Egy érték *törzstípusa* (principal type, principal type scheme) az adott értéket jellemző *legáltalánosabb* (most general) típuskifejezés.
- Minden jóldefiniált értéknek van törzstípusa. Pl. ha `fun I x = x`, akkor `I : 'a -> 'a`.
- Egy struktúra *törzsszignatúrája* (principal signature) a komponenseihez rendelhető *legáltalánosabb* (most general) leírás.
- Minden jóldefiniált struktúrának van törzsszignatúrája.
- A típusellenőrzéshez elegendő a törzsszignatúra ismerete, a struktúrát magát nem kell vizsgálni.
- Egy struktúra törzsszignatúrája a következőképpen állítható elő: ha a deklaráció
  - `type (`$tyvar_1$`, ..., `$tyvar_n$`) tycon = typ` alakú, akkor a törzsszignatúra az ezzel azonos specifikációt tartalmazza;
  - `datatype (`$tyvar_1$`, ..., `$tyvar_n$`) tycon = `con_1` of `typ_1` | ... | `con_k` of `typ_k alakú, akkor a törzsszignatúra az ezzel azonos specifikációt tartalmazza;
  - `exception id of typ` alakú, akkor a törzsszignatúra az ezzel azonos specifikációt tartalmazza;
  - `val id = exp` alakú, akkor a törzsszignatúra a `val id : typ` specifikációt tartalmazza, ahol `typ` az `exp` kifejezés törzstípusa.

Szignatúra-illeszkedés (folyt.)

- Egy *szignatúra-jelölt* (candidate signature) akkor és csak akkor illeszkedik egy *célszignatúrára* (target signature), ha az összes olyan komponenst és típusdefiníciót tartalmazza, amelyet a *célszignatúra* specifikál.
- Pontosabban, a szignatúra-jelöltnek tartalmaznia kell a célszignatúra
  - összes típuskonstruktorát, mégpedig azonos aritással (paraméterszámmal) és – ha definiálja – ekvivalens definícióval;
  - összes `datatype`-deklarációját, mégpedig úgy, hogy az adatkonstruktoroknak ekvivalens típusúaknak kell lenniük;
  - összes `exception` deklarációját, mégpedig úgy, hogy az argumentumaiknak, ha vannak, ekvivalens típusúaknak kell lenniük;
  - minden értékdeklarációját, mégpedig úgy, hogy a típusuknak legalább annyira általánosnak kell lenniük, mint a célszignatúrában.
- A szignatúra-jelöltnek a célszignatúránál lehet több komponense, és több típusdefiníciót tartalmazhat, de nem lehet benne kevesebb egyikből sem.
- A szignatúra-jelölt a célszignatúra *gyengített* változata, mivel a célszignatúra összes tulajdonsága igaz a szignatúra-jelöltre is.

Szignatúra-illeszkedés: QUEUE, QUEUE_WITH_EMPTY, QUEUE_AS_LISTS

```
signature QUEUE =
sig  type 'a queue
     exception Empty
     val empty : 'a queue
     val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
     val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
end

signature QUEUE_WITH_EMPTY =
sig  include QUEUE
     val is_empty : 'a queue -> bool
end

signature QUEUE_AS_LISTS =
     QUEUE where type 'a queue = 'a list * 'a list
```

- `QUEUE_WITH_EMPTY` illeszkedik `QUEUE`-ra, mert kielégíti `QUEUE` összes elvárását.

  `QUEUE` azonban a hiányzó `is_empty` miatt nem illeszkedik `QUEUE_WITH_EMPTY`-re.
- `QUEUE_AS_LISTS` illeszkedik `QUEUE`-ra, csak abban különbözik tőle, hogy `'a queue`-t specifikálja.

  `QUEUE` azonban nem illeszkedik `QUEUE_AS_LISTS`-re, mert a `QUEUE`-beli `'a queue` nem ekvivalens `'a list * 'a list`-tel.

Szignatúra-illeszkedés: QUEUE, QUEUE_AS_LIST

- ```
  signature QUEUE =
  sig  type 'a queue
       exception Empty
       val empty : 'a queue
       val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
       val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
  end

  signature QUEUE_AS_LIST =
  sig  type 'a queue = 'a list
       exception Empty
       val empty : 'a list
       val insert : 'a * 'a list -> 'a list
       val remove : 'a list -> 'a * 'a list
  end
  ```
- Úgy vélhetjük, hogy QUEUE_AS_LIST nem illeszkedik QUEUE-ra, annyira különbözik tőle.
- Csakhogy a fentivel ekvivalens az alábbi definíció:

  ```
  signature QUEUE_AS_LIST =
       QUEUE where type 'a queue = 'a list
  ```

  és az utóbbi nyilvánvalóan illeszkedik QUEUE-ra.
  ```

Szignatúra-illeszkedés: MERGEABLE_QUEUE, MERGEABLE_INT_QUEUE

- Említettük, hogy a szignatúra-jelöltben az értékek típusa általánosabb lehet, mint a célszignatúrában.
- A szignatúra-illeszkedés együtt járhat azzal, hogy a polimorf típusokat konkrét típusokra cseréljük.
-
```
signature MERGEABLE_QUEUE =
sig
    include QUEUE
    val merge : 'a queue * 'a queue -> 'a queue
end

signature MERGEABLE_INT_QUEUE =
sig
    include QUEUE
    val merge : int queue * int queue -> int queue
end
```
- A `MERGEABLE_QUEUE` szignatúra-jelölt illeszkedik a `MERGEABLE_INT_QUEUE` célszignatúrára, mert az előbbiben specifikált polimorf `merge` függvény típusát leíró típuskifejezés típusváltozója leköthető az `int` típussal. Fordítva nem igaz.

Szignatúra-illeszkedés: RBT_DT, RBT

```
signature RBT_DT =
sig  datatype 'a rbt = Empty
                     | Red of 'a rbt * 'a * 'a rbt
                     | Black of 'a rbt * 'a * 'a rbt
end

signature RBT =
sig  type 'a rbt
     val Empty : 'a rbt
     val Red : 'a rbt * 'a * 'a rbt -> 'a rbt
end
```

- Az RBT_DT (red-black-tree datatype) szignatúra-jelölt illeszkedik az RBT célszignatúrára, mert az RBT_DT-ben a datatype deklarációval specifikált típus és adatkonstruktorai illeszkednek az RBT-ben specifikált 'a rbt absztrakt típusra és a két értékspecifikációra (Empty és Red). Fordítva nem igaz.
- RBT_DT ugyanis a következő típust, ill. adatkonstruktorokat specifikálja:

```
type 'a rbt
con 'a Empty : 'a rbt
con 'a Red : 'a rbt * 'a * 'a rbt -> 'a rbt
con 'a Black : 'a rbt * 'a * 'a rbt -> 'a rbt
```

Szignatúra-illeszkedés (folyt.)

- Összefoglalásként most már még pontosabban válaszolhatunk a kérdésre:

  Mikor tekinthető egy *struktúra-jelölt* egy *célszignatúra* megvalósításának?
- Akkor és csak akkor, ha a struktúra-jelölt *törzsszignatúrája* illeszkedik a célszignatúrára.
- Nyilvánvaló, hogy minden struktúra kielégíti a törzsszignatúráját (ui. az illeszkedési reláció reflexív).
- Bármely szignatúra, amelyet egy struktúra képes megvalósítani, nem lehet *gyengébb* az adott struktúra törzsszignatúrájánál.
- Vagyis a törzsszignatúra a *leggyengébb* szignatúra, amelyet egy struktúra megvalósíthat.

SZIGNATÚRA-KÖTÉS

Szignatúra-kötés

- *Szignatúra-kötéssel* (signature ascription) írjuk elő, hogy egy struktúra valósítson meg egy szignatúrát.
- A szignatúra-kötés *erősíti* a struktúra szignatúráját az összes további felhasználás számára.
- Kétféle szignatúra-kötés van az SML-ben:
  - átlátszó vagy *leíró* (transparent, *descriptive):* a struktúra *látható szignatúrája* az adott struktúrában definiált típusokkal *bővített* célszignatúra lesz,
  - áttetsző vagy *korlátozó* (opaque, *restrictive):* a struktúra *látható szignatúrája* a célszignatúra lesz, bővítés nélkül.
- A szignatúra-kötés mindkét változata *elrejti azokat a komponenseket,* amelyeket a célszignatúra nem specifikál.
- A moduláris programozás biztonsága megköveteli a típusinformációk gondos kezelését. A láthatóvá tételnek és az elrejtésnek egyformán fontos a szerepe.
- Az áttetsző szignatúra-kötéssel *a típusinformáció láthatóságát korlátozzuk.*
- Az átlátszó szignatúra-kötéssel *a típusinformációt láthatóvá tesszük.*

Struktúra-deklaráció szignatúra-kötéssel

- Már láttuk a kétféle szignatúra-kötés használatát struktúra-deklarációkban:
  - átlátszó: `structure` *`strid`* `:` *`sigexp`* `=` *`strexp`*
  - áttetsző: `structure` *`strid`* `:>` *`sigexp`* `=` *`strexp`*
- A típusellenőrzés során szignatúrához kötött struktúra-deklaráció esetén meg kell vizsgálni, hogy *strexp* megvalósítja-e *sigexp*-et? Ennek eldöntéséhez a fordító
  - meghatározza *strexp* $sigexp_0$ törzsszignatúráját, és megpróbálja illeszteni a *sigexp* célszignatúrára.
- Ha sikerül az illesztés, előállítja a bővített *sigexp'* szignatúrát úgy, hogy *sigexp*-et bővíti a $sigexp_0$-ban lévő típusdeklarációkkal, majd
- a struktúranévhez köti a szignatúrát a kötés előírt módja szerint: a struktúra látható szignatúrája
  - átlátszó szignatúra-kötés esetén *sigexp'*,
  - áttetsző szignatúra-kötés esetén *sigexp* lesz.

Struktúra-deklaráció szignatúra-kötéssel (folyt.)

- A szignatúrához kötött struktúra-deklaráció kiértékelését a fordító így folytatja:
  - kiértékeli *strexp*-et;
  - előállítja az eredményül kapott érték egy *nézetét* úgy, hogy eldobja azokat az értékeket, amelyeket a *sigexp* célszignatúra nem tartalmaz;
  - a *strid* nevet ehhez a nézethez köti.
- A leírtakból is kitűnik, hogy az átlátszó szignatúra-kötés az áttetsző szignatúra-kötés *speciális esete:* a bővített szignatúrát a programozó maga is előállíthatná (technikai nehézségektől eltekintve, ui. néha nem férhet hozzá a szükséges információhoz).
- Az *áttetsző szignatúra-kötés* legfontosabb célja az adatabsztrakció elősegítése. Tekintsük a példát a következő dián!
- Az áttetsző szignatúra-kötés garantálja `'a Queue_as_lists.queue` *absztrakt* voltát, így *kizárólag* az `empty`, `insert` és `remove` műveleteket lehet alkalmazni ilyen típusú értékekre.
- A programozó *nem használhatja ki,* hogy most a `'a Queue_as_lists.queue` típust listákból álló párral valósítjuk meg.
- Ezért a szignatúrát megvalósító struktúra szabadon, a többi programrész konzisztenciájának megsértése nélkül módosítható.

Struktúra-deklaráció áttetsző szignatúra-kötéssel: QUEUE, Queue_as_lists

- Az elmondottak illusztrálására nézzük a már látott példát:

```
signature QUEUE =
sig
    type 'a queue
    exception Empty
    val empty : 'a queue
    val insert : 'a * 'a queue -> 'a queue
    val remove : 'a queue -> 'a * 'a queue
end

structure Queue_as_lists :> QUEUE =
struct
    type 'a queue = 'a list * 'a list
    exception Empty
    val empty = (nil, nil)
    fun insert (x, (bs, fs)) = (x::bs, fs)
    fun remove (nil, nil) = raise Empty
      | remove (bs, nil) = remove (nil, rev bs)
      | remove (bs, f::fs) = (f, (bs, fs))
end
```

Struktúra-deklaráció áttetsző szignatúra-kötéssel (folyt.)

- A típusinformáció elrejtése a reprezentáció (ábrázolás) invariánsait is elszigeteli az absztrakció megvalósításától.
  - Az `'a Queue_as_lists.queue` típust egy olyan absztrakt gép állapottípusának tekinthetjük, amelynek csak három parancs adható: `empty` (amely a kezdőállapotot hozza létre), `insert` és `remove`.
  - A `Queue_as_lists` struktúrán belül invariáns állításokkal jellemezhetjük az absztrakt gép belső állapotát.
  - Az adatabsztrakció elegáns eljárást nyújt az invariáns állítások alkalmazásához; az *assume–ensure* vagy *rely–guarantee* néven ismert eljáráshoz két követelményt kell kielégíteni:
    - minden inicializáló parancsnak *garantálnia kell* az invariáns teljesülését a végrehajtása után;
    - minden állapotmódosító parancs *felteheti,* hogy az invariáns teljesül a parancs végrehajtásának kezdetén, és minden ilyen parancsnak *garantálnia kell* az invariáns teljesülését a végrehajtása után.
  - Teljes indukcióval belátható, hogy az invariáns állítás az összes állapotra teljesül, azaz valóban invariáns!

Struktúra-deklaráció áttetsző szignatúra-kötéssel: prioritási sor

Lássuk a következő példát!

- Olyan absztrakt prioritásisor-típust akarunk létrehozni, amely tetszőleges típusú elemekből állhat.
- A műveletek (függvények) nem lehetnek politípusúak, mert az elemek relatív prioritását összehasonlítással tudjuk megállapítani. Ezt a függőséget fejezi ki az alábbi szignatúra:

```
signature PQ =
sig
    type elt
    val lt : elt * elt -> bool
    type queue
    exception Empty
    val empty : queue
    val insert : elt * queue -> queue
    val remove : queue -> elt * queue
end
```

- Egy lehetséges megvalósítás vázlatát mutatja a következő példa, ahol az elemek `string` típusúak.

Struktúra-deklaráció áttetsző szignatúra-kötéssel: prioritási sor (folyt.)

- A megvalósítástól független absztrakt típus *áttetsző szignatúrát* igényel:

```
structure PrioQueue :> PQ =
struct  type elt = string
        val lt : string * string -> bool = (op <)
        type queue = ...
end
```

- Csakhogy így `PrioQueue.queue` mellett `PrioQueue.elt` is absztrakt típus lett, így nem tudunk `PrioQueue.elt` típusú értéket létrehozni, és pl. nem hívhatjuk a `PrioQueue.insert` függvényt. Ezért `PrioQueue.elt`-nek nem kellene absztrakt típusnak lennie.
- Egy lehetséges megoldás az, hogy a PQ szignatúrát bővítjük, és a bővített szignatúrát kötjük a struktúrához:

```
signature STRING_PQ = PQ where type elt = string
structure PrioQueue :> STRING_PQ = ...
```

vagy

```
structure PrioQueue :> PQ where type elt = string = ...
```

- A tanulság: megfontolást igényel, hogy mely típusokat válasszuk absztraktnak, és melyeket ne.

Struktúra-deklaráció átlátszó szignatúra-kötéssel: `ORDERED`, `MyString`

- Átlátszó szignatúra-kötéssel csökkenthető az explicit típusspecifikációk száma a szignatúrában. De az se jó, ha túl sokat használjuk, ui. a típusinformációk láthatóvá tételével csökken a modulok függetlensége.
- Az átlátszó szignatúra-kötés tipikusan arra való, hogy egy struktúra *nézetét* állítsuk elő vele. E nézet célja, hogy elrejtse azokat a komponenseket, amelyek az adott szövegkörnyezetben feleslegesek, de ne rejtse el azokat a típusdefiníciókat, amelyekre szükség van.
- Az alábbi `ORDERED` szignatúra specifikálja a `t` típust és a `t` típusú értékekből álló párokra alkalmazható `lt` összehasonlító műveletet.

```
signature ORDERED =
sig
    type t
    val lt : t * t -> bool
end
```

- Az ilyen szignatúrát, mint láttuk, *csak átlátszóan* érdemes egy struktúrához kötni, különben nem tudnánk `t` típusú értékeket létrehozni.

Struktúra-deklaráció átlátszó szignatúra-kötéssel: ORDERED, MyString (folyt.)

- Nézzük a következő példát:

```
structure MyString : ORDERED =
struct
    type t = string
    val clt = Char.<
    fun lt (s, t) = ... clt ...
end
```

- MyString a füzérek összehasonlítását karakterek összehasonlítására vezeti vissza, clt-t elrejti. String.t a külvilág számára is ekvivalens string-gel, bár ez az ORDERED szignatúrából nem látszik: MyString tényleges, *látható* szignatúrája ugyanis:

```
ORDERED where type t = string
```

- Arra is érdemes átlátszó szignatúra-kötést használni, hogy *dokumentáljuk* egy típus jelentését (anélkül, hogy absztrakttá tennénk).

Struktúra-deklaráció átlátszó szignatúra-kötéssel: `ORDERED`, `IntLt`, `IntDiv`

- Tegyük föl, hogy egészeket kétféle alapon akarunk összehasonlítani, de nem akarjuk elrejteni, hogy egészekről van szó:
- Összehasonlítás aritmetikai alapon

```
structure IntLt : ORDERED =
struct
    type t = int
    val lt = (op <)
end
```

- Összehasonlítás oszthatóság alapján

```
structure IntDiv : ORDERED =
struct
    type t = int
    fun lt (m, n) = (n mod m = 0)
end
```

- Mind `IntLt.t`, mind `IntDiv.t` ekvivalens `int`-tel.

Átlátszóság, áttetszőség, függőség

- Az átlátszó szignatúra-kötés a típuslevezetéshez hasonlóan megkönnyíti a programozó dolgát: kevesebbet kell írnia. *De ára van:*
- átlátszó szignatúra-kötés esetén a szignatúra önmagában nem fordítható le, csak a struktúrával együtt: csak így állítható elő a struktúra tényleges, *látható* szignatúrája.
- Vagyis az összes olyan programrész, amely e struktúra látható szignatúrájára hivatkozik, *függ* e struktúra *megvalósításától!*
- Amíg az átlátszó szignatúra-kötés függőséget okoz, az áttetsző szignatúra-kötés kiküszöböli a függőséget.
- Ha egy struktúrához áttetsző módon kötjük a szignatúrát, a rá hivatkozó programrészek megbízhatnak a szignatúrában (a struktúra látható szignatúrája ui. ekvivalens az áttetsző szignatúrával).
- A megvalósítástól való függés gátolja, nehezíti a modularitást. A modularitás célja ui. az, hogy elszigetelje egymástól az egyes programrészeket, csökkentse az egyes programrészek hatását a többire. Ekkor egymástól függetlenül legyenek fejleszthetők, módosíthatók. Minél kevésbé függnek egymástól a modulok, annál könnyebben rakhatók össze a végén egyetlen rendszerré.

MODULOK HIERARCHIKUS ÖSSZEKAPCSOLÁSA

Modulok hierarchiája

- Egy nagy program architektúrája rendszerint nem lineáris, hanem faszerkezetű (hierarchikus). Az SML modulnyelv faszerkezetű modulrendszer leírását is lehetővé teszi.
- A modulok egymásba skatulyázhatók; a beágyazott struktúrát *alstruktúrának* (substructure) nevezzük.
- Egy struktúra más struktúra-deklarációkat tartalmazhat (akár átlátszó, akár áttetsző szignatúra-kötéssel).
- Egy szignatúrában egy struktúra `structure` *`strid`* `:` *`sigexp`* alakban specifikálható (szignatúráról lévén szó, itt nincs különbség átlátszó és áttetsző kötés között).
- Az alstruktúrákra a struktúrák típusellenőrzési és a kiértékelési szabályait rekurzív módon alkalmazza a fordítóprogram.
- Ebben a részben arról lesz szó, hogyan lehet alstruktúrákkal kifejezni az egyes absztrakciók egymástól való függését.

- A következő példák egy polimorf szótárat megvalósító programból valók.

Polimorf szótár `string` típusú keresési kulccsal

- Az első változatban a *keresési kulcs* `string` típusú. A szignatúra és lehetséges megvalósítása:

```
signature MY_STRING_DICT =
sig
    type 'a dict
    val empty : 'a dict
    val insert : 'a dict * string * 'a -> 'a dict
    val lookup : 'a dict * string -> 'a option
end

structure MyStringDict :> MY_STRING_DICT =
struct
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * string * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (d, k, v) = ...
    fun lookup (d, k) = ...
end
```

- A hiányzó függvénydefiníciók a füzérek lexikografikus összehasonlító műveleteit használják.

Polimorf szótár `int` típusú keresési kulccsal

- A második változatban a *keresési kulcs* `int` típusú. A szignatúra és lehetséges megvalósítása:

```
signature MY_INT_DICT =
sig
    type 'a dict
    val empty : 'a dict
    val insert : 'a dict * int * 'a -> 'a dict
    val lookup : 'a dict * int -> 'a option
end

structure MyIntDict :> MY_INT_DICT =
struct
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * int * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (d, k, v) = ...
    fun lookup (d, k) = ...
end
```

- A hiányzó függvénydefiníciók az egészek aritmetikai összehasonlító műveleteit használják.

Polimorf szótár *absztrakt* típusú keresési kulccsal

- A két változat, a típustól és az összehasonlító műveletektől eltekintve, azonos.
- A harmadik változatban a *keresési kulcs absztrakt* típusú. A *generikus* szignatúra és két leszármazottja (példánya, instanciája):

```
signature MY_GEN_DICT =
sig
    type key
    type 'a dict
    val empty : 'a dict
    val insert : 'a dict * key * 'a -> 'a dict
    val lookup : 'a dict * key -> 'a option
end

signature MY_STRING_DICT =
    MY_GEN_DICT where type key = string

signature MY_INT_DICT =
    MY_GEN_DICT where type key = int
```

Polimorf szótár `string` típusú keresési kulccsal (folyt.)

- A szignatúra egy megvalósítása `string` típusú kulcsokra:

```
structure MyStringDict :> MY_STRING_DICT =
struct
    type key = string
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * key * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) = NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
          if k < l then       (* string comparison *)
              lookup (dl, k)
          else if k > l then (* string comparison *)
              lookup (dr, k)
          else
              SOME v
end
```

- A `MY_INT_DICT` szignatúrájú `MyIntDict` hasonlóan valósítható meg.

Polimorf szótár `int` típusú kulccsal, *oszthatóságon alapuló* összehasonlítással

```
structure MyIntDivDict :> MY_INT_DICT =
struct
    type key = int
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * key * 'a * 'a dict
    fun divides (k, l) = (l mod k = 0)
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) = NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
          if divides (k, l) then      (* divisibility test *)
              lookup (dl, k)
          else if divides (l, k) then (* divisibility test *)
              lookup (dr, k)
          else
              SOME v
end
```

- Függetlenítsük a megvalósítást a keresési kulcs típusától és az összehasonlító műveletektől!

Egy rendezett absztrakt típus és néhány megvalósítása

- A `t` típus és két összehasonlító művelet

```
signature ORDERED =
sig
  type t
  val lt : t * t -> bool
  val eq : t * t -> bool
end
```

- Füzérek lexikografikus összehasonlítása

```
structure LexString : ORDERED =
struct
  type t = string
  val lt = (op <)
  val eq = (op =)
end
```

- Egészek aritmetikai összehasonlítása

```
structure LessInt : ORDERED =
struct
  type t = int
  val lt = (op <)
  val eq = (op =)
end
```

- Egészek oszthatóságon alapuló összehasonlítása

```
structure DivInt : ORDERED =
struct
  type t = int
  fun lt (m, n) = (n mod m = 0)
  fun eq (m, n) = lt (m, n)
                  andalso lt (n, m)
end
```

- Ezekben a példákban indokolt az átlátszó szignatúra-kötés alkalmazása.

Polimorf szótár generikus szignatúrája

- A `DICT` szignatúra „paramétere” az `ORDERED` szignatúrájú `Key` absztrakt keresési kulcs (a `DICT` szignatúra *örökli* a keresési kulcs `ORDERED` szignatúráját!):

```
signature DICT =
sig
    structure Key : ORDERED
    type 'a dict
    val empty : 'a dict
    val insert : 'a dict * Key.t * 'a -> 'a dict
    val lookup : 'a dict * Key.t -> 'a option
end
```

- A szignatúra két specializált változata segíti az absztrakciót:

```
signature STRING_DICT =
     DICT where type Key.t = string

signature INT_DICT =
    DICT where type Key.t = int
```

Polimorf szótár: a specializált szignatúra megvalósítása `string` kulccsal

```
structure StringDict :> STRING_DICT =
struct
    structure Key : ORDERED = LexString
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) = NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
          if Key.lt (k, l) then
              lookup (dl, k)
          else if Key.lt (l, k) then
              lookup (dr, k)
          else
              SOME v
end
```

(Félkövér szedéssel e változat és a következő két változat közötti **különbséget** emeljük ki.)

Polimorf szótár: a specializált szignatúra megvalósítása `int` kulccsal (1. változat)

```
structure LessIntDict :> INT_DICT =
struct
    structure Key : ORDERED = LessInt
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) = NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
          if Key.lt (k, l) then
              lookup (dl, k)
          else if Key.lt (l, k) then
              lookup (dr, k)
          else
              SOME v
end
```

Polimorf szótár: a specializált szignatúra megvalósítása `int` kulccsal (2. változat)

```
structure DivIntDict :> INT_DICT =
struct
    structure Key : ORDERED = DivInt
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) = NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
          if Key.lt (k, l) then
              lookup (dl, k)
          else if Key.lt (l, k) then
              lookup (dr, k)
          else
              SOME v
end
```

Később (a funktorok tárgyalásakor) látni fogjuk, hogyan írhatjuk meg e három struktúra közös generikus (azaz paraméterezhető) változatát.

MODULOK SZIMMETRIKUS ÖSSZEKAPCSOLÁSA

Típusmegosztás specifikálása

- Ebben a részben *modulok szimmetrikus összekapcsolásával* foglalkozunk.
- A különböző modulokban (akár azonos néven) specifikált absztrakt típusok mind különbözők. Általában ezt akarjuk. De nem mindig.
- A különböző modulokban specifikált típusok azonosságát az ún. *típusmegosztási előírással* (type sharing constraint) adhatjuk meg.
- A következő példák egy mértani elemeket megvalósító programból valók.
- Csupán két térbeli elemet valósítunk meg: a pontot és gömböt.

```
signature GEOMETRY =
sig
    structure Point : POINT
    structure Sphere : SPHERE
end
```

- A pont ábrázolását a vektorra, a gömb ábrázolását a vektorra és a pontra alapozzuk (ld. következő diák).

Példa: mértani alapelemek ábrázolása (VECTOR, POINT)

- A VECTOR szignatúra a vektorösszeadás egységelemét (zero), egy vektor skalárral való szorzatát (scale), továbbá két vektor összegét (add) és skalárszorzatát (dot) specifikálja.

```
signature VECTOR =
sig  type vector
     val zero : vector
     val scale : real * vector -> vector
     val add : vector * vector -> vector
     val dot : vector * vector -> real
end
```

- A POINT szignatúra egy pont eltolását egy vektor mentén (translate) és egy végpontjaival megadott vektor előállítását (ray) specifikálja.

```
signature POINT =
sig  structure Vector : VECTOR
     type point
     val translate : point * Vector.vector -> point
     val ray : point * point -> Vector.vector
end
```

Példa: mértani alapelemek ábrázolása (SPHERE)

- A gömböt a középpontjával és a sugarával adjuk meg.
- A gömböt létrehozó függvényt (`sphere`) az alábbi szignatúra specifikálja:

```
signature SPHERE =
sig
    structure Vector : VECTOR
    structure Point : POINT
    type sphere
    val sphere : Point.point * Vector.vector -> sphere
end
```

- Emlékeztetőül: a típusneveket és az értékneveket különböző névterek tárolják, ezért a `sphere` azonosító egyszerre használható típusnévként és értéknévként.
- Vegyük észre, hogy a tér dimenziója nem része a specifikációnak.
- A dimenziót majd csak a modul megvalósításakor rögzítjük, ezzel elősegítjük a specifikáció *újrafelhasználását.*

Különböző modulokban specifikált absztrakt típusok különböző volta

- Két- és háromdimenziós mértant így kezdődő struktúra-deklarációkkal valósíthatunk majd meg:

```
structure Geom2D :> GEOMETRY = ...
structure Geom3D :> GEOMETRY = ...
```

- A két struktúrának (az *áttetsző* szignatúrakötésnek köszönhetően) *különböző* lesz a látható szignatúrája: pl. a `Geom2D.Point.point` és a `Geom3D.Point.point` különböző típusok, ezért pl. a háromdimenziós térben ábrázolt `Geom3D.Sphere.sphere` gömb középpontja nem lehet a kétdimenziós térben ábrázolt `Geom2D.Point.point` pont.
- Ez jó dolog, növeli a programozás biztonságát.
- Sajnos, nemcsak `Geom2D` különbözik `Geom3D`-től, hanem pl. `Geom2D.Sphere.Vector` is különbözik `Geom2D.Point.Vector`-tól! Ez viszont nem jó, nem ezt akarjuk.
- Pl. a fordító típushibát jelez a következő sor fordításakor (ahol `p` és `q` `Geom2D.Point.point` típusú pontok):

```
Geom2D.Sphere.sphere(p, Geom2D.Point.ray(p, q))
```

- `Geom2D.Point.ray(p, q)` eredménye `Geom2D.Point.Vector.vector` típusú, `Geom2D.Sphere.sphere` ugyanakkor `Geom2D.Sphere.Vector.vector` típusú értéket vár. Nyilvánvalóan ezt nem akarjuk. Mi lehet az oka, hogyan küszöbölhetjük ki?

Különböző modulokban specifikált absztrakt típusok megosztása (SPHERE)

- Az ok az, hogy a szignatúrákban specifikáltuk azokat az alstruktúrákat, amelyektől e szignatúrák függnek, így a pont- és a vektor-absztrakciót *két-két példányban* hoztuk létre!
- Mivel áttetsző szignatúrakötést használunk, a látható szignatúráik mind különböznek!
- Néha ezt akarjuk, néha nem. Ezért az SML-ben előírhatjuk, hogy két alstruktúra valamely absztrakt típusa azonos legyen. Erre való a *típusmegosztási előírás* (type sharing constraint).
- SPHERE módosított specifikációja (a módosítást **félkövér szedés** jelöli):

```
signature SPHERE =
sig  structure Vector : VECTOR
     structure Point : POINT
     sharing type Point.Vector.vector = Vector.vector
     type sphere
     val sphere : Point.point * Vector.vector -> sphere
end
```

- A típusmegosztási előírás egy változatával, a *struktúramegosztási előírással* (structure sharing constraint) előírhatjuk, hogy két alstruktúra *összes* absztrakt típusa azonos legyen.

```
... sharing Point.Vector = Vector ...
```

Különböző modulokban specifikált absztrakt típusok megosztása (GEOMETRY)

- GEOMETRY módosított specifikációja (két változatban, a módosítást **félkövér szedés** jelöli):

```
signature GEOMETRY =
sig
    structure Point : POINT
    structure Sphere : SPHERE
    sharing type Point.point = Sphere.Point.point
    sharing type Point.Vector.vector = Sphere.Vector.vector
end
```

```
 ... sharing Point = Sphere.Point
     sharing Point.Vector = Sphere.Vector ...
```

- A megosztási előírás tehát garantálja, hogy
  - a megosztási előírás által érintett összes absztrakt típus azonos legyen;
  - a típusegyenletek mindig teljesüljenek, amikor a GEOMETRY szignatúrát és összes komponensét megvalósítjuk.
- VECTOR-t és POINT-ot *egy példányban* valósítjuk meg, és e példányokat *újra felhasználjuk* a magasabb szintű absztrakció során (ld. a következő fóliákon).

Példa: VECTOR, POINT, SPHERE és GEOMETRY egy 3D-s megvalósítása

- ```
  structure Vector3D : VECTOR = ...
  ```
- ```
  structure Point3D : POINT =
  struct
      structure Vector : VECTOR = Vector3D
          ...
  end
  ```
- ```
  structure Sphere3D : SPHERE =
  struct
      structure Vector : VECTOR = Vector3D
      structure Point : POINT = Point3D
          ...
  end
  ```
- ```
  structure Geom3D :> GEOMETRY =
  struct
      structure Point = Point3D
      structure Sphere = Sphere3D
  end
  ```
- Fordítási idejű típushibához vezetne egyes 2D-s elemek alkalmazása a 3D-s megvalósításban. Példa:

  ```
  ... structure Sphere = Sphere2D ...
  ```

A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése

- Adódik a kérdés, hogy a típusmegosztás elkerülhető-e a pont- és a vektor-absztrakció következtében létrejött példányok számának csökkentésével.
- A válasz: igen; azon az áron, hogy az egész programstruktúrát erőszakosan megváltoztatjuk.
- Első lépésként `SPHERE`-ben `Vector.vector`-t `Point.Vector.vector`-ra cseréljük:

```
signature SPHERE =
sig  structure Point : POINT
     type sphere
     val sphere : Point.point * Point.Vector.vector -> sphere
end
```

- Ezzel `GEOMETRY`-ben `sharing Point.Vector = Sphere.Vector` feleslegessé vált, a megosztási előírások száma eggyel csökkent:

```
signature GEOMETRY =
sig  structure Point : POINT
     structure Sphere : SPHERE
     sharing Point = Sphere.Point
end
```

A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése (folyt.)

- Ha a `Point` alstruktúra specifikálását is sikerülne feleslegessé tenni `SPHERE`-ben, egyáltalán nem kellene megosztási előírás. Ekkor ez maradna `SPHERE`-ből:

```
signature SPHERE =
sig
     type sphere
     val sphere : Point.point * Point.Vector.vector -> sphere
end
```

- Ha a `Point` struktúra a `SPHERE` szignatúra fordításakor már definiálva van, akkor `SPHERE` lefordítható.
- Csakhogy ettől kezdve a `SPHERE` szignatúra a `Point` struktúrától, azaz a `POINT` szignatúra *egy megvalósításától* függ. Pl. a 2D-s megvalósítástól, ami által a `SPHERE` szignatúra dimenziótól való függetlensége megszűnt, az absztrakció csorbát szenvedett.
- Ez az út tehát általában nem javasolható.
- Az eset ahhoz hasonló, mint amikor egy értéket egy függvény nem paraméterként vesz át a futása közben, hanem globális értékként már a fordítás során beépül a függvénybe.
- A `Point` struktúra a `SPHERE` szignatúra *paraméterének* tekinthető az ismertetett értelemben.

A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése (folyt.)

- A megosztási előírásoktól látszólag úgy is megszabadulhatunk, hogy a `GEOMETRY` szignatúrából töröljük a `Point` alstruktúrát. Ez lehetséges, de csak elhalasztjuk vele a problémát.
- Egy mértani elemeket megvalósító programban ui. több olyan elem is lehet, amely a pont-fogalomra épít. Ezeknek pedig feltétlenül szükségük lesz a megosztási előírásra.
- Lássunk egy további példát ennek alátámasztására, a `SEMI_SPACE` specifikációját. A `side` predikátummal vizsgálható meg, hogy *egy adott pont a tér melyik felében* van.

```
signature SEMI_SPACE =
sig
     structure Point : POINT
     type semispace
     val side : Point.point * semispace -> bool option
end
```

- A `SEMI_SPACE` szignatúrából, a `SPHERE`-hez hasonlóan, nem törölhetjük a `Point` alstruktúra specifikációját, ezért `Point`-ból mégiscsak két újabb példányt hozunk létre, azonosságukat pedig *megosztási előírással* kell kifejeznünk a `GEOMETRY` szignatúra új változatában.

A típusmegosztás elkerülése, a megosztási előírások számának csökkentése (folyt.)

- A `Point` alstruktúrák azonosságát tehát megosztási előírással kell kifejeznünk `GEOMETRY` kiegészített, de a `Point` alstruktúra nélküli változatában, `EXTD_GEOMETRY`-ben:

```
signature EXTD_GEOMETRY =
sig
    structure Sphere : SPHERE
    structure SemiSpace : SEMI_SPACE
    sharing Sphere.Point = SemiSpace.Point
end
```

- Amiről itt szó van, nem más, mint a moduláris programozás alapvető belső ellentmondása.
  - Egyrészt el akarjuk *szigetelni* egymástól a modulokat, hogy egymástól függetlenül kezelhessük őket, és az egyik modul megváltoztatása ne befolyásolja a többit. (A globális értékektől, változóktól való függés is az elszigetelés ellen hat!)
  - Másrészt modulok kombinálásával akarunk programokat létrehozni, s ekkor a modulok egyes programelemeinek azonosságát ki kell kötnünk (az SML-ben: megosztási előírásokkal).
- A megosztási előírás olyan *eszköz,* amely a specifikáció rögzítésével hoz létre kapcsolatot a különböző absztrakciók között, és teremti meg az egész program koherenciáját.

PARAMÉTEREZHETŐ MODULOK

Paraméterezhető, más néven generikus modulok

- Az újrafelhasználhatóságot segíti elő a *paraméterezhető,* más néven *generikus* modul azáltal, hogy a megvalósítás egy vagy több elemét specifikálatlanul hagyja. A specifikálatlan elemek specifikálása majd a modul egy *példányát* hozza létre. A közös részt *csak egyszer* kell megírni.
- Az SML-ben az ilyen generikus modult *funktornak* (`functor`) nevezik. A funktornak struktúra a paramétere is, az eredménye is. A funktor egy *példányát* úgy hozzuk létre, hogy alkalmazzuk egy (létező) struktúrára.
- A *funktordeklarációnak* (vagy *funktorkötésnek)* is két változata van, az *átlátszó*:

```
functor funid (decs) : sigexp = strexp
```

- és az *áttetsző*:

```
functor funid (decs) :> sigexp = strexp
```

- A funktor típusának ellenőrzéséhez a fordító megvizsgálja, hogy a funktor törzse megfelel-e a szignatúra-kötés által előírt szignatúrának, feltéve, hogy a funktor paramétereinek megfelelő a szignatúrája.
- Mint tudjuk, az *áttetsző* szignatúra-kötés eredménye az adott szignatúra, az *átlátszó* szignatúra-kötés pedig ennek a törzsszignatúra szerinti típusokkal bővített változata.

Példa: polimorf szótár megvalósítása funktorral

- Egy korábbi példánk egy olyan polimorf szótár volt, ahol a keresési kulcsot és a rajta végrehajtható műveleteket egy *alstruktúra* specifikálta. A félkövér szedés a változatok közötti eltérésre utal.

```
structure StringDict :> DICT where type Key.t = string =
struct
    structure Key : ORDERED = LexString
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) =                NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
              if Key.lt (k, l) then        lookup (dl, k)
              else if Key.lt (l, k) then lookup (dr, k)
              else                         SOME v
end
```

- Látható, hogy különbség csak a keresési kulcs típusában és a rajta végrehajtható műveletekben van; mindezt az `ORDERED` szignatúra specifikálja.

Példa: polimorf szótár megvalósítása funktorral (`DictFun`)

- Az alstruktúrát, ha funktort deklarálunk, paraméterként adhatjuk át. A struktúradeklaráció és a funktordeklaráció közötti különbségeket most is félkövér szedéssel emeljük ki.

```
functor DictFun (structure K : ORDERED) :> DICT where type Key.t = K.t =
struct
    structure Key : ORDERED = K
    datatype 'a dict = Empty
                     | Node of 'a dict * Key.t * 'a * 'a dict
    val empty = Empty
    fun insert (None, k, v) = Node (Empty, k, v, Empty)
    fun lookup (Empty, _) =                NONE
      | lookup (Node (dl, l, v, dr), k) =
               if Key.lt(k, l) then        lookup (dl, k)
               else if Key.lt (l, k) then lookup (dr, k)
               else                        SOME v
end
```

- A `DICT where type Key.t = K.t` szignatúra az `'a dict` típus *absztrakt voltát megőrzi*. A `Key.lt` összehasonlító műveletet a paraméterként átadott alstruktúra valósítja meg.
- A funktor `structure K : ORDERED` formális paraméterének *specifikálása* önmagában nem elég, a `structure Key : ORDERED = K` *deklarációra* is szükség van a funktor törzsében.

Funktoralkalmazás szignatúrája, funktor generativitása, ill. applikativitása

- A funktoralkalmazás `funid (binds)` alakú kifejezés, ahol `binds` a funktorargumentumok kötésének egy sorozata.
- Egy *funktoralkalmazás szignatúrája* a következő eljárással határozható meg. Feltesszük, hogy ismerjük a funktorparaméterek szignatúráját, valamint a funktor látható szignatúráját (a megadottat áttetsző, a bővítettet átlátszó szignatúrakötés esetén).
  - Minden argumentum szignatúráját illesztjük a funktor megfelelő paraméterének szignatúrájára. Ezzel minden argumentumra megkapjuk a paraméterszignatúrák egy bővített változatát.
  - Ha az eredmény szignatúrája hivatkozik a funktorparaméter valamely típuskomponensére, akkor a bővített paraméterszignatúrában lévő típusdefiníciónak meg kell jelennie az eredmény szignatúrájában.
- Az így előállított szignatúra átlátszó kötéssel kapcsolódik a funktoralkalmazáshoz. Ez azt jelenti, hogy ha a funktor eredményszignatúrája egy típust absztraktként specifikál, akkor e funktor minden alkalmazása e típusból egy új példányt hoz létre. Ezt a viselkedést a funktor *generativitásának* nevezzük. (Ezzel szemben a funktor *applikativitása* azt jelenti, hogy a funktor összes példánya megosztva „használja” ugyanazt az absztrakt típust.)

Példa: polimorf szótár (`LtIntDict`, `LexStringDict`, `DivIntDict`)

- A szótár három változatát a `DictFun` funktor alkalmazásával könnyű előállítani:

```
structure LtIntDict = DictFun (structure K = LessInt)
structure LexStringDict = DictFun (structure K = LexString)
structure DivIntDict =  DictFun (structure K = DivInt)
```

- Idézzük föl `LexString`, `LessInt` és `DivInt` egy-egy megvalósítását:

```
structure LexString : ORDERED =
struct  type t = string
    val lt = (op <)
    val eq = (op =)
end
```

```
structure LessInt : ORDERED =
struct  type t = int
    val lt = (op <)
    val eq = (op =)
end
```

```
structure DivInt : ORDERED =
struct  type t = int
    fun lt (m, n) = (n mod m = 0)
    fun eq (m, n) = lt (m, n) andalso lt (n, m)
end
```

- Például `LessInt` bővített szignatúrája ez: `ORDERED where type t = int`.
- Ha a `K` paraméter aktuális értéke `LessInt`, akkor `K.t` és `int` ekvivalensek lesznek, és így `DictFun` aktuális szignatúrája ez: `DICT where type Key.t = int`.

Funktorok és a típusmegosztás specifikálása egy példán

- Korábban specifikáltuk a `GEOMETRY` szignatúrát és komponenseit.
- Mivel a célunk többféle (2D és 3D) megvalósításuk, érdemes őket funktorként definiálnunk.

```
functor PointFun
    (structure V : VECTOR) : POINT = ...

functor SphereFun
    (structure V : VECTOR
     structure P : POINT) : SPHERE =
struct
    structure Vector = V
    structure Point = P
        ...
end

functor GeomFun
    (structure P : POINT
     structure S : SPHERE) : GEOMETRY =
struct
    structure Point = P
    structure Sphere = S
end
```

Funktorok és a típusmegosztás specifikálása egy példán (folyt.)

- Az előző funktordefiníciókkal a 2D-s programcsomag így valósítható meg:

```
structure Vector2D : VECTOR = ...

structure Point2D : POINT =
     PointFun (structure V = Vector2D)

structure Sphere2D : SPHERE =
    SphereFun (structure V = Vector2D and P = Point2D)

structure Geom2D : GEOMETRY =
    GeomFun (structure P = Point2D and S = Sphere2D)
```

Funktorok és a típusmegosztás specifikálása egy példán (folyt.)

- Egyetlen baj van csupán: `SphereFun` és `GeomFun` típushibás! A hiba javítható: típusmegosztást kell előírnunk.

```
functor SphereFun
    (structure V : VECTOR
     structure P : POINT
     sharing P.Vector = V) : SPHERE =
struct
    structure Vector = V
    structure Point = P
        ...
end

functor GeomFun
    (structure P : POINT
     structure S : SPHERE
     sharing P.Vector = S.Vector
     sharing P = S.Point) : GEOMETRY =
struct
    structure Point = P
    structure Sphere = S
end
```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor

- Most is felvetődik a kérdés: elkerülhető-e típusmegosztás?
- Igen, de azon az áron, hogy erőszakosan megváltoztatjuk a program szerkezetét.
- A típusmegosztás fő előnye, hogy közvetlenül és tömören fejezi ki az elvárt összefüggéseket, de a paraméterek szignatúrájának definiálásakor még nem kell velük foglalkozni. Ez a tulajdonság nagyon megkönnyíti az „előre gyártott” programrészek újrafelhasználását, hiszen ilyen esetekben a típusmegosztás konkrét igényét előre (azaz pl. a paraméterek definiálásakor) lehetetlen megmondani.
- Vegyük elő a már látott példát, amelyben a megosztási specifikációk számát egyre csökkentettük.

```
signature EXTD_GEOMETRY =
sig
    structure Sphere : SPHERE
    structure SemiSpace : SEMI_SPACE
    sharing Sphere.Point = SemiSpace.Point
end
```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- Az `EXTD_GEOMETRY` szignatúrát ezzel a funktorral valósítjuk meg:

```
functor ExtdGeomFun
    (structure Sp : SPHERE
     structure Ss : SEMI_SPACE
     sharing Sp.Point = Ss.Point) =
struct
    structure Sphere = Sp
    structure SemiSpace = Ss
end
```

- Ahhoz, hogy a megosztási előírást elhagyhassuk a funktor paraméteréből, gondoskodnunk kell arról, hogy az `EXTD_GEOMETRY` szignatúra által előírt típusmegosztás teljesüljön.
- Megoldás lehet a `POINT` szignatúrát megvalósító struktúra „kiemelése”.
- Kétféle módon járhatunk el.

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- Az első lehetőség az, hogy `ExtdGeomFun` paraméterként `SPHERE` és `SEMI_SPACE` egy-egy megvalósítása helyett a közös elem, azaz `POINT` egy megvalósítását kapja, és a funktor törzsében hozza létre `SPHERE` és `SEMI_SPACE` egy-egy megvalósítását.
- Ehhez a `SphereFun` és a `SemiSpaceFun` funktorokat is megfelelően kell paraméterezni:

```
functor SphereFun
    (structure P : POINT) : SPHERE =
struct
    structure Vector = P.Vector
    structure Point = P
    ...
end

functor SemiSpaceFun
    (structure P : POINT) : SEMI_SPACE =
struct
    ...
end
```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- Az `ExtdGeomFun` funktor első változatával, `ExtdGeomFun_1`-gyel több gond van:

```
functor ExtdGeomFun_1
    (structure P : POINT) : GEOMETRY =
struct
    structure Sphere = SphereFun (structure P = Point)
    structure SemiSpace = SemiSpaceFun (structure P = Point)
end
```

  - `ExtdGeomFun_1`-ben alstruktúra-definícióban fordul elő `SphereFun` és `SemiSpaceFun`, és ez olyan paraméterekre korlátozza `ExtdGeomFun_1`-et, amelyek e két funktorral állíthatók elő. Ez erős korlátozás `ExtdGeomFun`-hoz képest, amely `SPHERE`, ill. `SEMI_SPACE` *bármely* megvalósításának alkalmazását lehetővé teszi.
  - `ExtdGeomFun_1`-nek paraméterként meg kell kapnia komponenseinek közös elemeit (a példában a `POINT` szignatúrát megvalósító `P` struktúrát). Ez a megoldás kényelmetlenné válik, ha a programunk sok rétegből áll: a „ legtávolabbi” elemtől kezdve a teljes hierarchiát fel építenünk minden alkalommal.
  - Nincs igazi indok arra, hogy `ExtdGeomFun_1` miért éppen `POINT` egy megvalósítását kapja paraméterként. Az oka (de nem elég nyomós oka) az, hogy `ExtdGeomFun_1`-nek fel kell építenie az említett hierarchiát a megosztási előírások kielégítéséhez.

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- A második lehetőség az, hogy a paraméterként átadott közös elem, azaz a `POINT` megvalósításához kötjük `SPHERE`, ill. `SEMI_SPACE` (ugyancsak paraméterként átveendő) megvalósítását, és így érjük el a típusegyenletek teljesülését.
- `ExtdGeomFun_2` alábbi deklarációja kielégíti a követelményeket, de láthatóan nincs semmi előnye a megosztási előírásokat tartalmazó kiinduló változathoz, `ExtdGeomFun`-hoz képest.

```
functor ExtdGeomFun_2
    (structure P : POINT
     structure Sp : SPHERE where Point = P
     structure Ss : SEMI_SPACE where Point = P) =
struct
    structure Sphere = Sp
    structure SemiSpace = Ss
end
```

- Inkább hátránynak tekinthető, hogy az eredeti változathoz képest egy harmadik paramétert vezettünk be, amelynek az egyetlen szerepe az, hogy elhagyhassuk a megosztási előírást.

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- `ExtdGeomFun_2` rafináltabb változata `ExtdGeomFun_3` és `ExtdGeomFun_4`. Mindkettőnek csak két paraméterre van szüksége azáltal, hogy a kettő közül valamelyiket bizonyos értelemben kiemeltük, és előírtuk, hogy a másiknak vele kompatíbilisnek kell lennie.

```
functor ExtdGeomFun_3
    (structure Sp : SPHERE
     structure Ss : SEMI_SPACE where Point = Sp.Point) =
struct
    structure Sphere = Sp
    structure SemiSpace = Ss
end

functor ExtdGeomFun_4
    (structure Ss : SEMI_SPACE
     structure Sp : SPHERE where Point = Ss.Point) =
struct
    structure Sphere = Sp
    structure SemiSpace = Ss
end
```

A típusmegosztás elkerülése funktor használatakor (folyt.)

- E két utóbbi megoldásnak megvannak ugyanazok az előnyei, mint a megosztási előírást alkalmazó megoldásnak. De meg kellett törnünk a megoldás természetes szimmetriáját. Ez mondanivalónk lényege:
- A megosztási előírással a programozó *szimmetrikus helyzetet szimmetrikus módon* oldhat meg.
- A programozó helyett a fordítóprogram töri meg a szimmetriát, amikor ilyen vagy olyan megvalósítást választ. A programozó nem kényszerül arra, hogy önkényes, semmivel alá nem támasztható döntést hozzon.

A diák Robert Harper *Programming in Standard ML* c. jegyzete *Part III. The Module Language* c. részének felhasználásával készültek (ld. <http://www-2.cs.cmu.edu/ rwh/smlbook>).